

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



СОДЕРЖАНИЕ

Величественная программа развития электрификации СССР	3
Э. С. Иохвидов и Г. В. Сербиновский — О схемах электроснабжения высотных зданий	11
А. И. Важнов и Э. С. Мкртчян — Трехфазный последовательный коллекторный генератор, как отрицательное сопротивление	16
В. В. Енько — Диаграмма тока насыщенной синхронной явнополюсной машины	23
В. В. Рудаков — Влияние сдвига щеток поперечной цепи на переходный процесс электромашинного усилителя	26
Б. К. Буль — Методы расчета магнитных цепей с учетом магнитного сопротивления стали	29
Б. П. Петров — Влияние э. д. с. самоиндукции в цепи тяговых электродвигателей на проскальзывание колес при буксовании и юзе	40
В. А. Карасев и А. В. Склянин — К расчету перенапряжений в трансформаторных обмотках	46
А. В. Баев, И. А. Криченова, В. Е. Поляков, В. М. Синьков и В. Ю. Сродных — О характеристиках преобразовательных установок	51
А. Д. Свенчанский и С. А. Малышев — Расчет нагревательных элементов электрических калориферов	53
Н. Г. Максимович — К теории преобразования схем Г. Крона	56
Р. А. Воронов — Расчет цепей с нелинейными элементами методом поправок	58
М. А. Островский — Объективный люксметр для измерения малых освещенностей	62
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
С. И. Огороднов — Из опыта эксплуатации электропривода крупных прессов	65
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
А. М. Залесский — О приоритете В. В. Петрова в открытии электрической дуги	68
Л. В. Цукерник — Роль М. О. Доливо-Добровольского в создании схем компаундирования синхронных машин	70
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ	
Б. А. Телешев — Необходимое уточнение терминологии в вопросе измерения реактивной мощности	72
Е. Л. Сиротинский — Об условных обозначениях и правилах начертания схем релейной защиты и автоматики	75
ДИСКУССИИ	
К статье Г. И. Штурмана „Разомкнутые беличьи клетки в короткозамкнутых асинхронных двигателях“ Л. М. Лубоцкий. Правила устройства электротехнических установок М. М. Феермарк. К статье Е. Л. Сиротинского „Об условных обозначениях и правилах начертания схем релейной защиты и автоматики“ И. И. Соловьев, Е. Д. Зейлидзон, А. Б. Крикунчик, Б. А. Хомутов, А. Г. Москалев, И. Н. Попов, М. И. Царев	78
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
О некоторых вопросах методики изложения курса электрических машин. Об экономическом критерии для городских кабельных сетей.	85
ХРОНИКА	
Профессор П. А. Азбукин. Профессор И. Г. Каганов	85
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
О выборе перспективной системы тока для электрификации магистральных железных дорог. Электродолбежник. Электротрамбовка. Повышение срока службы аккумуляторных батарей на автомобиле. Инверторная установка тяговой подстанции. Получение высоких постоянных напряжений путем зарядки капелек ртути.	88
БИБЛИОГРАФИЯ	
А. Д. Свенчанский и А. М. Вайнберг — Книга Ю. Е. Ефроймовича и В. И. Фейгина „Автоматическое регулирование дуговых металлургических печей“	91
Г. К. Цвезава — Книга М. А. Шилоносова „Электрические контрольно-измерительные приборы. Ремонт и испытание“.	92
Н. В. Волоцкой — О технической литературе по люминесцентному освещению	93
В. К. Балудев — Книга Я. А. Шнейберга „Михаил Матвеевич Боресков“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80
Адрес для телеграмм: Москва Электричество.
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,
почтовый ящик № 648.

Да здравствует 35-я годовщина Великой Октябрьской социалистической революции!

Рабочие, крестьяне, интеллигенция Советского Союза! Успешно выполним исторические задачи, поставленные XIX съездом Коммунистической партии! Добьемся новых побед в строительстве коммунизма!

Под знаменем Ленина, под водительством Сталина — вперед, к победе коммунизма!

(Из призывов ЦК КПСС к 35-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции)

Величественная программа развития электрификации СССР

Решения XIX съезда Коммунистической партии Советского Союза, историческая речь великого вождя и учителя трудящихся товарища В. Сталина на съезде и его гениальное произведение «Экономические проблемы социализма в СССР» являются замечательными документами нашей эпохи, в которых дано исключительно глубокое обобщение великих побед Советского Союза и с предельной ясностью определены пути дальнейшей борьбы за укрепление могущества нашей Родины, за торжество коммунизма в СССР, за дело мира и демократии во всем мире. Работа XIX съезда явилась яркой демонстрацией величайшего единства партии и ее тесной сплоченности вокруг Ленинско-Сталинского Центрального Комитета, вокруг любимого вождя и учителя товарища Сталина.

35-ю годовщину Великой Октябрьской социалистической революции советский народ встречает с восторгом законной гордости за свою партию.

В отчетном докладе Центрального Комитета партии т. Г. М. Маленков дал глубокий анализ международного положения СССР и показал огромную организаторскую и воспитательную работу партии и достигнутые партией под ее руководством великого Сталина всемирно-исторические победы. Героическая победа советского народа в Великой Отечественной войне, точное выполнение плана четвертой пятилетки, дальнейшее развитие народного хозяйства, повышение материального благосостояния и культурного уровня жизни советского народа, укрепление морально-политического единства советского общества и дружбы народов нашей страны, единение вокруг Советского Союза всех сил мира и демократии — таковы главные итоги, подтверждающие правильность политики нашей партии.

Принятый съездом Устав Коммунистической партии определил ее главные задачи на современ-

ном этапе следующими словами: «Ныне главные задачи Коммунистической партии Советского Союза состоят в том, чтобы построить коммунистическое общество путем постепенного перехода от социализма к коммунизму, непрерывно повышать материальный и культурный уровень общества, воспитывать членов общества в духе интернационализма и установления братских связей с трудящимися всех стран, всемерно укреплять активную оборону Советской Родины от агрессивных действий ее врагов».

Планы партии на будущее, определяющие перспективы и пути нашего движения вперед, опираются на знание экономических законов, опираются на науку о строительстве коммунистического общества, разработанную товарищем Сталиным. Опубликованное накануне XIX съезда партии новое замечательное произведение товарища И. В. Сталина «Экономические проблемы социализма в СССР» идейно вооружает партию и советский народ, определяет научные основы развития социалистической экономики и указывает четкие пути постепенного перехода от социализма к коммунизму.

Директивы XIX съезда партии по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 гг. являются наглядным свидетельством того, как партия, руководствуясь открытыми и научно-обоснованными товарищем Сталиным законами социалистической экономики, практически решает великие задачи, связанные с переходами от экономики социализма к другой, высшей экономике — к экономике коммунизма.

Пятый пятилетний план определяет новый мощный подъем народного хозяйства СССР и обеспечивает дальнейший значительный рост материального благосостояния и культурного уровня советского народа.

В директивах съезда по пятому пятилетнему плану дана также и развернутая программа но-

вого величественного развития электрификации СССР на 1951—1955 гг.

Замечательная ленинская формула: «Коммунизм есть советская власть плюс электрификация всей страны», являющаяся, как вновь подчеркнул это товарищ Сталин, единственно правильной формулой и определением коммунизма, указывает на то, что успешное строительство коммунизма возможно на базе высшей техники, на технической базе современного крупного производства, связанного так или иначе, прямо или косвенно, с делом электрификации.

Партия последовательно проводит в жизнь великую ленинско-сталинскую идею электрификации всей страны и к настоящему времени достигла в этой области гигантских успехов. За один 1951 г. в СССР было введено в действие около 3 млн. кВт новых мощностей электростанций. Это больше, чем мощность на всех действующих электростанциях таких стран, как Бельгия, Швейцария или Голландия.

Пятилетний план предусматривает высокие темпы дальнейшего роста мощностей электростанций. Общая мощность электростанций за пятилетие увеличится примерно в два раза, а гидроэлектростанций — в три раза. Из строящихся гидроэлектростанций необходимо назвать прежде всего Куйбышевскую и Сталинградскую гидроэлектростанции на Волге, а также Каховскую гидроэлектростанцию на Днепре, Куйбышевская гэс мощностью 2,1 млн. кВт будет введена в строй в 1955 г., что значительно усилит электроснабжение центральных районов и Поволжья. Наряду с Куйбышевской гидроэлектростанцией в течение пятого пятилетия должны быть построены также такие крупные гидроэлектростанции, как Камская, Горьковская, Мингечаурская, Усть-Каменогорская и др., мощность которых, вводимая в настоящее пятилетие, составит около 2 млн. кВт. Кроме того, будут построены другие районные и местные гидроэлектростанции. В настоящее время развернуто строительство Сталинградской и Каховской гидроэлектростанций, в ближайшее время будет начато строительство новых крупных гидроэлектростанций: Чебоксарской на Волге, Воткинской на Каме, Бухтарминской на Иртыше и ряда других. Начнутся работы по комплексному использованию энергетических ресурсов реки Ангары для развития на базе дешевой электроэнергии и местных источников сырья алюминиевой, химической, горнорудной и других отраслей промышленности.

Крупная Камская гидроэлектростанция, вступающая в строй в 1954 г., значительно улучшит

электроснабжение уральской промышленности. Для этой же цели предназначена и крупная Воткинская гидроэлектростанция, строительство которой будет начато вслед за пуском Камской гэс.

Для обеспечения электроэнергией центральных районов страны усиленными темпами ведется строительство мощной Горьковской гидроэлектростанции. На строительстве этой станции сосредоточена огромная техника и работает большой коллектив рабочих и инженерно-технического персонала; среди них свыше 2 500 коммунистов и комсомольцев. В 1951 г. и в текущем году строители успешно справляются с выполнением производственных заданий, и есть все основания считать, что крупнейшее сооружение войдет в строй действующих предприятий страны точно в срок, установленный партией и правительством.

В конце 1952 г. будут закончены строительством такие мощные гидроэлектростанции, как Усть-Каменогорская в Казахстане и Гюмюшкентская в Армении, которые не только полностью обеспечат электроснабжение потребителей, но и создадут резервы электрических мощностей. Для создания прочной энергетической базы нефтепромышленности в Азербайджане в первой половине 1953 г. будет введена в строй крупная Мингечаурская гидроэлектростанция. Мингечаурский гидроузел даст дешевую электроэнергию народному хозяйству и вместе с Кура-Араксинской системой позволит освоить под плесцу, хлопок и другие технические культуры сотни тысяч гектаров ныне пустующих земель.

В целях серьезного улучшения электроснабжения Юга нашей страны, Урала и Кузбасса предусматривается значительный рост мощностей тепловых районных и заводских электростанций в этих районах. Увеличение мощности тепловых электростанций будет обеспечено в первую очередь путем расширения действующих станций. В Донбассе и Приднепровье, кроме Каховской гидроэлектростанции, начато строительство нескольких крупных тепловых электростанций. Кроме того расширяются и действующие электростанции. Осуществление этих мероприятий значительно улучшит энергоснабжение промышленности Донбасса, Приднепровья и Ростова. Будут обеспечены электроэнергией также орошение и электрификация сельского хозяйства Южной Украины и Северного Крыма. Ряд крупных тепловых электростанций сооружается в Москве, Ивановской и Тульской областях. Наряду со строительством крупных электростанций будет проводиться строительство небольших и средних электростанций с тем, что

чить электроснабжение городов и районов, для широкой теплофикации городов и промышленных предприятий будет продолжено строительство теплоэлектростанций. Удельный вес в общем балансе мощности тепловых электростанций непрерывно возрастает. Так, по Министру электростанций мощность тэц к началу 2 г. увеличилась по сравнению с 1940 г. более в два раза.

Убедительным примером огромного внимания советского правительства к нуждам союзных республик являются, в частности, задания по разному в пятом пятилетии хозяйства и культуры Латвийской ССР, Литовской ССР и Эстонской Р. В итоге четвертой пятилетки продукция промышленности этих республик увеличилась по сравнению с 1940 г. в 2,8 раза. В пятом пятилетии будет осуществляться дальнейшая индустриализация и, в частности, электрификация указанных выше союзных республик. В связи с этим решается в этих республиках увеличить в 2—2,5 раз выработку электроэнергии, построить Нарвскую гидроэлектростанцию, Рижскую теплоэлектростанцию и развернуть строительство Каунасской гидроэлектростанции.

Огромный рост мощностей электростанций определяет и исключительно высокие темпы роста выработки электрической энергии. В целом Советскому Союзу план выработки электроэнергии в 1951 г. был выполнен. Выработка электроэнергии превысила выработку довоенного 1940 г. более чем в 2 раза. В 1952 г. электроэнергия будет произведена 117 млрд. кВтч.

Выработка электроэнергии в 1955 г. по сравнению с 1950 г. возрастет примерно на 80%. Одна Куйбышевская гидроэлектростанция будет производить 10 млрд. кВтч электроэнергии в год, т. е. в 10 раз больше того, что вырабатывали все электростанции России в 1913 г.

Перспективы дальнейшего роста мощностей электростанций и производства на них электроэнергии в СССР являются еще более грандиозными. Как указывалось выше, в ближайшее время будет приступлено к строительству крупнейшей гидроэлектростанции на реке Ангаре. Полное энергетическое освоение этой реки, обладающей огромными гидроэнергетическими ресурсами, может обеспечить выработку свыше 60 млрд. кВтч электроэнергии в год.

Для передачи электрической энергии от крупных гидроэлектростанций в промышленные центры потребуются дальние линии электропередачи. В текущем пятилетии будет сооружена первая из таких дальних линий электропередачи — ли-

ния Куйбышев—Москва с уникальным, еще нигде в мире практически не применявшимся, сверхвысоким напряжением 400 кв. Под таким напряжением на расстояние 925 км будет передаваться с Куйбышевской гэс в Москву мощность порядка 1 200 тыс. кВт или 6 100 млн. кВтч электроэнергии в год. На этой линии будут применены новейшие достижения нашей отечественной электротехники, которые обеспечат устойчивую и надежную передачу электрической энергии на столь огромное расстояние. Следующим этапом в развитии дальних электропередач является линия Сталинград—Москва на расстояние свыше 1 600 км.

Эти электропередачи являются важнейшим этапом на пути создания единой высоковольтной сети, которая охватит в ближайшие годы большую часть Европейской территории Советского Союза.

Огромные по своему объему строительные работы при сооружении крупнейших гидроузлов и, в особенности, земляные работы выполнимы в короткие сроки благодаря применению самой широкой механизации указанных работ.

Советские машиностроители создали целую серию новейших мощных электрифицированных машин для механизации крупного строительства и, наладив в короткий срок их серийное производство, помогли осуществить почти полную механизацию работ на строительстве такого величественного сооружения, как Волго-Донской канал имени В. И. Ленина, и закончить это сооружение в сроки, не имеющие примеров в мировой практике.

За годы четвертой пятилетки было создано и освоено в серийном производстве более 220 новых основных типов машин для механизации труда. Среди них такие выдающиеся достижения советской техники, как, например, 14-кубовый шагающий экскаватор Уралмашзавода весом в 1 250 т и с вылетом стрелы до 75 м. Этот экскаватор может переработать без применения транспорта свыше 2,5 млн. м³ земли в год и заменить, таким образом, тяжелый физический труд 7 тыс. рабочих. Коллектив Уральского завода тяжелого машиностроения в настоящее время закончил изготовление уже восьмого экскаватора такой мощности. Работа этих экскаваторов обеспечивает выемку и перемещение свыше 20 млн. м³ грунта в год.

На строительстве электростанций системы МЭС в 1952 г. механизация доведена: по земляным работам — до 92%, по приготовлению бетона — до 98%, по укладке бетона — до 93% и по монтажу стальных конструкций — до 86,4%.

Однако большой парк строительных механизмов на строительстве, например, Камской и Нарвской гидроэлектростанций, а также ряда тепловых электростанций не используется полностью. За счет лучшего использования парка машин и механизмов можно было бы поднять уровень механизации, ускорить работы и снизить стоимость строительства.

Одной из главных задач текущего пятилетнего плана является завершение механизации тяжелых и трудоемких работ в промышленности и строительстве. Выполнение этой важной задачи потребует создания сотен новых типов электрифицированных машин для механизации трудоемких операций и тяжелых работ. Для успешного выполнения таких гигантских по своим масштабам сооружений, как, например, волжские гидроэлектростанции, будут созданы более мощные экскаваторы и земснаряды. Советские конструкторы закончили разработку конструкции шагающего экскаватора с ковшом емкостью 20 м³ и длиной стрелы 65 м. Такой экскаватор сможет в течение одной минуты за один поворот стрелы переносить до 35 т земли на расстояние свыше 100 м. Начата работа над проектом еще более мощного шагающего экскаватора с ковшом 35 м³ и стрелой 100 м.

За пятилетие на строительствах намечается увеличить парк экскаваторов примерно в 2,5 раза и других основных машин в 3—4 раза. Перед строителями поставлена серьезная задача — улучшить использование все возрастающего парка машин и механизмов.

В директивах XIX съезда партии указано, что особо важной задачей в машиностроении является полное обеспечение оборудованием электрических станций, в том числе гидравлическими и паровыми турбинами, генераторами, высоковольтной аппаратурой и различными приборами управления. Высокие темпы развития машиностроения как основы нового мощного технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства СССР обеспечивают увеличение продукции машиностроения и металлообработки за пятилетие примерно в 2 раза. Рост производства основного энергооборудования в 1955 г. по сравнению с 1950 г. определен по паровым турбинам в 2,3 раза, по паровым котлам — в 2,7 раза и по гидротурбинам — в 7,8 раза.

За истекшие годы советское энергостроение продвинулось далеко вперед. Создано и освоено производством много новых типов машин и оборудования, являющихся достижением отечественной науки и производства и не имею-

щих себе равных в мировой практике энергостроения. Например, Ленинградский завод им. Сталина создал уникальную мощную паровую турбину в 150 тыс. кВт, а завод «Электромашин» им. Кирова создал генератор для этой турбины. В сжатые сроки ленинградские заводы спроектировали и построили для Цимлянской гидроэлектростанции гидравлическую турбину с повышенным коэффициентом полезного действия и мощный генератор, являющийся гордостью отечественного машиностроения. В настоящее время коллективы ленинградских предприятий работают над созданием гидротурбин и гидрогенераторов для Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций.

О достигнутых нашей промышленностью успехов в развитии энергостроения можно говорить хотя бы по тому, что одной ленинградской промышленностью было выпущено в 1951 г. паровых турбин в 6,4 раза, гидротурбин в 1,8 раз, турбогенераторов в 3,5 раза и дизелей в 5,7 раз больше, чем в 1948 г. Выпуск электрооборудования в 1951 г. по сравнению с 1940 г. увеличился в 3,6 раза.

Высокие темпы нарастания мощностей электрических станций и производства электрической энергии, а также связанное с этим широкое развитие энергостроения вызваны быстрыми растущими потребностями народного хозяйства СССР в электроэнергии. Производство электрической энергии на душу населения в 1951 г. повысило уровень 1940 г. в 2 с лишним раза и продолжает повышаться дальше, являясь одним из важнейших средств повышения производительности труда во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства.

Партия на всех этапах социалистического строительства добилась систематического повышения производительности труда, как важнейшего условия роста и совершенствования социалистического производства. Этим главным образом и объясняются те огромные успехи, которые достигнуты в развитии производства в СССР. За период с 1940 по 1951 г. производительность труда в промышленности выросла на 50%, при этом 70% прироста промышленной продукции за этот период получены за счет роста производительности труда. Производительность труда в строительстве за тот же период выросла на 36%. Быстрый рост производительности труда в СССР является прежде всего результатом широкого внедрения в народное хозяйство новой техники и передовых технологических процессов, результатом механизации и электрификации производства, особ-

механизации трудоемких и тяжелых работ, а также результатом лучшей организации труда, роста общеобразовательного и культурно-образовательного уровня трудящихся и повышения их производственной квалификации.

Важнейшим условием осуществления намеченных в пятом пятилетии темпов роста производства и технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства является дальнейшая электрификация страны. Предусмотренный план роста выработки электроэнергии позволит повысить уровень электрификации промышленности при широком развитии автоматизации производственных процессов и дальнейшем внедрении новых методов электрометаллургии, электроника и электролиза, значительно расширить применение электроэнергии в сельском хозяйстве, провести дальнейшую электрификацию железных дорог и увеличить отпуск электроэнергии для новых нужд населения.

Характерной чертой современного этапа электрификации народного хозяйства является развитие электрической автоматизации технологических процессов производства. Автоматизация производства есть одна из наиболее важных ветвей технического прогресса. К настоящему времени достигнуты некоторые, правда еще первые, успехи в деле электроавтоматизации различных производственных процессов. Создано и работает автоматических станочных линий для производства деталей автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин и других изделий. Создан и работает автоматический завод по производству поршней для автомобильных двигателей, в котором все процессы, начиная от подачи сырья в электропечи и кончая упаковкой готовой продукции, полностью автоматизированы. Завод обслуживается всего несколькими рабочими. Себестоимость поршней, выпускаемых автоматическим заводом, значительно ниже себестоимости поршней, изготовляемых при обычной технологии. Производительность труда на этом заводе увеличилась более чем в 5 раз по сравнению с ручным автоматизированным производством. Такие успехи являются прообразом техники будущего коммунистического общества. Наиболее широкое применение получила электроавтоматизация в металлургическом производстве. Почти полностью автоматизировано управление тепловым процессом в доменных, мартеновских и электропечах. Это позволило металлургам серьезно улучшить коэффициент использования полезного объема доменных печей и увеличить съем стали с квадратного метра пода мартеновских и электропечей.

В результате автоматизации резко повысились скорости прокатки и производительность многих прокатных станков.

За последние годы проведена большая работа по оснащению новой техникой и автоматизацией предприятий легкой промышленности. Например, на текстильных фабриках Ивановской области только за 1951—1952 гг. пущено в эксплуатацию 1750 новых электрифицированных ткацких станков, прядильных и других машин, более 1700 различных приспособлений, главным образом по автоматизации оборудования. Замена на текстильных фабриках старых механических станков на автоматические повышает производительность труда ткачей в 1,5—2 раза.

Наша хлебопекарная промышленность в широких масштабах внедряет механизацию в электроавтоматизацию производства; основные процессы производства механизированы и автоматизированы на 78—98%, а к концу текущей пятилетки эта работа будет полностью завершена.

На железнодорожном транспорте внедрение автоматических устройств способствовало росту пропускной способности железных дорог и одновременно значительно повысило безопасность движения поездов.

За последние годы на тепловых и гидравлических электростанциях все более широко применяется высшее достижение новой техники — автоматика и телемеханика. Автоматы и механизмы, применяемые на электростанциях, полностью освобождают эксплуатационный персонал от физического труда. В данное время 91% всех гидроэлектростанций Министерства электростанций полностью автоматизирован и обслуживающий персонал не производит физической работы по пуску, остановке и регулированию гидроагрегатов. На гидроэлектростанциях внедряется также телеуправление, которое позволяет проводить работу гидроагрегатов вообще без обслуживающего персонала. Так, например, сейчас 7 гидроэлектростанций работают без обычного дежурного персонала, на замке, и управляются с диспетчерского пункта за десятки километров.

На тепловых электростанциях, как известно, наиболее тяжелым трудом был труд кочегара. Теперь 61% мощности котлов оборудован автоматами, которые производят подачу топлива в топку и воды в котлы и регулируют нагрузку котельного агрегата. На этих котельных агрегатах нет кочегара, его заменил машинист котла, обладающий необходимыми техническими знаниями. Автоматизация гидроэлектростанций и котлов позволила сократить количество обслуживающего

персонала и тем самым резко поднять производительность труда.

Благодаря внедрению новой техники и автоматизации на наших электростанциях наряду с ростом мощностей произошли и серьезные качественные изменения.

Важнейшим техническим достижением на тепловых электростанциях является применение пара высокого давления и высокой температуры, что дает возможность сократить удельный расход топлива на 12%. Мощность электростанций высокого давления сейчас составляет уже 27,2% от всей мощности тепловых электростанций и превышает довоенный уровень в 18 раз. На электростанциях среднего давления ведется работа по борьбе с непроизводительными потерями в сжигании топлива. Многие передовые электростанции вскрывают резервы экономии топлива и добиваются в этом деле больших успехов. Например, Каширская грэс расходовала в 1940 г. на каждый киловаттчас выработанной электроэнергии 523 г условного топлива. Благодаря осуществлению ряда рационализаторских мероприятий, улучшению работы оборудования удельный расход топлива в 1951 г. снижен до 494 г. Таких же успехов в снижении расхода топлива добился и ряд других электростанций: Средне-Уральская, Красногорская, Челябинская, Сталинская и Фрунзенская. В результате внедрения новой техники и улучшения работы электрооборудования в 1951 г. электростанции системы МЭС сэкономили стране по сравнению с 1940 г. свыше 4 млн. т условного топлива. За 8 мес. 1952 г. эти электростанции сэкономили против установленного плана около 300 тыс. т условного топлива. Экономия могла бы быть еще большей, если бы все электростанции и энергосистемы работали хорошо. Однако некоторые электростанции Ленинграда, Донбасса и Новосибирска не добились еще экономичной работы и пережигают топливо.

Директивы съезда партии подчеркивают всю важность дальнейшего развития и внедрения автоматизации во все отрасли народного хозяйства. Должна быть усилена работа по автоматизации металлургических агрегатов, процессов производства по комплексному извлечению металлов из руд и производства металлов высших марок. На машиностроительных заводах необходимо иметь больше автоматических линий и смелее идти по пути создания полностью электрифицированных автоматических заводов для производства таких массовых изделий, как, например, шарикоподшипники, детали автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин. Намечено осуществить

в текущем пятилетии широкое применение автоматизации производственных процессов на тепловых электростанциях и завершить полную автоматизацию районных гидроэлектростанций, а также приступить к внедрению телемеханизации в энергетических системах.

Машиностроители должны значительно увеличить выпуск машин и оборудования с автоматическим, полуавтоматическим и дистанционным управлением. Для решения задачи автоматизации производства необходимо резко увеличить выпуск высококачественных приборов и устройств автоматического контроля и управления, приборов электроники и телемеханики. За пятилетие намечено увеличить производство приборов управления и контроля, автоматизации и телемеханики примерно в 2,7 раза.

Электрификация железнодорожного транспорта продолжает интенсивно развиваться. Электрифицированы многие участки железных дорог. В 1951 г. грузооборот электрифицированных участков увеличился по сравнению с 1949 г. в 2,5 раза. В текущем пятилетии протяженность электрифицированных железных дорог, введенных в действие, будет увеличена в 4 раза.

Будут закончены в течение текущего пятилетия работы по электрификации всех железнодорожных линий в пригородной зоне Москвы.

В первом квартале 1953 г. полностью завершается сооружение большого кольца метрополитена протяженностью около 20 км. В связи с дальнейшим строительством новой линии метрополитена подвижной состав метро увеличится до 300 вагонов.

Завод «Красное Сормово» им. Жданова в настоящее время изготавливает новейшие типы пассажирских дизельэлектрочудов для Большой Волги, которые по размерам и комфортабельности имеют себе равных в речном флоте.

В пятой пятилетке будет расширено применение электрической энергии в сельском хозяйстве.

Благодаря большому вниманию и повседневной помощи со стороны партии и лично товарища Сталина электрификация сельского хозяйства в нашей стране получила исключительно широкое развитие.

К началу 1951 г. мощность сельских электростанций возросла почти в 3 раза по сравнению с 1940 г. В настоящее время электрифицированы десятки тысяч колхозов. Сотни сельских районов стали районами сплошной электрификации. В этих районах электрифицированы все колхозы, совхозы и машинно-тракторные станции. Целью области Советского Союза в ближайшее время

т областями сплошной электрификации сельского хозяйства.

Электрическая энергия широко используется в сельском хозяйстве — на молотье, очистке и сортировке зерна, орошении; в животноводстве — на кормлении, водоснабжении, дойке коров, уходе за овцами; в подсобных колхозных работах — в мельницах, лесопилках, маслобойках, кузницах, ремонтных мастерских и т. п. Число электродвигателей, работавших в сельском хозяйстве в 1950 г., составляло более 75 000 на общую мощность в 400 000 квт. Об экономическом эффекте, который дает применение электродвигателей в колхозном производстве, можно судить хотя бы потому, что каждая тысяча киловатт-часов электрической энергии, израсходованная электродвигателями, экономит колхозу труд 350 человеко-дней и живое животное 100 коне-дней.

Еще более величественные перспективы открываются перед сельской электрификацией после вступления в строй крупнейших гидроэлектрических станций и оросительных систем на Волге, на Дону, Днепре и Аму-Дарье и в связи с вводом в действие Волго-Донского судоходного канала имени В. И. Ленина. Сооружение этих станций и оросительных систем обеспечит орошение новых земель на площади свыше 6 млн. га, обводнение 15 млн. га и откроет широкие возможности электрификации сельскохозяйственного производства, внедрения электропахоты, применения электрокомбайнов и других сельскохозяйственных машин электроприводом. Вступающая в строй в текущем пятилетии Куйбышевская гидроэлектростанция будет отпускать только для орошения и электрификации земледелия Заволжья 1,5 млрд. квтч электрической энергии в год, что в 3,5 раза больше годового потребления электрической энергии в сельском хозяйстве СССР в 1940 г.

В районах широкой электрификации существующие машинно-тракторные станции будут постепенно преобразовываться в новый тип государственных предприятий — электромашино-тракторные станции, энергетическая база которых будет преимущественно электрической. Первые электромашино-тракторные станции создаются уже в текущем году в Ростовской области на базе электрической Цимлянской гидроэлектростанции.

В текущем году закончены всесторонние испытания новой, более совершенной, конструкции электрического трактора на гусеничном ходу, предназначенного для работы в орошаемом земледелии в районах великих строек коммунизма.

Первая опытная партия в 30 электротракторов, выпущенная в 1949 г., обработала за 3 года на полях колхозов Московской, Свердловской и Киевской областей свыше 60 тыс. га в переводе на мягкую пахоту и при этом электрические тракторы охватили широкий круг полевых работ, включая такие работы, как: пахота, посев, культивация, лушение, боронование и т. п.

Наиболее ощутимый народнохозяйственный эффект от применения электротракторов заключается в том, что электротрактор, расходуя на обработку 1 га пашни 45 квтч электрической энергии, тем самым сохраняет стране 18 кг жидкого топлива на каждом гектаре.

Наряду с использованием для электрификации сельского хозяйства электрической энергии от крупных гидроэлектростанций новый пятилетний план предусматривает дальнейшее строительство колхозных электростанций. Рост числа и мощности сельских электростанций небольшой мощности будет происходить на новой качественной основе. В районах крупных оросительных систем должны будут получить широкое развитие колхозные гидроэлектростанции, использующие перепады оросительных каналов.

В районах с богатыми местными топливными ресурсами распространенным типом колхозной электростанции является колхозная паросиловая установка небольшой мощности, предназначенная для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии.

Ветроэнергетические ресурсы также ставятся в настоящее время на службу электрификации сельского хозяйства. Создание отечественной конструкции быстроходного ветродвигателя с диаметром ветроколеса 18 м и устойчивым поддержанием постоянной скорости вращения и оригинальное техническое решение вопроса о параллельной работе ветроэлектростанции, имеющей синхронный генератор, с другой электростанцией теплового или гидравлического типа, данное советскими учеными, открывают возможности включения ветроэлектростанций в местные сельские энергетические системы для дополнительной выработки электрической энергии. Дальнейшим шагом в использовании ветроэнергии для целей сельской электрификации является создание кустов ветроэлектростанций, работающих параллельно между собой и с тепловыми или гидравлическими электростанциями.

В борьбе за дальнейший технический прогресс большая роль принадлежит нашей науке, которая своими открытиями помогает советскому народу полнее раскрывать и лучше использовать богат-

ства и силы природы. В послевоенный период наши ученые успешно решили много научных проблем большого народнохозяйственного значения. Важнейшим достижением советской науки за этот период, как заявил об этом в отчетном докладе секретарь Центрального Комитета партии т. Г. М. Маленков, «является открытие методов производства атомной энергии. Тем самым наша наука и техника ликвидировали монопольное положение США в этой области и нанесли серьезный удар поджигателям войны, пытавшимся использовать секрет производства атомной энергии и обладание атомным оружием, как средство шантажа и запугивания других народов. Располагая реальными возможностями производства атомной энергии, Советское государство глубоко заинтересовано в том, чтобы этот новый вид энергии использовался в мирных целях, на благо народа, ибо такое использование атомной энергии безгранично расширяет власть человека над стихийными силами природы, открывает перед человечеством колоссальные возможности роста производительных сил, технического и культурного прогресса, увеличения общественного богатства».

О крупных успехах советской науки и техники свидетельствует ежегодное присуждение Сталинских премий за выдающиеся научные труды, изобретения и коренные усовершенствования методов производственной работы. Почетного звания лауреата Сталинской премии удостоены 8 470 работников науки, промышленности, транспорта и сельского хозяйства.

Перед развивающейся передовой советской наукой поставлена задача занять первое место в мировой науке. Усилия наших ученых должны быть направлены на более быстрое решение научных проблем использования громадных природных ресурсов Советской страны. Творческое содружество науки с производством, давшее исключительно плодотворные результаты, необходимо всемерно развивать, имея в виду, что это содружество обогащает науку опытом практики, а практическим работникам помогает быстрее решать стоящие перед ними важные задачи.

Советские энергетики, вдохновленные историческими решениями XIX съезда партии, отдадут все свои силы на успешное осуществление величественной программы развития электрификации СССР.

35-ю годовщину Великой Октябрьской социалистической революции наша могучая Родина встречает в расцвете своих сил. У нас имеется все необходимое для построения полного коммунистического общества. Природные богатства Советской страны неисчерпаемы. Наше государство доказало свою способность использовать эти огромные богатства на пользу трудящихся. В главе народов Советского Союза стоит испытанная и закаленная в боях партия, неуклонно проводящая ленинско-сталинскую политику.

Под руководством Коммунистической партии Советского Союза, под мудрым водительством любимого вождя и учителя товарища Сталина советский народ уверенно идет вперед к торжеству коммунизма.

Трудящиеся Советского Союза! Развертывайте всенародное социалистическое соревнование за выполнение и перевыполнение пятого пятилетнего плана! Боритесь за новый мощный подъем народного хозяйства, рост материального благосостояния и культуры народа, за дальнейшее укрепление могущества Советского государства!

(Из призывов ЦК КПСС к 35-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции)

Работники научных учреждений и высшей школы! Всемерно развивайте научно-исследовательскую работу! Смелее разворачивайте творческую критику и самокритику в научной работе! Укрепляйте связь науки с производством, улучшайте и расширяйте подготовку специалистов для народного хозяйства и культуры!

(Из призывов ЦК КПСС к 35-й годовщине Великой Октябрьской социалистической революции).

О схемах электроснабжения высотных зданий

Инж. Э. С. ИОХВИДОВ, инж. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ

Мосэнерго

Сооружаемые в Москве здания высотой 20—36 этажей проектировались различными организациями. Поэтому их схемы электроснабжения решены неодинаково. Ввиду того, что в дальнейшем будут сооружаться такие здания не только в Москве, но и в других городах Советского Союза, представляет несомненный интерес проанализировать принятые схемы электроснабжения высотных зданий.

Потребители высотного здания. В зависимости от назначения и объема высотных зданий характер и величина их электрических нагрузок различны. Электрические нагрузки сооружаемых зданий колеблются в пределах от 1,5 до 15 тыс. квт.

Транспортировка людей и грузов в высотном здании осуществляется исключительно при помощи лифтов. Лестницы имеют только вспомогательное назначение. Давление, которое имеет место в сети городского водопровода, не может обеспечить подъем воды в верхние этажи высотных зданий. Поэтому пожарное и хозяйственное водоснабжение, а также теплоснабжение высотного здания осуществляется с помощью многоступенчатых насосов. Из этих двух особенностей, характерных для всех высотных зданий независимо от их назначения, следует, что по степени надежности электроснабжения эти здания должны быть отнесены к потребителям первой категории.

Требования к системе электроснабжения высотных зданий. Этот правильный вывод, к которому пришли все организации, проектировавшие высотные здания, был положен в основу конкретных технических требований к системе электроснабжения высотных зданий. Эти требования следующие.

1. Система электроснабжения должна быть построена так, чтобы при повреждении любого элемента схемы (линии, трансформатора, сборных шин, коммутационных аппаратов и т. д.) не прекращалась работа ответственных установок. Схема электроснабжения должна предусматривать резервирование на случай повреждения любого элемента.

2. Электроснабжение высотного здания должно осуществляться не менее чем от двух независимых источников (тэц или районных подстанций энергосистемы) и не менее чем по трем самостоятельным линиям. Схема при нормальном режиме должна обеспечивать резервное питание для всех

Рассмотрены требования, предъявляемые к системе электроснабжения высотных зданий, и принятые схемы электроснабжения. Приведен анализ схем. Указаны пути совершенствования схем электроснабжения высотных зданий. Статья печатается в порядке обсуждения.

ответственных установок (желательно всех установок здания) от двух источников. Схема присоединения линий должна быть такой, чтобы при

выводе в ремонт одной из линий сохранялось резервирование всех подстанций здания.

3. Система электроснабжения должна обеспечивать необходимую надежность и в ремонтном режиме. Схемы присоединения ответственных установок должны быть такими, чтобы вывод в ремонт отдельных элементов схемы (линий, трансформаторов, секций шин и т. п.) не нарушал взаимного резервирования установок. Это означает, что две взаимнорезервирующие друг друга установки (насосы, лифты и др.) должны быть присоединены к разным шинам (сборкам), имеющим двойное питание, или каждая из установок должна иметь двойное питание от разных шин.

4. Питание мощных силовых установок, создающих резкие колебания напряжения, должно осуществляться от отдельных трансформаторов.

5. Система резервирования питания установок должна быть автоматизирована. Этим достигается полная бесперебойность работы установок и максимальное сокращение обслуживающего персонала. Перечисленные требования предопределяют применение для высотных зданий специальных схем электроснабжения, аналогичных схемам электроснабжения ответственных промышленных установок.

Ввиду большой величины электрической нагрузки высотного здания и значительной ее плотности, а также разбросанности силовых установок по различным частям и этажам целесообразно устройство глубоких вводов высокого напряжения (6 или 10 кв) в различные зоны здания. В связи с этим в каждом высотном здании должно иметься значительное число понизительных трансформаторных подстанций (от трех до нескольких десятков), размещенных в разных частях здания и на разных этажах, и развитая внутренняя распределительная сеть высокого напряжения, проложенная специальными кабелями в шахтах и каналах.

В целях пожаробезопасности на трансформаторных подстанциях устанавливаются безмасляные, сухие трансформаторы мощностью 180, 320 и 560 квт.

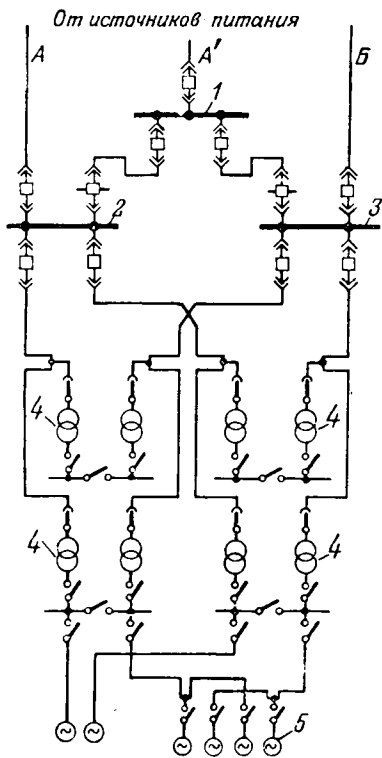


Рис. 1. Глубоко секционированная схема электроснабжения высотного здания от двух источников питания.

1—переключательный пункт; 2—центральный распределительный пункт А; 3—центральный распределительный пункт Б; 4—трансформаторные подстанции здания; 5—двигатели ответственных установок.

Примененные схемы электроснабжения высотных зданий и их сравнение. На рис. 1—5 показаны принципиальные схемы электроснабжения, примененные для различных высотных зданий.

Электроснабжение здания № 1 (рис. 1) осуществляется от двух центральных распределительных пунктов (црп), каждый из которых питается по одной линии от разных внешних источников.

Кроме этого имеется отдельный переключательный пункт, к которому подведена третья линия от другого высотного здания или от надежно питающегося распределительного пункта городской электросети. Переключательный пункт связан с обоими црп таким образом, что резервная (третья) линия может быть включена на шины любого црп. Так осуществляется резервирование центральных распределительных пунктов.

Наличие переключательного пункта придает схеме электроснабжения необходимую маневренность и гибкость.

От шин црп внутрь здания отходят радиальные распределительные линии высокого напряжения, питающиеся от одного до трех трансформаторов разных понизительных подстанций (комплектных). Максимальная защита такой радиальной цепочки при коротком замыкании на любом ее отрезке или в трансформаторе действует на выключение выключателя в црп.

На понизительных подстанциях установлены два трансформатора одинаковой мощности. Каждый из них нормально питает свою секцию шин низкого напряжения. Включение трансформаторов со стороны низкого напряжения и соединение между собой секций шин автоматизированы.

При исчезновении напряжения на выводах низкого напряжения трансформатора последний

выключается автоматом. Напряжение на отключенную секцию подается от другой секции включением межсекционного автомата. При явлении напряжения на выводах трансформатора схема автоматически приводится к первоначальному виду. При коротком замыкании на шине секции трансформатор автоматически выключается, но межсекционный автомат при этом не выключается. Таким образом, при отключении радиальной распределительной линии высокого напряжения во всех трансформаторных подстанциях, питающихся от этой линии, происходит автоматическое переключение обесточенной секции низкого напряжения на другую секцию.

Каждый из трансформаторов подстанции может быть загружен при нормальном режиме в среднем на 65% своей номинальной мощности. От секций шин понизительных трансформаторов подстанций отходят радиальные линии низкого напряжения, которые питают либо один двигатель, например пожарного насоса, либо два двигателя различных нерезервирующих друг друга установок.

Путем глубокого секционирования схемы напряжение от двух разных источников доводится до двух взаиморезервирующих одна другую установок. Электроснабжение установок автоматически резервируется на шинах низкого напряжения понизительной трансформаторной подстанции и дополнительно на шинах црп.

Схема электроснабжения высотных зданий № 2 и 3, близко расположенных друг от друга, показана на рис. 2. Схема внутренней сети обоих зданий аналогична схеме рис. 1.

Сущность схемы рис. 2 заключается в том, что две мощные линии питают от двух разных источников по два принадлежащих разным зданиям црп. Линии оборудованы избирательно действующей максимальной защитой. Кроме того, здания имеют по одному переключательному пункту. В каждый из этих пунктов от разных источников заведены резервные линии.

В отличие от схемы рис. 1 в схеме рис. 2 при повреждении или выводе в ремонт линии Б электроснабжение каждого здания осуществляется от двух разных источников. Таким образом, объединение в одной схеме питания двух зданий способствует повышению надежности электроснабжения.

Схема электроснабжения высотного здания № 4 изображена на рис. 3. В этой схеме каждый црп питается по одной линии от одного и того же источника. Оба црп связаны между собой перемычкой. Питающие линии, таким образом, работают параллельно. На их приемных концах установлена мгновенно действующая максимальная защита.

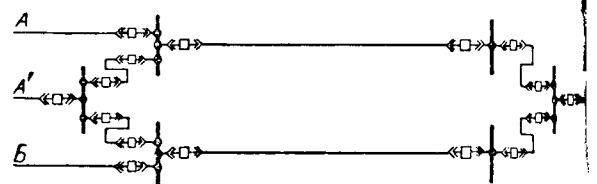


Рис. 2. Секционированная схема электроснабжения двух высотных зданий от двух источников питания.

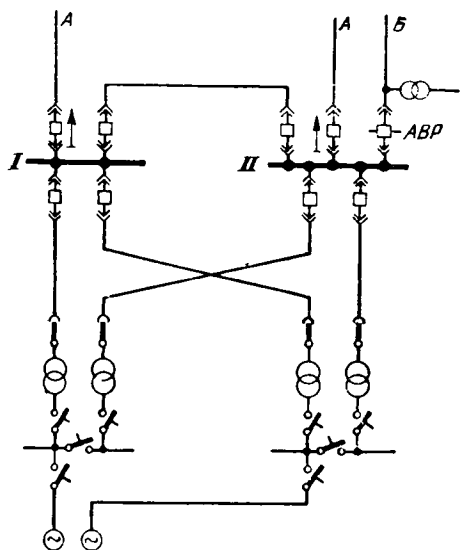


Рис. 3. Схема электроснабжения высотного здания от одного внешнего источника с автоматическим резервированием на высоком напряжении от другого источника.

направленная защита. Резервное питание осуществлено с помощью третьей питающей линии, которая связывает распределительный пункт городской электросети, питающийся от другого источника, с шинами црп II.

При повреждении одной из питающих линий и мгновенно отключается, и питание црп осуществляется по перемычке. При выходе из рабочего основного источника питания исчезает напряжение на шинах обоих црп, обе питающие линии переключаются, автоматически включается резервная питающая линия и на црп подается напряжение. Вслед за этим автоматика включения резерва на стороне низкого напряжения всех понизительных подстанций приходит в действие и обеспечивает восстановление питания всех потребителей здания. После ввода в работу основного источника питания напряжение на шинах црп I подается в результате производимых переключений, после чего автоматически восстанавливается нормальная схема питания и понизительных трансформаторных подстанций.

Отказ от присоединения резервной питающей линии к специальному переключательному пункту несколько снижает надежность схемы.

При выводе в ремонт црп II или повреждении црп здание некоторое время питается только по одной линии. Такое понижение надежности схемы было допущено вследствие того, что в црп применены комплектные распределительные устройства с выжными камерами. Благодаря этому короткое замыкание на шинах црп мало вероятно, а ремонтные работы могут производиться без отключения црп.

Внутренняя схема здания остается такой же, как на рис. 1, с той лишь особенностью, что питание каждого трансформатора осуществляется самостоятельной линией. Такую схему целесо-

образно применять при небольшом числе трансформаторных подстанций в здании и при таком их расположении, при котором питание двух-трех трансформаторов по одной линии невыгодно.

На рис. 4 показана схема питания двух высотных зданий № 5 и 6. Каждое здание имеет два црп, первый из которых питается от источника по отдельной линии, а второй — от первого црп соседнего здания по перемычке. Кроме црп каждое здание имеет переключательный пункт, на который заведена резервная линия от другого источника.

Питающие линии и перемычки работают по разомкнутой схеме и снабжены максимальной защитой. На нормально отключенных связях между црп и переключательными пунктами установлены автоматы включения резерва. Внутренняя схема здания аналогична схеме рис. 1. Как видно из сказанного, схема рис. 4 отличается от схемы рис. 2 только тем, что обе питающие линии приходят от одного и того же источника.

При исчезновении напряжения на шинах одного из црп срабатывает автоматика со стороны низкого напряжения всех трансформаторных подстанций здания. Вслед за этим действует автоматика в обесточенном црп, в результате чего на шины последнего подается напряжение со стороны переключательного пункта. После этого автоматически восстанавливается нормальная схема со стороны низкого напряжения всех трансформаторных подстанций.

На рис. 5 изображена схема электроснабжения большого высотного здания. Каждый из двух црп здания разделен на две секции выключателем, который нормально выключен. Каждая секция питается по самостоятельной линии. Распределительный пункт А питается от одного центра (А), распределительный пункт Б — от другого (Б).

Питание трансформаторных подстанций здания осуществляется посредством встречных радиальных линий таким образом, что при исчезновении напряжения на шинах секции одного црп ее нагрузка равномерно распределяется между секциями другого црп.

На первый взгляд может показаться, что было бы целесообразно питать секции одного и того же црп от разных источников. В действительности же это не так.

При способе резервирования, принятом в схеме рис. 5, нормальная нагрузка секции может быть равна $\frac{2}{3}$ допустимой длительной нагрузки питающей ее линии. Если же принять, что одна

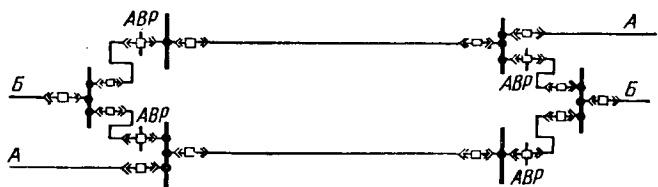


Рис. 4. Схема электроснабжения двух высотных зданий от одного источника с автоматическим резервированием на высоком напряжении от другого источника.

секция данного црп резервирует другую секцию того же црп, то нагрузка секции в нормальном режиме должна быть равна половине пропускной способности питающей линии. Следовательно, в последнем случае число линий, питающих здание, должно быть увеличено. Кроме того, при схеме рис. 5 в случае выхода из строя одного из источников питания вся нагрузка здания будет переключена на другой источник и линии, питающие один црп, при максимальной нагрузке окажутся кратковременно перегруженными на 30%.

Эта перегрузка может быть быстро снята дежурным персоналом путем отключения второстепенных нагрузок. Однако в большую часть дней года и часов суток нагрузка здания бывает меньше максимальной и, следовательно, питающие линии перегружены не будут.

При питании секций одного и того же црп от разных источников осуществить резервирование секций, принятое в схеме рис. 5, будет невозможно, так как в этом случае половина потребителей здания была бы лишена резервирования от разных источников. Питание же половины трансформаторных подстанций здания посредством параллельных линий от разных секций одного црп нельзя считать достаточно надежным, так как не исключены случаи полного обесточения шин обеих секций данного црп.

В схеме рис. 5 питающие линии, состоящие из двух параллельных кабелей, присоединены к шинам црп через два выключателя. Это сделано потому, что црп оборудованы комплектами распределительными устройствами, конструкция которых не предусматривает присоединения каждого кабеля двоякой линии через отдельные разъединители. Наличие двух выключателей на приемном конце каждой линии позволяет осуществить схему питания црп, показанную на рис. 6. В этом случае

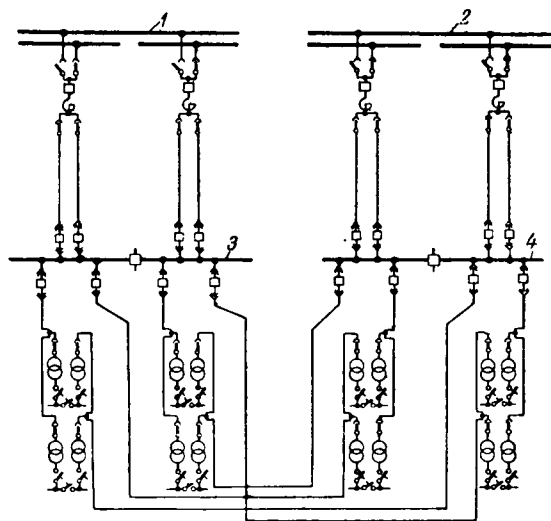


Рис. 5. Схема электроснабжения высотного здания от двух внешних источников. Каждая секция одного црп резервируется двумя секциями другого црп.

1—источник питания А; 2—источник питания Б; 3—центральный распределительный пункт А; 4—центральный распределительный пункт Б.

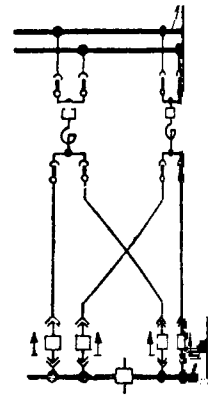


Рис. 6. Вариант схемы электроснабжения высотного здания посредством расщепленных линий с максимально-направленной защитой.

1 — источник питания; 2 — центральный распределительный пункт.

на приемном конце устанавливается максимально-направленная защита. Однако, схема рис. 6 имеет тот недостаток, что обе спаренные линии каждого црп питаются от одной и той же секции распределительного устройства питающего центра.

В результате рассмотрения принятых схем можно заключить, что определились две принципиально различные схемы надежного электроснабжения высотных зданий:

а) При нормальном режиме здание питается одновременно от двух разных источников. Схема глубоко секционирована вплоть до отдельных агрегатов.

б) При нормальном режиме здание питается только от одного источника. Второй (резервный) источник включается только при аварийном режиме.

В последнем случае возможно создание внутри здания замкнутых схем резервирования на высоко или низком напряжении. Однако следует заметить, что эта возможность не была использована при проектировании высотных зданий.

Электроснабжение здания от одного источника наряду с автоматикой со стороны низкого напряжения требует устройства автоматического включения резерва и со стороны высокого напряжения. Но наличие автоматики с той и с другой стороны может приводить к неполадкам и авариям, так как ее действие в этом случае трудно согласуется.

Схема электроснабжения от двух источников имеет тот недостаток, что требует строго симметричной внутренней схемы здания. Всякое отклонение от симметрии (например, присоединение к шинам какого-либо црп сосредоточенной нагрузки) уменьшает возможность взаимного резервирования по линиям. Но несмотря на это, схема электроснабжения от двух источников проще надежнее.

Применение схем электроснабжения от одного источника может быть оправдано только особыми местными условиями. Например, при малой нагрузке для питания здания достаточно одной линии и резервирование целесообразно осуществлять от соседних зданий или от ближайшего распределительного пункта городской электросети. На большее же применение должны найти глубоко секционированные схемы с одновременным питанием здания от двух источников.

Схемы внутренней сети высотных зданий. Приемы схемы внутренней электросети зданий описаны. Это означает, что различные проектные организации пришли к одной принципиальной схеме, которая, по видимому, является наиболее надежной и может быть рекомендована для повсеместного применения. Сущность схемы заключается в том, что трансформаторы двухтрансформаторных подстанций питаются по радиальной схеме.

Автоматическое включение резерва осуществлено в каждой подстанции со стороны низкого напряжения. Сеть низкого напряжения выполнена по простейшей радиальной схеме. Устройство автоматического резервирования трансформаторных подстанций со стороны высокого напряжения значительно удорожило бы сеть, понизило бы ее надежность вследствие увеличения количества аппаратуры и осложнило бы автоматизацию резервирования. Поэтому для высотных зданий наиболее приемлема система резервирования трансформаторных подстанций на низком напряжении как наиболее простая и надежная.

Применять в высотных зданиях трансформаторные подстанции с числом трансформаторов больше двух явно невыгодно, так как это резко увеличило бы протяженность и усложнило бы внутреннюю распределительную сеть высокого напряжения, а также значительно усложнило бы устройство автоматического резервирования со стороны низкого напряжения при незначительной номинальной установленной мощности трансформаторов.

В высотных зданиях возможно устройство двухтрансформаторных подстанций с взаимным резервированием по линиям низкого напряжения. В этом случае для осветительных нагрузок было возможно применить замкнутую сеть низкого напряжения типа «сетки», а сосредоточенные силовые нагрузки питать от разных подстанций по линиям низкого напряжения. Однако создание замкнутой сети низкого напряжения в высотных зданиях препятствует ряд обстоятельств. Во избежание протекания через замкнутую сеть больших транзитных токов ее следует питать от одного источника. Но, как указывалось выше, такая схема электроснабжения высотных зданий в большинстве случаев неприемлема. Кроме того, в условиях территориального размещения трансформаторных подстанций питание силовых и осветительных нагрузок высотного здания часто осуществляется от одних и тех же подстанций.

На первый взгляд может показаться, что при дублировании схем последнее обстоятельство не может препятствовать устройству замкнутой схемы, если от одного трансформатора двухтрансформаторной подстанции будет питаться только силовая, а от другой — только осветительная нагрузка. Но в этом случае для разделения осветительных и силовых нагрузок при аварийном режиме пришлось бы взаимное резервирование трансформаторов, расположенных на одной подстанции, заменить взаимным резервированием трансформаторов, расположенных на разных под-

станциях, для чего потребовалось бы проложить дополнительные линии низкого напряжения.

Питание части сети, устроенной по замкнутой схеме, от одного из двух црп нецелесообразно ввиду того, что такая схема снижает общую надежность электроснабжения здания из-за возможного выхода из строя црп. В зданиях очень большого объема, электроснабжение которых осуществляется большим количеством питающих линий и которые имеют не два, а большее количество црп, возможно питать осветительную сеть, устроенную по замкнутой схеме, от двух црп, которые, в свою очередь, питаются от одного и того же источника. Однако в строящихся зданиях такой возможности пока не встретилось.

При однострановых трансформаторных подстанциях каждый ответственный токоприемник должен питаться двумя линиями низкого напряжения от разных подстанций. В высотных зданиях таким образом осуществляется питание лишь немногочисленных спецустановок (телефонная станция, радиоузел, освещение отдельных помещений). Для питания других ответственных силовых установок такой способ невыгоден.

Ответственные установки высотных зданий (лифты, насосы) резервируются. Например, устанавливается по два насоса одного и того же назначения, в одной общей шахте движутся кабины двух или трех лифтов, благодаря чему обеспечивается возможность эвакуации пассажиров из лифта в лифт через боковые двери. При таком резервировании важно, чтобы двигатели взаимно резервирующих друг друга установок питались от разных подстанций. Резервирование же питания каждого двигателя по линиям низкого напряжения бессмысленно, так как линия, проложенная проводом с резиновой изоляцией в стальных трубках, намного надежнее питаемого от нее агрегата (лифта, насоса). Поэтому целесообразно осуществлять взаимное резервирование трансформаторов, установленных на одной подстанции.

Таким образом, из всего изложенного вытекает, что в высотных зданиях для питания силовых и осветительных нагрузок целесообразно устройство двухтрансформаторных подстанций. Это обеспечивает высокую надежность работы всех установок здания. Что же касается радиальной распределительной сети низкого напряжения, то она в высотных зданиях в конструктивном отношении устроена настолько надежно, что ее повреждения практически исключены.

Выводы. Примененные для строящихся высотных зданий схемы обеспечивают высокую надежность электроснабжения. В то же время эти схемы просты и рациональны. Они должны применяться и в высотных зданиях, которые будут строиться в будущем. При этом предпочтение следует отдать глубоко секционированным схемам с питанием здания при нормальном режиме от двух источников.

Схемы с питанием от одного источника могут найти применение только для электроснабжения высотных зданий с небольшой электрической нагрузкой.

Анализ осуществляемых схем электроснабжения высотных зданий показывает следующие направления их усовершенствования:

1. По примеру городских двухлучевых сетей без распределительных пунктов в схемах с глубоким секционированием возможно отказаться от устройства црп.

2. В зданиях большого объема возможно применение местных замкнутых сетей низкого напряжения для питания осветительных нагрузок.

3. Вместо сложной автоматики включения резерва со стороны низкого напряжения, дейст-

вующей на постоянном оперативном токе, должна применяться простейшая контакторная автоматика, высокая надежность которой проявилась в Московской кабельной сети.

4. Должна быть исследована возможность использования в качестве нулевого провода распределительных сетей низкого напряжения стального сварного каркаса здания, электрическое сопротивление которого крайне невелико. Это может дать существенную экономию проводного материала.



Трехфазный последовательный коллекторный генератор как отрицательное сопротивление

Кандидат техн. наук, доц. А. И. ВАЖНОВ, инж. Э. С. МКРТЧЯН

Ленинградский политехнический институт имени Калинина

Для изучения переходных процессов в мощных энергетических системах может быть использован метод физического моделирования, когда исследуемое явление непосредственно изучается на модели, составленной из агрегатов небольшой габаритной мощности. Имеется уже достаточно большой опыт в проектировании и использовании электродинамических моделей, накопленный в результате работ по моделированию, проведенных, в основном, в МЭИ имени Молотова и ЛПИ имени Калинина.

Наибольшие затруднения при моделировании связаны, как известно, с получением в модели малых относительных активных сопротивлений цепей синхронных генераторов, соответствующих значениям, встречающимся у генераторов крупной мощности. Эти затруднения в настоящее время преодолеваются в результате применения специальных синхронных генераторов-моделей, а также специальных коллекторных генераторов с последовательным возбуждением, играющих роль отрицательного активного сопротивления. Когда синхронные генераторы-модели имеют небольшую габаритную мощность, приходится включать коллекторные машины как в цепь возбуждения, так и в цепь статора синхронного генератора. Следует отметить, что ряд исследований на электродинамической модели потребует моделирования активного сопротивления обратной последовательности, что не может быть обеспечено

Рассматривается работа трехфазного последовательного коллекторного генератора в качестве компенсатора активного сопротивления. Исследована совместная работа коллекторного и синхронного генераторов при трехфазном коротком замыкании. Установлено, что наличие у коллекторного генератора правильно спроектированной компенсационной обмотки позволяет получить компенсацию активного сопротивления без искажения кривых токов короткого замыкания

печено коллекторными генераторами, компенсируемыми активное сопротивление прямой последовательности.

Теоретические и экспериментальные исследования работы последовательного коллекторного

генератора, включаемого в цепь возбуждения синхронного генератора [Л. 1, 2], показали, что специально построенный коллекторный генератор с успехом может быть использован как отрицательное активное сопротивление. Исследование трехфазных последовательных коллекторных генераторов, включаемых в цепь статора синхронного генератора для создания отрицательного активного сопротивления в этой цепи, произведенные в ЛПИ под руководством М. П. Костенко, показали, что при выполнении некоторых условий такие коллекторные генераторы решают задачу компенсации активного сопротивления вполне удовлетворительно. Конструктивное исполнение подобных специальных генераторов описано в [Л. 3]. Оказалось, что трехфазный коллекторный генератор должен удовлетворять не только тем требованиям, которые предъявляются к коллекторному генератору, компенсирующему сопротивление в цепи постоянного тока, и сводящимся к наличию линейной характеристики холостого хода, ничтожных потерь в стали, малому переходному сопротивлению в щеточном контакте, облегченных условий коммутации и постоянства скорости генератора. Установлено, что тре-

ный коллекторный генератор будет выполнять функции отрицательного активного сопротивления только при наличии у него правильно выполненной компенсационной обмотки, исключающей возможность самовозбуждения генератора переменным током [Л. 4].

В настоящей статье рассматривается несколько подробнее, чем это было сделано до сих пор, вопрос надлежащей компенсации реакции в коллекторном генераторе, а также исследуется совместная работа синхронного генератора и коллекторной машины при трехфазном питании замыканием.

Условия правильной компенсации реакции в коллекторном генераторе могут быть выведены из рассмотрения (в относительных величинах) уравнений напряжений машины (приложение, рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= p x_k i_1 + i_1 r + \frac{x}{\sqrt{3}} (i_2 - i_3), \\ u_2 &= p x_k i_2 + i_2 r + \frac{x}{\sqrt{3}} (i_3 - i_1), \\ u_3 &= p x_k i_3 + i_3 r + \frac{x}{\sqrt{3}} (i_1 - i_2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

в осях α, β :

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha &= p x_k i_\alpha + r i_\alpha + x i_\beta, \\ u_\beta &= p x_k i_\beta + r i_\beta - x i_\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

u_1, u_2, u_3 — фазные напряжения, приложенные к машине;

u_α, u_β — составляющие этих напряжений;

i_1, i_2, i_3 — токи в фазах;

i_α, i_β — составляющие этих токов;

p — оператор дифференцирования по времени;

x_k — индуктивное сопротивление фазы машины (при трехфазном питании обмоток);

$r = R_k - R$;

R_k — суммарное активное сопротивление фазы машины и $R = \frac{V\sqrt{3}}{2} M_{r\beta} \omega$ — активное сопротивление, компенсируемое коллекторной машиной;

$M_{r\beta}$ — взаимоиנדуктивность фазных обмоток возбуждения и ротора при совпадении осей обмоток;

ω — угловая скорость вращения ротора;

$$x = \frac{1}{2} (M_{rr} - \sqrt{3} M_{rk}) \omega = L \omega; \quad (2)$$

M_{rr} и M_{rk} — взаимоиנדуктивности фазных обмоток ротора и фазных обмоток коллекторной машины при совпадении осей соответствующих обмоток.

Уравнения (1) получены без учета коммутационных процессов. Если учесть действие короткозамкнутых секций машины, то нетрудно заметить, что при прямолинейной коммутации

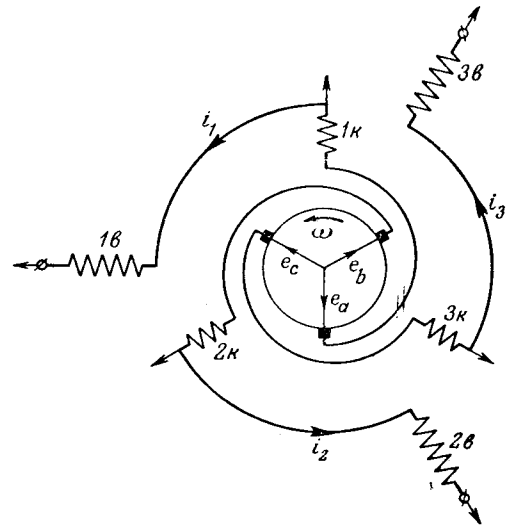


Рис. 1. Схема последовательного коллекторного генератора с двумя обмотками на статоре.

1к, 2к, 3к — компенсационная обмотка; 1в, 2в, 3в — обмотка возбуждения.

уравнения (1) сохраняются и лишь в x и R изменяются коэффициенты при ω .

Из (1) следует, что при $x=0$ трехфазная последовательная коллекторная машина представляет собой некоторое симметричное сопротивление x_k, r , причем машина, включенная в трехфазную цепь, может иметь эквивалентное отрицательное активное сопротивление, если $R > R_k$. Взаимоиנדуктивности M_{rr} и M_{rk} можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} M_{rr} &= \lambda_1 \omega_r^2, \\ M_{rk} &= \lambda_2 \omega_r \omega_k, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где λ_1 и λ_2 — магнитные проводимости;

ω_r и ω_k — действующие (с учетом обмоточных коэффициентов) числа витков фазных обмоток ротора и компенсационной соответственно.

Подставляя (3) в (2) и приравнявая (2) нулю, найдем желаемое соотношение витков ω_r и ω_k :

$$\omega_r = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{3} \omega_k. \quad (4)$$

Практически λ_1 несколько больше λ_2 за счет различной магнитной связи обмоток в лобовых частях. Вследствие невозможности точного предварительного расчета отношения $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, а также добавочного влияния короткозамкнутых секций, необходимо предусмотреть возможность в выполненной машине регулировать ω_k сдвигом щеток. При этом, если условиться считать положительным сдвиг щеток на угол $\beta_{щ}$ из положения нормальной компенсации¹ в направлении

¹ Под нормальной компенсацией понимается компенсация при щетках, сдвинутых на 180° от магнитной оси компенсационной обмотки.

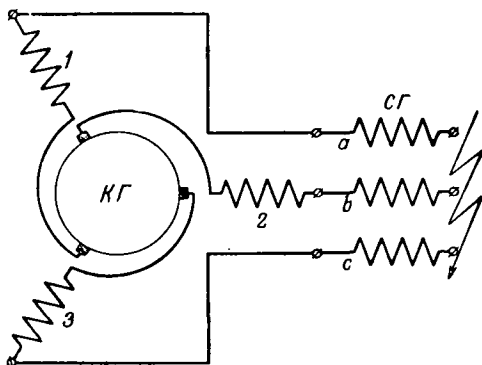


Рис. 2. Схема включения коллекторного генератора для компенсации сопротивления.
КГ—коллекторный генератор; СГ—обмотки статора синхронного генератора.

вращения ротора, то действующие числа витков обмоток возбуждения и компенсационной принимают новые значения:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\beta\beta} &= \omega_{\beta} (\cos \beta_{\omega} - \frac{1}{k_{\beta}} \sin \beta_{\omega}), \\ \omega_{\kappa\beta} &= \omega_{\kappa} (\cos \beta_{\omega} + k_{\beta} \sin \beta_{\omega}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где ω_{β} —действующее число витков обмотки возбуждения, $k_{\beta} = \frac{\omega_{\beta}}{\omega_{\kappa}}$.

Окончательная наладка коллекторного генератора может производиться с помощью осциллографирования токов трехфазного короткого замыкания синхронного генератора, в цепь статора которого включен коллекторный генератор (рис. 2). Определим, в какой степени искажаются токи трехфазного короткого замыкания в схеме рис. 2, если коллекторный генератор обладает конечным x . Будем считать, что синхронный генератор имеет явнополюсное исполнение с одним контуром на роторе (обмотка возбуждения) и обладает свойствами так называемой „идеальной синхронной машины“ [Л. 5]. Короткое замыкание осуществляется при холостом ходе генератора.

При составлении дифференциальных уравнений трехфазного короткого замыкания используем обычную в теории электрических машин систему относительных единиц (единица времени — $\frac{1}{314}$ сек). Согласно рис. 2 составляющие напряжений обеих машин связаны соотношением:

$$\left. \begin{aligned} -u_{\alpha k} &= u_{\alpha s}, \\ -u_{\beta k} &= u_{\beta s}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где индексы k и s обозначают коллекторную и синхронную машины. Уравнения напряжений обмоток статора в осях α , β для синхронной машины имеют вид [Л. 4]:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha s} &= p\Psi_{\alpha s} + R_s i_{\alpha s}, \\ u_{\beta s} &= p\Psi_{\beta s} + R_s i_{\beta s}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где R_s —активное сопротивление обмоток статора $\Psi_{\alpha s}$; $\Psi_{\beta s}$ —потокосцепления для генератора с одной обмоткой на роторе (в относительных единицах):

$$\begin{aligned} \Psi_{\alpha s} &= x_{md} i_r \cos \gamma + \frac{x_d + x_q}{2} i_{\alpha} + \\ &+ \frac{x_d - x_q}{2} (i_{\alpha} \cos 2\gamma + i_{\beta} \sin 2\gamma), \\ \Psi_{\beta s} &= x_{md} i_r \sin \gamma + \frac{x_d + x_q}{2} i_{\beta} + \\ &+ \frac{x_d - x_q}{2} (i_{\alpha} \sin 2\gamma - i_{\beta} \cos 2\gamma), \end{aligned}$$

где i_r —ток возбуждения синхронной машины;

x_{md} —сопротивление взаимной индукции фазной обмотки статора и ротора при спаде их осей;

x_d , x_q —синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям;

γ —угол, составляемый продольной осью полюса с осью фазы α (a). При постоянной скорости вращения генератора $\gamma = \gamma_0 + t$.

Подставляя в (6) уравнения (1а) и (7), осуществляя линейное преобразование переменных осей α , β к осям d , q по известным соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} y_d &= y_{\alpha} \cos \gamma + y_{\beta} \sin \gamma, \\ y_q &= -y_{\alpha} \sin \gamma + y_{\beta} \cos \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

и присоединяя уравнение напряжений роторной цепи синхронной машины, получим систему дифференциальных уравнений трехфазного короткого замыкания синхронного генератора, работающего совместно с коллекторным генератором. При постоянной скорости вращения машины она имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} (\rho_d + p)u_d - (1 - \varphi_q)u_q + pu_r &= 0, \\ (1 - \varphi_d)u_d + (\rho_q + p)u_q + u_r &= 0, \\ \mu pu_d + (\rho_r + p)u_r &= e_r; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

здесь $u_d = \bar{x}_d i_d$, $u_q = \bar{x}_q i_q$, $u_r = x_{md} i_r$, $\rho_d = \frac{R_s + r}{x_d}$

$\rho_q = \frac{R_s + r}{x_q}$, $\rho_r = \frac{r_r}{L_r}$, $\varphi_d = \frac{x}{x_d}$, $\varphi_q = \frac{x}{x_q}$, $\bar{x}_d = x_d + x_{\kappa}$,

$\bar{x}_q = x_q + x_{\kappa}$, $\bar{x}'_d = x'_d + x_{\kappa}$, $\mu = \frac{\bar{x}_d - \bar{x}_d'}{x_d}$, $e_r = u_{\beta} \frac{x_{\kappa}}{L_r}$

u_{β} —напряжение возбудителя;

L_r , r_r —индуктивность и омическое сопротивление обмотки возбуждения синхронного генератора;

x'_d —переходное индуктивное сопротивление синхронного генератора по продольной оси.

Корни характеристического уравнения системы (9) могут быть определены приближенно с любой степенью точности [Л. 5]. Считая величины ρ и φ малыми в сравнении с единицей и огра-

ваясь первыми степенями ρ при определении β , найдем их значения в виде:

$$\left. \begin{aligned} p_1 = \alpha &\approx -\rho'_r \frac{1 - \varphi_d}{1 - \varphi'_d} = -\frac{1}{T'_d} \frac{1 - \varphi_d}{1 - \varphi'_d}, \\ p_2 = \beta + j\nu &\text{ и } p_3 = \beta - j\nu, \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\frac{1}{2} \left(\rho'_d + \rho'_q - \rho'_r \frac{\mu \varphi'_d}{1 - \varphi'_d} \right) = -\frac{1}{T_a} + \frac{1}{T'_d} \frac{\mu \varphi'_d}{2(1 - \varphi'_d)},$$

$$\frac{1}{(1 - \varphi'_d)(1 - \varphi_q)} \approx 1 - \frac{1}{2} (\varphi'_d + \varphi_q),$$

T'_d — постоянные времени затухания апериодической и переходной составляющих тока короткого замыкания; величины ρ и φ , снабженные штрихом, равны таковым без штриха, деленным на $\sigma = 1 - \mu = \frac{x'_d}{x_d}$.

определяя начальный всплеск токов короткого замыкания из системы (9) при условии равенства нулю всех активных сопротивлений штывая их лишь в затухании токов, найдем последние в виде:

ток в роторе:

$$i_r = i_{ro} + \frac{\bar{x}_d - \bar{x}'_d}{\bar{x}'_d} i_{ro} \frac{\varepsilon^{\alpha t}}{1 - \varphi'_d} - \frac{\bar{x}_d - \bar{x}'_d}{\bar{x}'_d} i_{ro} \frac{\varepsilon^{\beta t}}{1 - \varphi'_d} \cos \nu t, \quad (11)$$

i_{ro} — ток возбуждения при холостом ходе ротора;

ток в статоре: для фазы a

$$i_a = \frac{1}{1 - \varphi'_d} \left[-\frac{u_{ro}}{x_d} \cos(\gamma_0 + t) - u_{ro} \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \times \right. \\ \left. \varepsilon^{(\gamma_0 + t)} + \frac{u_{ro}}{2} \left\{ \left[\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d(1 - \varphi_q)} \right] \cos[(1 - \nu)t + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{2} \left[\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_q(1 - \varphi_q)} \right] \cos[(1 + \nu)t + \gamma_0] \right\} \varepsilon^{\beta t} \right]; \quad (11a)$$

токов фаз b и c можно воспользоваться изменив γ_0 на 120° и 240° соответственно. Выражения (10), (11) и (11a) показывают, что при $x \neq 0$ токи коллекторного генератора и ток короткого замыкания искажаются. Такое изменение постоянных времени T'_d за счет $x \neq 0$ не играет особой роли, так как изменение может быть учтено при определении требуемой компенсации активных сопротивлений цепей статора и ротора синхронного генератора. Кривая тока короткого замыкания в роторе искажается в основном из-за того, что периодическая составляющая тока становится аperiodической (затухающей), изменяясь с частотой

$$= 1 - \nu = \frac{1}{2} (\varphi'_d + \varphi_q) = \frac{1}{2} x \left(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x_q} \right), \quad (12)$$

Условия самовозбуждения коллекторного генератора, работающего по схеме рис. 2, достаточно легко определяются, исходя из выражения корней характеристического уравнения системы (9). Из (10) следует, что практически всегда $p_1 = \alpha < 0$.

Самовозбуждение наступит, если вещественная часть корней p_2 и p_3 (β) делается положительной. Если обозначить $\Delta R = R_s + R_k - R$ — результирующее активное сопротивление трехфазной цепи при $\beta = 0$, то согласно (10)

$$\Delta R = \rho_r \frac{\mu \varphi'_d}{1 - \varphi'_d} x_s,$$

где $x_s = \frac{\bar{x}_d \bar{x}_q}{x_q + \bar{x}'_d}$.

Величина ΔR может быть и больше и меньше нуля и лишь при $\varphi'_d = 0$ ($x = 0$) $\Delta R = 0$; иначе говоря, самовозбуждение в этом случае может начаться при полной компенсации активного сопротивления цепи.

С целью проверки полученных теоретических результатов было произведено экспериментальное исследование специального трехфазного последовательного коллекторного генератора при работе его с явнополюсным синхронным генератором лабораторной модели типа СГ-12,5. Четырехполюсный коллекторный генератор на статоре имеет две обмотки: компенсационную с действующим числом витков $w_k = 13,5$ и возбуждения, действующее число витков которой w_g может изменяться включением регулировочного витка и изменением числа параллельных ветвей обмотки; здесь в статье приводятся данные, соответствующие значениям $w_{g1} = 7,8$ и $w_{g2} = 15,6$. Индуктивное сопротивление $x_k = 0,040$ ($w_{g1} = 7,8$) и $0,096$ ($w_{g2} = 15,6$), самоиндуктивность $L = 0,00664$, взаимоиндуктивность $M_{rk} = 0,0566$. Все параметры даны в относительных единицах (базисное сопротивление $x_b = 4,22$ ом) при щетках, сдвинутых на 180° от оси компенсационной обмотки ($\beta_{щ} = 0$).

Генератор-модель СГ-12,5 с одной обмоткой на роторе мощностью $P_n = 12,5$ ква, $U_n = 230$ в, $I_n = 31,5$ а, $n = 1000$ об/мин имеет следующие параметры: $x_d = 0,825$, $x_q = 0,575$, $x'_d = 0,125$, $R_{s75^\circ} = 0,0107$.

Были сняты осциллограммы токов при трехфазном коротком замыкании синхронного генератора, сопротивление обмотки статора которого компенсировалось коллекторным генератором. Опыт был произведен при различных углах сдвига щеток $\beta_{щ}$ из положения нормальной компенсации и различных числах витков обмотки возбуждения.

На рис. 3 представлена осциллограмма токов в статоре i_a, i_b, i_c и в роторе i_r при $\beta_{щ} \approx 10^\circ$, $w_{g2} = 15,6$ ($x \approx 0$).

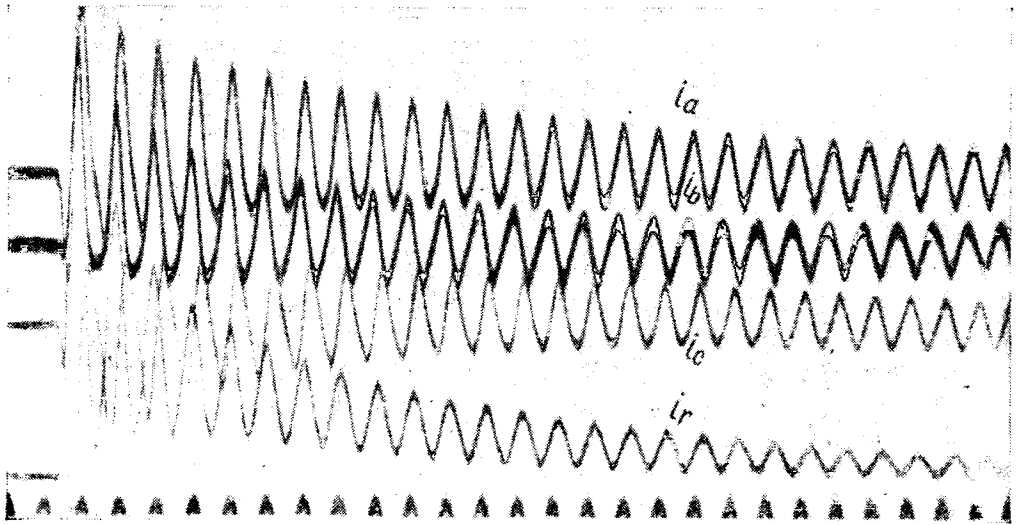


Рис. 3.

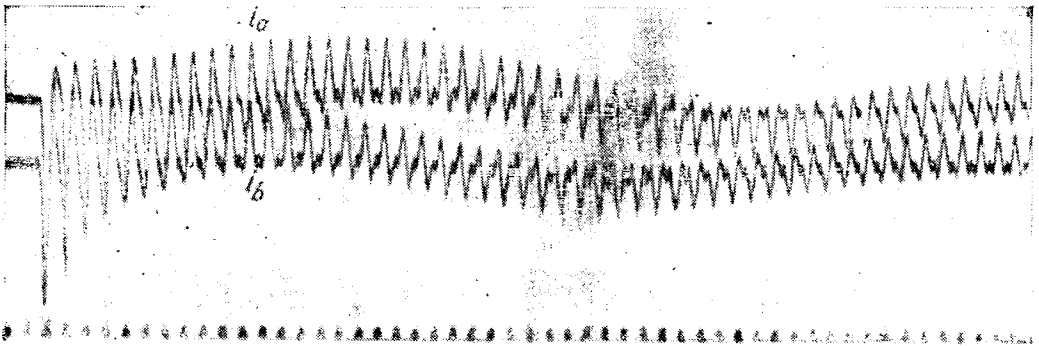


Рис. 4.

На рис. 4 представлена осциллограмма токов статора, но при $\omega_{\sigma 1} = 7,8$ и $\beta_{щ} = 0^\circ$ ($\chi \neq 0$) и максимально возможной компенсации сопротивления статора.

На рис. 5 дана зависимость меньшей из частот изменения „аперiodической“ составляющей тока короткого замыкания ν_s от угла сдвига щеток $\beta_{щ}$ при максимально возможной степени компенсации активного сопротивления: кривые 1, 2 — опытные (при $\omega_{\sigma 1} = 7,8$ и $\omega_{\sigma 2} = 15,6$ соответственно), кривые 3, 4 — расчетные. Индуктивность L при сдвиге щеток на угол $\beta_{щ}$ рассчитывалась как

$$L_{\beta} = L + \frac{V\sqrt{3}}{2} M_{гк} (1 - \cos \beta_{щ} - k_a \sin \beta_{щ}),$$

L определялась по опытному значению ν_s при $\beta_{щ} = 0$ и $\omega_{\sigma 1} = 7,8$ согласно (12).

На рис. 5 нанесена также зависимость скорости вращения коллекторного генератора, от которой для различных $\beta_{щ}$ удавалось поддерживать степень компенсации сопротивления индуктивной; кривая 5 соответствует $\omega_{\sigma 1} = 7,8$, кривая 6 — $\omega_{\sigma 2} = 15,6$.

В заключение авторы выражают свою благодарность чл.-корр. Академии наук СССР пр М. П. Костенко за ценные советы и замечания по этой работе и за просмотр рукописи стат

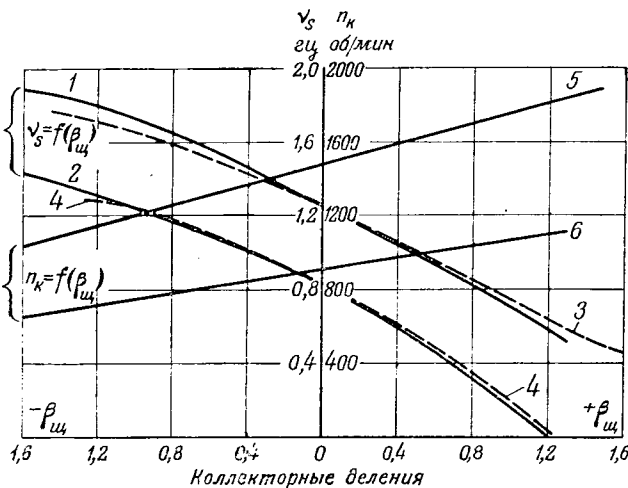


Рис. 5. Частота изменения аперiodической составляющей тока короткого замыкания и скорость вращения коллекторной машины в зависимости от угла сдвига щеток (одно коллекторное деление соответствует $8,3^\circ$).

Приложение. Уравнения напряжений трехфазной последовательной коллекторной машины. На рис. 6 представлена схема двухполюсной последовательной коллекторной машины с одной системой обмоток на статоре. Ключевые направления токов и магнитные оси обмоток показаны на рисунке стрелками. Цифры 1, 2, 3 означают фазные обмотки статора, 4, 5, 6 — фазные обмотки ротора, получающиеся после наложения на коллектор. Будем отсчитывать угол β_k , определяющий положение магнитной оси обмотки k , от оси обмотки 1 по направлению часовой стрелки. Тогда $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 120^\circ$, $\beta_3 = 240^\circ$, $\beta_4 = 150^\circ - \varphi$, $\beta_5 = 30^\circ - \varphi$, $\beta_6 = -90^\circ - \varphi$. Уравнения напряжений k -й обмотки на основании общих уравнений коллекторных машин [Л. 6] будет иметь вид:

$$u_k = e_k - i_k r_k = - \sum_{s=1}^n (L_{ks} p i_s + N_{ks} \omega \delta_k i_s) - i_k r_k, \quad (1,1)$$

где u_k и e_k — соответственно напряжение, приложенное к k -й обмотке, и э. д. с., индуцируемая в ней;

i_k и i_s — токи, протекающие в k -й и s -й обмотках соответственно;

L_{ks} — самоиндуктивность k -й обмотки ($k = s$) и взаимоиндуктивность ее с s -й обмоткой ($k \neq s$);

$\frac{dL_{ks}}{d\beta_{ks}}$ и β_{ks} — угол между магнитными осями обмоток k и s ; $\delta_k = 0$ для статорных обмоток ($k = 1, 2, 3$) и 1 для роторных обмоток ($k = 4, 5, 6$).

Имея в виду неявнополюсное исполнение коллекторной машины, можно определить взаимоиндуктивность:

$$M_{ks1} \cos \beta_{ks} + M_{ks2} \cos 3\beta_{ks} + M_{ks5} \cos 5\beta_{ks} + \dots \quad (k \neq s), \quad (1,2)$$

где взаимоиндуктивность является четной функцией β_{ks} значения при углах β_{ks} , отличающихся на π , различаются лишь знаком.

Постоянно точно величина L_{ks} определяется в виде:

$$L_{ks} = M_{ks1} \cos \beta_{ks} = M_{ks} \cos \beta_{ks}, \quad (1,3)$$

Первая третья гармоническая в (1,2) может оказать некоторое влияние на величину L_{ks} только для обмоток ротора (ввиду обычно малого числа пазов на полюс и оно может быть при желании учтено, хотя и не имеет принципиального значения; остальные составляющие малы и ими можно пренебречь). На рис. 7 приведена зависимость взаимоиндуктивности статорной и роторной обмоток от угла β_{ks} , определенная опытным путем на образцах машин. При принятых допущениях величина N_{ks} определяется:

$$N_{ks} = \frac{dL_{ks}}{d\beta_{ks}} = - M_{ks} \sin \beta_{ks}. \quad (1,4)$$

Для машины, изображенной схематически на рис. 6, определим э. д. с., индуцируемые в обмотках ротора. Фазные э. д. с. эквивалентной звезды на роторе e_a, e_b, e_c (рис. 6):

$$\left. \begin{aligned} e_a &= \frac{1}{3} (e_5 - e_4) + e_o, \\ e_b &= \frac{1}{3} (e_4 - e_6) + e_o, \\ e_c &= \frac{1}{3} (e_6 - e_5) + e_o, \end{aligned} \right\} \quad (1,5)$$

где $e_o = \frac{1}{3} (e_a + e_b + e_c)$. Обычно э. д. с. $e_o = 0$ и в дальнейшем она не рассматривается.

Для определения e_a, e_b, e_c нужно э. д. с., индуцируемые в обмотках 4, 5, 6, представить в функции токов,

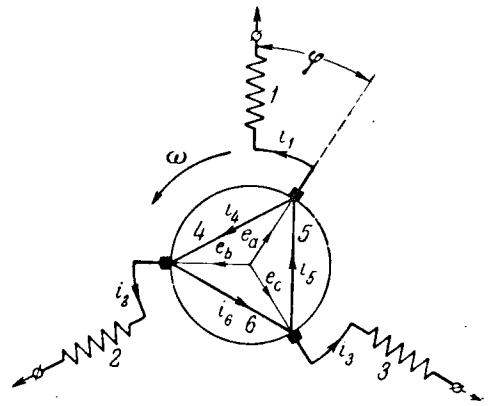


Рис. 6. Схема последовательного коллекторного генератора с одной обмоткой на статоре.

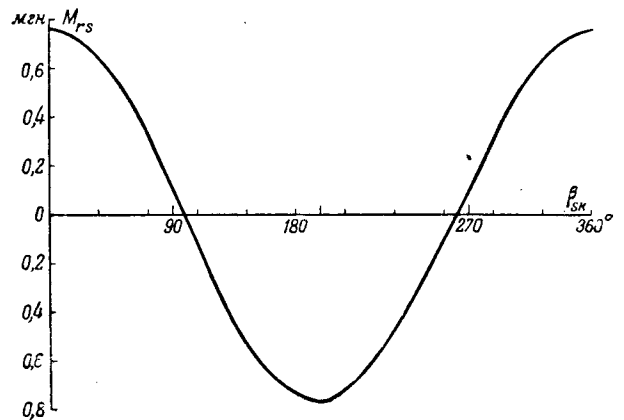


Рис. 7. Взаимоиндуктивность статорной и роторной обмоток коллекторного генератора в зависимости от угла между осями обмоток.

протекающих в обмотках статора i_1, i_2, i_3 , для чего следует выразить токи i_4, i_5 и i_6 через i_1, i_2 и i_3 . Согласно рис. 6 можно найти:

$$\left. \begin{aligned} i_4 &= \frac{1}{3} (i_2 - i_1) + i_o, \\ i_5 &= \frac{1}{3} (i_1 - i_3) + i_o, \\ i_6 &= \frac{1}{3} (i_3 - i_2) + i_o, \end{aligned} \right\} \quad (1,6)$$

где $i_o = \frac{1}{3} (i_4 + i_5 + i_6)$.

Электродвижущие силы e_4, e_5 и e_6 вычисляются согласно общим выражениям (1,1), (1,3) и (1,4), причем значения углов β_{ks} указаны в начале приложения. После несложных преобразований выражения (1,5) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} e_a &= p (L_1 i_1 + L_2 i_2 + L_3 i_3) + \\ &+ (-L_1' i_1 - L_2' i_2 + L_3' i_3) \omega, \\ e_b &= p (L_3 i_1 + L_1 i_2 + L_2 i_3) + \\ &+ (L_3' i_1 - L_1' i_2 - L_2' i_3) \omega, \\ e_c &= p (L_2 i_1 + L_3 i_2 + L_1 i_3) + \\ &+ (-L_2' i_1 + L_3' i_2 - L_1' i_3) \omega, \end{aligned} \right\} \quad (1,7)$$

где

$$L_1 = \frac{1}{3} \left[-\sqrt{3} M_{rs} \cos \varphi - (L_{rr} + \frac{1}{2} M_{rr}) \right],$$

$$L_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} M_{rs} \sin(30 + \varphi), \quad L_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} M_{rs} \sin(30 - \varphi),$$

$$L'_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} M_{rs} \sin \varphi,$$

$$L'_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[M_{rs} \cos(30 + \varphi) + \frac{1}{2} M_{rr} \right],$$

$$L'_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[M_{rs} \cos(30 - \varphi) + \frac{1}{2} M_{rr} \right],$$

L_{rr} — индуктивность непереработанных обмоток ротора; M_{rr} — взаимоиндуктивность непереработанных обмоток ротора при совпадении их осей; M_{rs} — взаимоиндуктивность непереработанных обмоток ротора и статора при совпадении их осей.

В специальных коллекторных машинах на статоре имеются две обмотки: возбуждения и компенсационная. На рис. 1 представлена схема такой коллекторной машины, работающей генератором по полю. Обмотка возбуждения обозначена буквой v , компенсационная — буквой k ; стрелками показано положительное направление токов и э. д. с., а также магнитные оси обмоток. За ось, от которой отсчитываются углы β_{ks} , принята ось обмотки 1 κ .

В этом случае углы, определяющие положение магнитных осей обмоток, будут: для компенсационной $\beta_{k1} = 0$, $\beta_{k2} = 120^\circ$, $\beta_{k3} = 240^\circ$, для обмотки возбуждения $\beta_{v1} = 90^\circ$, $\beta_{v2} = 210^\circ$, $\beta_{v3} = 330^\circ$; для фазных обмоток ротора $\beta_1 = -30^\circ$, $\beta_2 = -150^\circ$, $\beta_3 = 90^\circ$. Электродвижущие силы e_a , e_b , e_c обмоток ротора для машины, изображенной на рис. 1, могут быть получены из выражений (1,1), где следует каждый из членов, содержащих множитель M_{rs} (э. д. с., обусловленные токами статора), заменить двумя соответственно э. д. с., обусловленным токами обмоток компенсационной и возбуждения, полагая в старых членах $\varphi = 180^\circ$ (компенсационная обмотка) и $\varphi = -90^\circ$ (обмотка возбуждения). Вводя вместо M_{rs} взаимоиндуктивности обмоток возбуждения M_{rv} и компенсационной M_{rk} с обмоткой ротора при совпадении их осей, получим следующие выражения коэффициентов в (1,7):

$$L_1 = \frac{1}{3} \left[\sqrt{3} M_{rk} - (L_{rr} + \frac{1}{2} M_{rr}) \right],$$

$$L_2 = -\frac{1}{2} \left(M_{rv} + \frac{1}{\sqrt{3}} M_{rk} \right),$$

$$L_3 = \frac{1}{2} \left(M_{rv} - \frac{1}{\sqrt{3}} M_{rk} \right),$$

$$L'_1 = -\frac{1}{\sqrt{3}} M_{rv},$$

$$L'_2 = \frac{1}{2\sqrt{3}} (M_{rv} - \sqrt{3} M_{rk} + M_{rr}),$$

$$L'_3 = -\frac{1}{2\sqrt{3}} (M_{rv} + \sqrt{3} M_{rk} - M_{rr}).$$

Электродвижущие силы, индуцируемые в обмотках возбуждения (e_{v1} , e_{v2} , e_{v3}) и компенсационной (e_{k1} , e_{k2} , e_{k3}), также определяются согласно общим выражениям (1,1) и (1,3), причем в (1,1) $\delta_k = 0$.

Фазные напряжения, приложенные к внешним зажимам коллекторной машины u_1 , u_2 , u_3 :

$$-u_1 = e_a + e_{v1} + e_{k1} - i_1 R_k;$$

$$-u_2 = e_b + e_{v2} + e_{k2} - i_2 R_k;$$

$$-u_3 = e_c + e_{v3} + e_{k3} - i_3 R_k;$$

где R_k — суммарное активное сопротивление по тельно включенных обмоток и щеточного контакта (независимым от тока).

Опуская несложные выкладки, приведем у напряжений коллекторной машины в окончательном

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= pL_k i_1 + i_1 r + \frac{x}{\sqrt{3}} (i_2 - i_3), \\ u_2 &= pL_k i_2 + i_2 r + \frac{x}{\sqrt{3}} (i_3 - i_1), \\ u_3 &= pL_k i_3 + i_3 r + \frac{x}{\sqrt{3}} (i_1 - i_2), \end{aligned} \right\}$$

где L_k — индуктивность фазы машины, определенная опытом трехфазного питания:

$$L_k = \frac{1}{3} \left(L_{rr} + \frac{1}{2} M_{rr} \right) - \sqrt{3} M_{rk} + L_{vv} + L_{kk} + \frac{1}{2} (M_{vv} + M_{kk}),$$

L_{vv} и L_{kk} — индуктивности обмоток возбуждения и компенсационной соответственно; M_{vv} и M_{kk} — взаимоиндуктивности обмоток возбуждения и компенсационной при совпадении их осей и компенсационной обмоток при совпадении осей;

$$x = \frac{1}{2} (M_{rr} - \sqrt{3} M_{rk}) \omega = L\omega;$$

$$r = R_k - \frac{\sqrt{3}}{2} M_{rv} \omega = R_k - R,$$

$R = \frac{\sqrt{3}}{2} M_{rv} \omega$ — активное сопротивление, компенсируемое коллекторной машиной; остальные постоянные определены выше. Осуществляя линейное преобразование к оси в (1,8):

$$u_\alpha = u_1, \quad u_\beta = \frac{u_2 - u_3}{\sqrt{3}}, \quad i_\alpha = i_1 \quad \text{и} \quad i_\beta = \frac{i_2 - i_3}{\sqrt{3}},$$

получим вместо (1,8):

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha &= pL_k i_\alpha + r i_\alpha + x i_\beta, \\ u_\beta &= pL_k i_\beta + r i_\beta - x i_\alpha, \end{aligned} \right\}$$

Если обозначить $x_k = 2\pi f L_k$, то в (1,8) и (1,9), записанные в относительных единицах, можно подставлять вместо x_k и

Литература

1. В. А. Веников. Применение теории подобия физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.
2. В. А. Веников, А. В. Иванов-Смоленский. Синхронный генератор для динамического моделирования электрических систем. Электричество, № 8, 1951.
3. М. П. Костенко. Электродинамическая модель для исследования устойчивости. Электричество, № 1950.
4. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.
5. А. А. Горев. Переходные процессы синхронных машин. Госэнергоиздат, 1950.
6. И. М. Садовский и др. Электродинамика коллекторных электрических машин. Электричество, № 4, 1949.

Диаграмма тока насыщенной синхронной явнополюсной машины

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ЕНЬКО

Московский горный институт им. Сталина

На рис. 1 $OACNO$ — известная векторная диаграмма синхронной явнополюсной машины без учета насыщения и активного сопротивления; \overline{OA} — напряжение на зажимах

\overline{AB} — падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния $jI x_s$; \overline{BD} — падение напряжения в индуктивном сопротивлении поперечной реакции якоря $jI_q x_{aq} = -\dot{E}_{aq}$; \overline{ND} — д. с. продольной реакции якоря \dot{E}_{ad} ; \overline{ON} — д. с. холостого хода \dot{E}_0 ; \overline{OD} — продольная составляющая результирующей э. д. с. \dot{E} .

Диаграмма построена в относительных единицах. За единицу э. д. с. принято номинальное напряжение U_n , за единицу возбуждения — н. с., соответствующая U_n по касательной к начальной части характеристики холостого хода, которую будем называть „прямолинейной характеристикой“. Предположено, что прямолинейная характеристика образует с осями координат угол 45° , так что абсциссы каждой ее точки равны ординатам, а это означает, что н. с. равны по величине соответствующим э. д. с.

Предложен графоаналитический метод построения диаграммы тока на основе характеристики $E = \varphi(\Delta F)$ насыщающихся участков магнитной цепи. Метод позволяет определить критический угол, соответствующий пределу статической устойчивости. Дан анализ влияния рассеяния, возбуждения и формы кривой намагничивания на диаграмму тока.

Электродвижущим силам E , E_{ad} и E_0 соответствуют н. с. F' , F_{ad} и F_0 (не показанные на рис. 1), векторы которых равны по величине векторам соответствующих э. д. с. и смещены по фазе на угол $+90^\circ$. Если учесть насыщение, то при неизменных значениях U , I и $\cos \varphi$ векторная диаграмма изменится только в том, что н. с. F' увеличится на некоторую величину ΔF , обусловленную насыщающимися участками магнитной цепи, соответственно чему увеличится намагничивающая сила возбуждения F'_g до значения F'_g .

Если векторы н. с. повернуть на -90° , то получится совмещенная диаграмма, которую можно рассматривать состоящей из двух частей: диаграммы э. д. с. $OABD$ и диаграммы н. с. $ODNK$. В такой форме будем называть диаграмму „обобщенной“. В обобщенной диаграмме

$$OK = ON + NK = F'_g + \Delta F = F_g.$$

Если бы рассматриваемая машина не имела насыщения, но работала при тех же значениях U , θ и F_g , что и насыщенная, то ее векторная диаграмма была бы $OAC'KO$.

Проведем через точки C' и C прямые AM' и AM :

$$\frac{AM'}{AC'} = \frac{AM}{AC} = \frac{x_d}{x_q}$$

и

$$\frac{AB'}{AC'} = \frac{AB}{AC} = \frac{x_s}{x_q}.$$

Соединив точки M и M' прямой, получим подобные треугольники AMM' и ABE' . Из подобия следует:

$$\frac{BB'}{MM'} = \frac{x_s}{x_d}, \quad (1)$$

$$BB' = DD' = E' - E \quad \text{и} \quad MM' = NK = \Delta F.$$

Подставляем эти значения в (1) и решаем относительно E :

$$E = E' - \frac{x_s}{x_d} \Delta F. \quad (2)$$

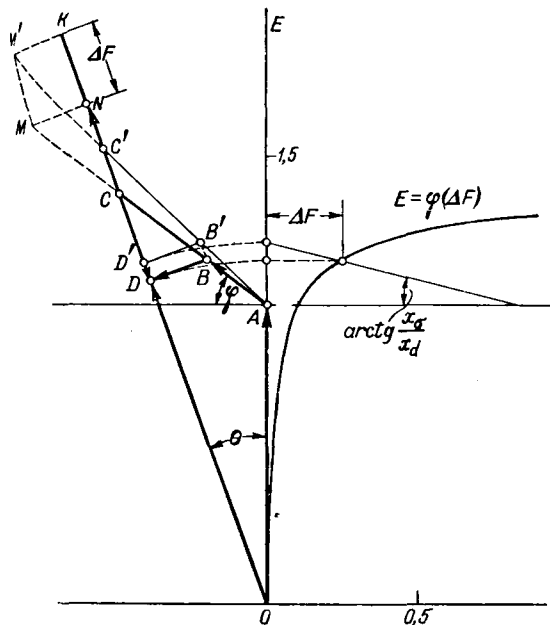


Рис. 1.

Выражение (2) дает линейную зависимость

$$E = \varphi(\Delta F).$$

На рис. 1 представлена зависимость э. д. с. от насыщающихся участков в магнитной цепи $E = \varphi(\Delta F)$, определяемая по кривой намагничивания. Совместное решение этой зависимости с (2) определяет ΔF ; как видно из рис. 1. Следует отметить, что кривая $E = \varphi(\Delta F)$ на рис. 1 не является характеристикой холостого хода, а дает отклонение ее от прямолинейной.

На основании вышеизложенного можно легко рассчитать и построить диаграмму тока с учетом насыщения.

Вектор $\overline{AC'}$ пропорционален току ненасыщенной машины, а вектор \overline{AC} — насыщенной, поэтому при изменении угла θ точки C' и C опишут соответствующие диаграммы тока:

$$\begin{aligned} OC &= OA \cos \theta + \frac{x_q}{x_d} (OK - KN - OA \cos \theta) = \\ &= \left(1 - \frac{x_q}{x_d}\right) OA \cos \theta + \frac{x_q}{x_d} (OK - KN) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \rho &= \left(1 - \frac{x_q}{x}\right) U \cdot \cos \theta + \frac{x_q}{x_d} F_a - \frac{x_q}{x_d} \Delta F = \\ &= \rho' - \frac{x_q}{x_d} \Delta F. \end{aligned} \quad (3)$$

Равенство (3) является уравнением диаграммы тока насыщенной машины в полярных координатах $\rho = f(\theta)$, в котором $\rho = OC$ — радиус-вектор, а θ — полярный угол. При этом вектор тока определяется вектором $\overline{AC} = jI x_q$.

Уравнение (3) является общим и при подстановке $\Delta F = 0$ оно обращается в уравнение улитки Паскаля $\rho' = f(\theta)$, представляющей диаграмму тока ненасыщенной машины.

Таким образом, диаграмма тока с учетом насыщения получается из диаграммы ненасыщенной машины уменьшением значений радиуса-вектора ρ' на член $\frac{x_q}{x_d} \Delta F$, являющийся функцией э. д. с. E' . Из рис. 1 получаем:

$$OD' = OA \cos \theta + \frac{x_s}{x_d} (OK - OA \cos \theta) = E',$$

откуда после элементарных преобразований находим:

$$E' = \frac{x_{ad}}{x_d} U \cos \theta + \frac{x_s}{x_d} F_a. \quad (4)$$

Пример. Рассчитаем диаграмму тока гидрогенератора при номинальном напряжении и возбуждении $F_a = 2,03$, соответствующем номинальной нагрузке при $\cos \varphi = 0,8$. Параметры: $x_d = 1,00$; $x_q = 0,625$; $x_s = 0,25$.

Характеристика холостого хода соответствует нормальной для гидрогенераторов [Л. 1] и дает следующие сопряжен-

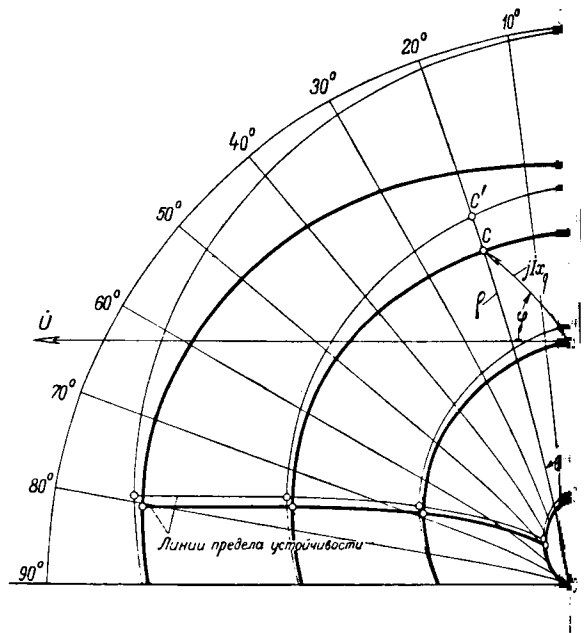


Рис. 2.

ные значения E и ΔF , определяющие зависимость $E = \varphi(\Delta F)$, представленную на рис. 1:

F	0	0,55	1,10	1,65	2,20
E	0	0,53	1,00	1,23	1,47
$F - E = \Delta F$	0	0,02	0,10	0,42	0,73

Рассчитаем для примера одну точку диаграммы $\theta = 20^\circ$. По (4) вычисляем:

$$E' = 0,75 \cdot 0,940 + 0,25 \cdot 2,03 = 1,213.$$

Здесь

$$U = U_n = 1 \text{ и } \cos \theta = \cos 20^\circ = 0,940.$$

Отложив это значение по оси ординат рис. 1, проводим прямую под углом $\arctg 0,25$ и определяем $\Delta F = 0,246$. По (3) вычисляем:

$$\begin{aligned} \rho &= (1 - 0,625) \cdot 0,940 + 0,625 \cdot 2,03 - \\ &- 0,625 \cdot 0,246 = 1,468. \end{aligned}$$

Повторяя этот расчет для различных значений угла получим ряд точек C , соединяя их плавной линией, получим диаграмму тока с учетом насыщения.

На рис. 2 приведены диаграммы тока для упомянутого гидрогенератора при возбуждении холостого хода номинальной нагрузкой, а также при предельном («потлочном») возбуждении, равном полуторакратному номинальному, и при отсутствии возбуждения.

Тонкими линиями показаны диаграммы тока без учета насыщения.

Критическое значение угла θ_k . Активная составляющая тока пропорциональна проекции радиуса-вектора на ось абсцисс:

$$\begin{aligned} I_a x_q &= \rho \sin \theta = \left(1 - \frac{x_q}{x_d}\right) U \cos \theta \sin \theta + \\ &+ \frac{x_s}{x_d} (F_a \sin \theta - \Delta F \sin \theta). \end{aligned} \quad (5)$$

Критическое значение угла θ_κ определится условиями максимума активной составляющей I_a :

$$\frac{dI_a x_q}{d\theta} = \left(1 - \frac{x_q}{x_d}\right) U(2 \cos^2 \theta - 1) + \frac{x_q}{x_d} \left[F_s \cos \theta - \frac{d(\Delta F \sin \theta)}{d\theta} \right] = 0.$$

После элементарных преобразований получим:

$$\cos^2 \theta + p \cos \theta - q = 0. \quad (6)$$

Здесь для краткости письма обозначено:

$$p = \frac{F_s}{2U \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right)}; \quad q = 0,5 + r;$$

$$r = \frac{\frac{d(\Delta F \sin \theta)}{d\theta}}{2U \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right)}.$$

Исследование функции $\Delta F \sin \theta = f(\theta)$ показывает, что в области критических значений θ в небольшом диапазоне она может быть достаточной практической точностью аппроксимирована линейной зависимостью. При этом ловии

$$\frac{d(\Delta F \sin \theta)}{d\theta} \approx \frac{\Delta F_2 \sin \theta_2 - \Delta F_1 \sin \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}; \quad (7)$$

где $\theta_1 = \theta'_\kappa$ — критическое значение угла θ без учета насыщения; $\theta_2 = \theta_1 + 0,1$.

На основании вышеизложенного определение критического значения угла θ_κ может быть произведено следующим образом: сначала определяют θ'_κ , решая (6), в предположении $r=0$; затем приблизительно вычисляют производную $\frac{d(\Delta F \sin \theta)}{d\theta}$ по (7) и вторично решают (6).

Пример. Рассчитаем θ_κ для упомянутого выше гидротурбогенератора при номинальном напряжении и возбуждении, соответствующем номинальной нагрузке. Вычисляем (6), считая, что машина не насыщена:

$$\cos \theta'_\kappa = -\frac{p}{2} + \sqrt{\frac{p^2}{4} + q} = -0,845 + \sqrt{0,714 + 0,5} = 0,257;$$

$$p = \frac{2,03}{2 \left(\frac{1}{0,625} - 1 \right)} = 1,69; \quad q = 0,5; \quad r = 0;$$

$$\theta_1 = \theta'_\kappa = 75^\circ 7' \text{ или } 1,311 \text{ радиана}; \\ \sin \theta_1 = 0,966.$$

Для графического определения ΔF_1 предварительно вычисляем E' по (4):

$$E'_1 = 0,75 \cdot 0,257 + 0,25 \cdot 2,03 = 0,700;$$

$$\Delta F_1 = 0,036;$$

$$\theta_2 = \theta_1 + 0,1 = 1,311 + 0,1 = 1,411;$$

$$\cos \theta_2 = 0,159; \quad \sin \theta_2 = 0,987;$$

$$E'_2 = 0,75 \cdot 0,159 + 0,25 \cdot 2,03 = 0,626;$$

$$\Delta F_2 = 0,029.$$

Теперь определяем производную $\frac{d(\Delta F \sin \theta)}{d\theta}$ по (7) и вычисляем r и q :

$$r = \frac{0,029 \cdot 0,987 - 0,036 \cdot 0,966}{2 \cdot 0,1 \cdot \left(\frac{1}{0,625} - 1 \right)} = -0,051; \\ q = 0,5 - 0,051 = 0,449.$$

Критическое значение θ_κ с учетом насыщения определяется по (6):

$$\cos \theta_\kappa = -0,845 + \sqrt{0,714 + 0,449} = 0,235;$$

$$\theta_\kappa = 76^\circ 25'; \quad \sin \theta_\kappa = 0,972.$$

Максимальное значение активной составляющей тока может быть определено по (5) подстановкой $\theta = \theta_\kappa$:

$$I_a x_q = (1 - 0,625) \cdot 0,235 \cdot 0,972 + 0,625 \times (2,03 - 0,034) \cdot 0,972 = 1,297;$$

$$I_a = \frac{1,297}{0,625} = 2,07.$$

Здесь $\Delta F = 0,034$ определено, как и выше, графически по E'_κ :

$$E'_\kappa = 0,75 \cdot 0,235 + 0,25 \cdot 2,03 = 0,683.$$

Построение диаграммы тока с учетом активного сопротивления. Обратимся к рис. 2. Если провести луч AC под углом φ к оси абсцисс, то точки пересечения этого луча с кривыми диаграмм тока определяют ряд сопряженных значений I и F_s при постоянных значениях U и $\cos \varphi$. Очевидно, это точки регулировочной характеристики $F_s = f(I)$. Имея ряд диаграмм тока, можно построить регулировочные характеристики и обратно — при наличии ряда регулировочных характеристик можно построить диаграммы тока. Как известно, регулировочные характеристики легко могут быть рассчитаны с учетом как насыщения, так и активного сопротивления обмотки статора, и таким путем можно определить диаграммы тока с учетом активного сопротивления. То же можно сделать и на основании ряда U-образных характеристик, которые могут быть легко рассчитаны с учетом активного сопротивления.

Влияние насыщения на диаграмму тока. Из равенства (3) следует, что насыщение уменьшает радиус-вектор ρ' на величину $\frac{x_q}{x_d} \Delta F$. Величина ΔF , которую назовем добавочной н. с., зависит согласно построению рис. 1 от E' и $\frac{x_s}{x_d}$, причем E' , в свою очередь, зависит по (4) от возбуждения.

Таким образом, для данной машины влияние насыщения увеличивается с возбуждением. Это хорошо видно из рассмотрения диаграммы тока рис. 2 при различных возбуждениях. Оно достаточно велико при малых углах θ и имеет лишь небольшое значение в области критических значений θ_κ .

Насыщение уменьшает максимальную мощность и увеличивает угол θ_κ на $1,5^\circ \dots 2^\circ$. Увеличение критического угла зависит от степени

изменения насыщения, определяемой формой кривой намагничивания. В вышеприведенном примере при номинальном возбуждении критический угол увеличился за счет насыщения на $76^{\circ}25' - 75^{\circ}7' = 1^{\circ}18'$.

Если бы этот генератор имел характеристику холостого хода другой формы, большей кривизны, то угол θ_k увеличился бы значительно. Подсчеты показывают, что при характеристике, соответствующей нормальной для турбогенераторов, это увеличение составило бы $3^{\circ}46'$.

Влияние насыщения усиливается, если постоянное напряжение поддерживается не на зажимах генератора, а в некоторой точке системы, с которой генератор связан через внешнее индуктивное сопротивление. Так, при внешнем сопротивлении $x_{вн} = 0,45$ и номинальном

возбуждении увеличение угла θ_k у рассматриваемого генератора будет: при характеристике нормальной для гидрогенераторов, $84^{\circ} - 80^{\circ}30' = 3^{\circ}45'$, а при турбогенераторной характеристике $5,5^{\circ}$.

Максимальная мощность зависит от лютной величины насыщения (5), а критический угол — от относительного изменения насыщения (6), поэтому, придавая характеристике намагничивания кривизну в области малых значений напряжения, можно, не уменьшая или не уменьшая максимальной мощности, увеличить критический угол на несколько градусов.

Литература

1. Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Госэнергоиздат, стр. 314, 1949.

(152)



Влияние сдвига щеток поперечной цепи на переходный процесс электромашинного усилителя

Кандидат техн. наук В. В. РУДАКОВ

Ленинградское отделение Института автоматики и телемеханики АН СССР

Для снижения э. д. с. от остаточного магнетизма и для стабилизации рабочих характеристик в электромашинном усилителе поперечного поля часто вводят смещение на небольшой угол щеток поперечной цепи в направлении вращения якоря. Смещение щеток поперечной цепи по направлению вращения якоря создает размагничивающую продольную составляющую поперечного магнитного потока (рис. 1), снижающую коэффициент усиления и оказывающую влияние на характер переходных процессов.

Показано, что сдвиг в направлении вращения якоря щеток поперечной цепи электромашинного усилителя поперечного поля влечет за собой снижение коэффициента усиления и уменьшение времени установления процесса. Указывается также на возможность образования затухающего колебательного процесса нарастания э. д. с. усилителя.

При несмещенных нейтральных щетках, как известно, имеется небольшое размагничивающее продольное поле, обусловленное вихревыми токами в стали якоря и поперечных щеток. При смещении щеток поперечной цепи по направлению вращения якоря появляется дополнительное значительное по величине размагничивающее продольное магнитное поле пропорциональное при ненасыщенной магнитной системе току поперечной цепи i_2 и углу смещения поперечных щеток α .

Для учета влияния размагничивающего продольного поля на характеристики переходных процессов целесообразно ввести взаимоиנדуктивности: а) обмотки управления M_{12a} — с витками обмотки якоря в двойном угле α ; M_{12a} — с контурами коммутируемых секций; M_{12c} — с контурами вихревых токов в стали якоря; б) компенсационной обмотки: M_{k2a} с витками обмотки якоря в двойном угле α ; M_{k2r} — с контурами коммутируемых секций; M_{k2c} — с контурами вихревых токов в стали якоря.

Размагничивающие потоки обмотки якоря коммутируемых секций и потерь в стал

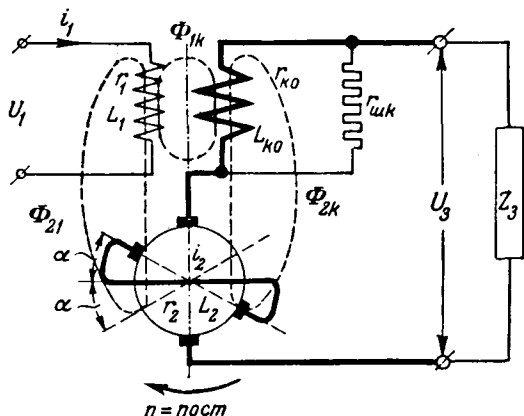


Рис. 1.

опорциональны току поперечной цепи i_2 , по-
тому можно объединить перечисленные взаимо-
дуктивности в две:

а) взаимоиндуктивность обмотки управления
поперечной цепью:

$$M_{12} = M_{12a} + M_{12r} + M_{12c}. \quad (1)$$

б) взаимоиндуктивность компенсационной
обмотки с поперечной цепью

$$M_{k2} = M_{k2a} + M_{k2r} + M_{k2c}. \quad (2)$$

Кроме того, в усилителе поперечного поля
имеется достаточно сильная взаимоиндуктивная
связь обмотки управления с контуром компен-
сационной обмотки, которая учитывается соот-
ветствующей взаимоиндуктивностью M_{1k} .

Для упрощения исследования сделаем обы-
чные допущения: пренебрегаем обратным взаимо-
дуктивным влиянием токов обмотки управления
компенсационной обмотки на ток якоря i_2 и
принимаем коэффициент связи между обмоткой
управления и компенсационной обмоткой равным
единице.

Тогда для процесса нарастания э. д. с. в уси-
лителе поперечного поля со сдвигом поперечных
щеток по направлению вращения якоря при вне-
запном включении обмотки управления на неко-
торое напряжение U может быть написано
следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & [(T_1 + T_k) T_2 + k_i (T_{m1} T_{2k} - T_k T_{21}) + \\ & + k_i \frac{c_k}{c_1} (T_{mk} T_{21} - T_1 T_{2k})] \frac{d^2 e_3}{dt^2} + \\ & + \left[a (T_1 + T_k) + T_2 - k_i \left(T_{21} + \frac{c_k}{c_1} T_{2k} \right) \right] \frac{de_3}{dt} + \\ & + a e_3 = \frac{c_1 c_2}{r_1 r_2} U = k_u U. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения для
постоянных времени:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{L_1}{r_1} \text{ — цепи управления;} \\ T_k &= \frac{L_k}{r_k} \text{ — контура компенсационной обмотки;} \\ T_2 &= \frac{L_2}{r_2} \text{ — поперечной цепи;} \\ T_{m1} &= \frac{M_{k1}}{r_1} \text{ — взаимоиндуктивности обмотки управ-} \\ & \text{ления и компенсационной обмотки;} \\ T_{mk} &= \frac{M_{1k}}{r_k} \text{ — взаимоиндуктивности компенсацион-} \\ & \text{ной обмотки и обмотки управления;} \\ T_{21} &= \frac{M_{21}}{r_1} \text{ — взаимоиндуктивности обмотки управ-} \\ & \text{ления и поперечной цепи;} \\ T_{2k} &= \frac{M_{2k}}{r_k} \text{ — взаимоиндуктивности компенса-} \\ & \text{ционной обмотки и поперечной цепи.} \end{aligned}$$

Другие обозначения: c_1 — коэффициент кру-
тизны характеристики э. д. с. поперечной цепи

от тока управления; c_k — коэффициент крутизны
характеристики э. д. с. поперечной цепи от тока
компенсационной обмотки; k_u — коэффициент
усиления напряжения;

$$\left(1 + \frac{c_{21}}{r_2} \right) = \frac{I_2}{I_{2a}} = a \text{ — коэффициент снижения}$$

усиления напряжения в первом каскаде;

$$\frac{c_1}{r_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_{2a}}{I_1} = k_i \text{ — нормальный коэффи-}$$

циент усиления тока в первом каскаде усиления.

Решение дифференциального уравнения опре-
деляется корнями характеристического уравне-
ния:

$$Ax^2 + Bx + C = 0, \quad (4)$$

где

$$A = (T_1 + T_k) T_2 + k_i (T_{m1} T_{2k} - T_k T_{21}) +$$

$$+ k_i \frac{c_k}{c_1} (T_{mk} T_{21} - T_1 T_{2k});$$

$$B = a (T_1 + T_k) + T_2 - k_i \left(T_{21} + \frac{c_k}{c_1} T_{2k} \right);$$

$$C = a.$$

Обычно

$$B^2 - 4AC < 0 \quad (5)$$

и корни характеристического уравнения полу-
чаются сопряженными комплексными, а характер
процесса нарастания э. д. с. получается колеба-
тельным быстрозатухающим.

В общем случае уравнение нарастания э. д. с.
усилителя поперечного поля со сдвигом попе-
речных щеток по направлению вращения может
быть записано в следующем виде:

$$e_3 \approx \frac{k_u U}{a} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_s}} \left(\cos \omega_s t + \frac{1}{T_s \omega_s} \sin \omega_s t \right) \right], \quad (6)$$

где $T_s = \frac{2A}{B}$ — эквивалентная постоянная вре-
мени электромашиного усили-
теля поперечного поля;

$\omega_s = \sqrt{\frac{C}{A} - \frac{B^2}{4A^2}}$ — собственная частота колебаний
усилителя.

Количественная оценка постоянных времени
усилителя со сдвигом поперечных щеток по на-
правлению вращения была выполнена на усили-
теле 2,5—3000 завода МЭП. Коэффициенты
усиления определялись по статическим харак-
теристикам. Постоянные времени обмотки управ-
ления, компенсационной обмотки и поперечной
цепи устанавливались по осциллограммам спада-
ния токов в цепях обмоток при внезапном
выключении цепей и разомкнутых остальных
обмоток.

Взаимоиндуктивности поперечной цепи с об-
моткой управления и компенсационной обмоткой
определялись по осциллограмме внезапного вклю-
чения поперечной цепи на постоянное напряже-
ние при вращающемся якоре, возбужденной цепи

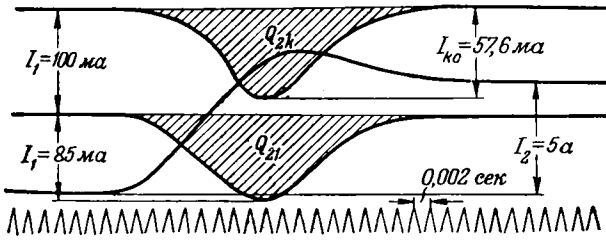


Рис. 2.

управления и замкнутом контуре компенсационной обмотки (рис. 2).

Подсчет взаимоиндуктивностей производился по уравнению для изменяющейся составляющей тока возбуждения или тока в контуре компенсационной обмотки:

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{di_1'}{dt} + r_1 i_1' - M_{21} \frac{di_2}{dt} &= 0, \\ L_k \frac{di_k}{dt} + r_k i_k - M_{2k} \frac{di_2}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\omega_3 = \frac{\{4\alpha(T_1 + T_k)T_2 + 4\alpha k_i(T_{M1}T_{2k} - T_k T_{21}) - [\alpha(T_1 + T_k) + T_2 - k_i T_{21}]\}^{\frac{1}{2}}}{2[(T_1 + T_k)T_2 + k_i(T_{M1}T_{2k} - T_k T_{21})]}. \quad (11)$$

Интегрирование этих уравнений дает:

$$\left. \begin{aligned} M_{21} \int_{r=0}^{\infty} di_2 &= L_1 \int_{t=0}^{\infty} di_1' + r_1 \int_{t=0}^{\infty} i_1' dt, \\ M_{2k} \int_{r=0}^{\infty} di_2 &= L_k \int_{r=0}^{\infty} di_k + r_k \int_{t=0}^{\infty} i_k dt \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

при $t = 0 - i_2 = 0;$

$i_1' = 0; i_k = 0$

и при

$t = \infty - i_2 = i_{2ycm};$

$i_1' = 0; i_k = 0.$

Отсюда взаимоиндуктивности M_{21} и M_{2k} определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} M_{21} &= \frac{Q_{21}r_1}{I_{2ycm}}; \\ M_{2k} &= \frac{Q_{2k}r_k}{I_{2ycm}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Измеренные и подсчитанные взаимоиндуктивности и постоянные времени усилителя 2,5—3 000 при сдвиге щеток попе-

речной цепи по направлению вращения на 5° приведены в таблице:

Постоянная, сек	T_1	T_k	T_2	T_{M1}	T_{Mk}	T_{21}	T_{2k}
Числовое значение	0,0106	0,001	0,017	0,002	0,0057	0,0002	0,0004
α	k_i	$\frac{c_k}{c_1}$	A, сек ²	B, сек	T_3 , сек	$\omega_3, \frac{1}{сек}$	$\frac{1}{T_3}$
0,46	51	0,07	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^2$	0,13

Согласно таблице в уравнении (3) без значительной погрешности можно пренебречь членами и коэффициентами $k_i \frac{c_k}{c_1}$ и подсчитывать эквивалентную постоянную времени и частоту по упрощенным формулам:

$$T_3 = \frac{2(T_1 + T_k)T_2 + k_i(T_{M1}T_{2k} - T_k T_{21})}{\alpha(T_1 + T_k) + T_2 - k_i T_{21}}, \quad (10)$$

Кроме того, ввиду малости коэффициента при $\sin \omega_3 t$ в (6) им можно пренебречь и пользоваться упрощенной формулой:

$$e_3 \approx E_{3ycm} (1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \cos \omega_3 t). \quad (12)$$

На рис. 3 приведены экспериментальные и рассчитанные по (6) и (12) характеристики на

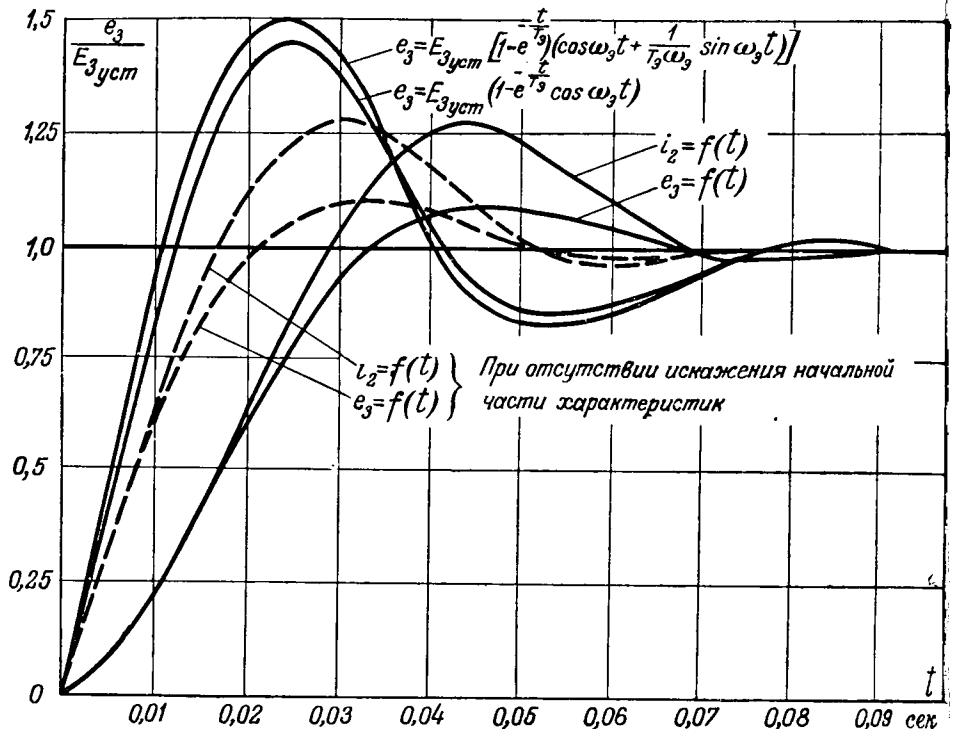


Рис. 3.

тания э. д. с. в усилителе 2,5—3 000 со сдви-
жеток поперечной цепи на 5° по направле-
вращения якоря при внезапном включении
и обмотки управления на постоянное напря-
ание.

Расчетные и экспериментальные кривые
статочко хорошо совпадают по характеру на-
стания э. д. с., но как бы несколько сдвинуты
ни по отношению к другим за счет более
дленного нарастания э. д. с. в начале экспе-
ментальных кривых. Это обстоятельство
значительной мере определяется влиянием не-
ейности сопротивления поперечной цепи (при
менении э. д. с. не от нулевого значения
чальное запаздывание, как показано на рис. 3,
еньшается).

Таким образом, смещение щеток поперечной
ли усилителя по направлению вращения на
большой угол усиливает влияние поперечной
ли на продольную, благодаря этому э. д. с.

при внезапном включении цепи управления на-
растает по тригонометрическому быстрозату-
хающему закону, что обеспечивает значительное
сокращение времени нарастания э. д. с. до но-
минальной величины и повышает эффективность
работы систем с усилителем поперечного поля.

Литература

1. Ю. А. Сабинин. Амплидин и его применение. Электричество, № 10, 1940.
2. Я. С. Эпштейн. Переходные процессы в амплидине. ВЭП, № 1, 2, 1945.
3. М. И. Романов. Теория работы амплидина и области его применения. Электричество, № 11, 12, 1944.
4. В. С. Кулебакин. Основные статические характеристики амплидин-генераторов. Известия АН СССР ОТН, № 6, 1945.
5. Н. М. Якименко. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. Электричество, № 9, 1948.
6. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.

[18.4.1952]



Методы расчета магнитных цепей с учетом магнитного сопротивления стали

Кандидат техн. наук, доц. Б. К. БУЛЬ

Московский энергетический институт им. Молотова

Магнитные цепи весьма широко используются в электрических приборах, аппаратах и различного рода электромагнитных механизмах. Но вопросы их теории и расчета с учетом магнитного сопротивления стали освещены исключи-

тельно слабо. Имеется всего лишь несколько работ, посвященных этому важному вопросу. Наиболее ценные и интересные из них были опубликованы в отечественной литературе нашими учеными: В. И. Коваленковым [Л. 3], Б. С. Сотсковым [Л. 4, 12], Н. А. Лившицем [Л. 6] и И. Н. Шумиловским [Л. 7].

Автор также сделал попытку разработать ряд вопросов теории и расчета магнитных цепей. Проведено исследование на переменном и постоянном токе с учетом сопротивления стали и потоков рассеяния.

Для расчета разработаны два метода: аналитический и графоаналитический. Оба метода применимы к большому числу магнитных цепей приборов и аппаратов различных принципов. Выбор того или иного метода зависит от формы магнитной характеристики стали, величины воздушного зазора и значения n . с.

Аналитический метод предлагается для расчета магнитной цепи, работающей с такой ин-

Предлагаются два метода расчета магнитных цепей:

1) аналитический с использованием комплексных магнитных характеристик стали и теории активного четырехполюсника и 2) графоаналитический, основанный на решении нелинейного дифференциального уравнения второго порядка методом изоклин, для общего случая, когда магнитное сопротивление в функции индукции является переменной величиной. Рассматриваются несколько вариантов расчета и дается числовой пример.

дукцией, при которой магнитное сопротивление стали можно принять постоянной величиной. Графоаналитический метод дает расчет магнитной цепи в самом общем случае, когда магнитное сопротивление в функции индукции

изменяется в больших пределах, иначе говоря, этот метод пригоден для расчета слабо и сильно насыщенных магнитных цепей.

Основные разновидности магнитных цепей, которые будут рассматриваться, представлены на рис. 1, а, б и 3, а.

Магнитная проводимость рассеяния между сердечниками на единицу длины принимается величиной постоянной.

Автор при расчете цепи исходит из магнитных характеристик стали (рис. 2) [Л. 5], из зависимостей удельного активного и реактивного магнитного сопротивления стали ρ_R и ρ_X от индукции B . Эти кривые построены по данным: для стали марки Э1-АА—Н. Н. Шумиловского [Л. 7], типа Армко—М. И. Витенберга [Л. 14], марки ВП-2—А. С. Займовского и В. В. Усова [Л. 15] и для стали Э4А и СТ-1,2 по данным завода „Электроаппарат“. При расчете цепи переменного тока считаем, что поток и ток изменяются по синусоидальному закону.

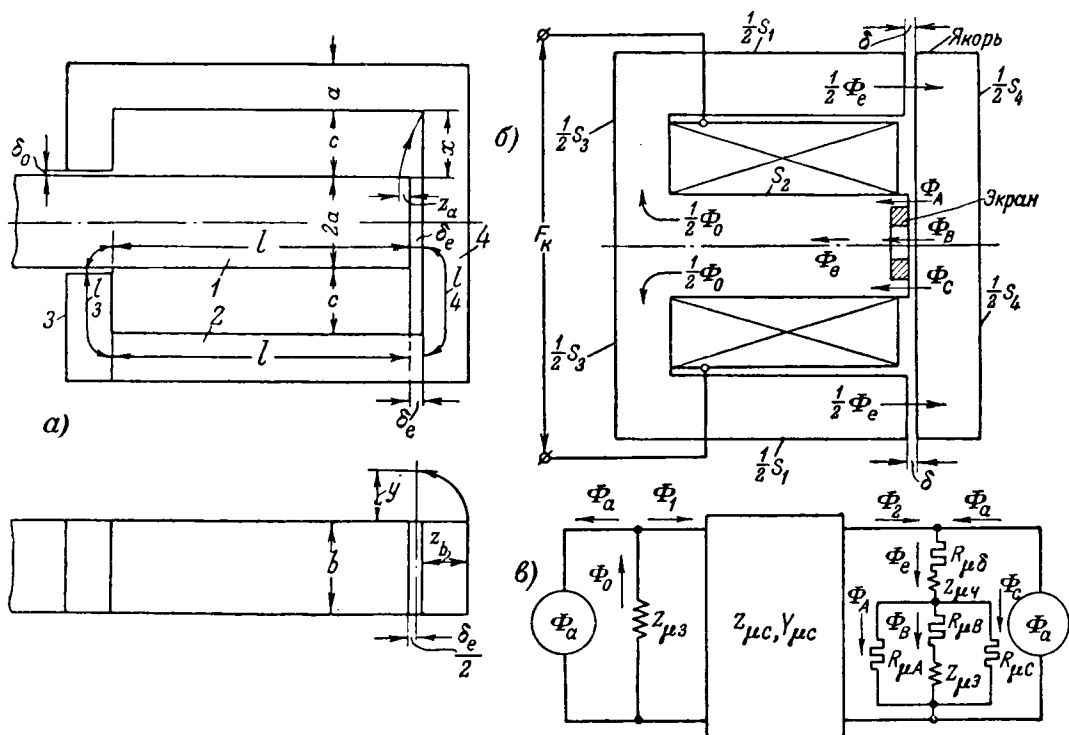


Рис. 1. Магнитные цепи электромагнитов.

а — постоянного тока; б — переменного тока; в — схема замещения цепи (б).

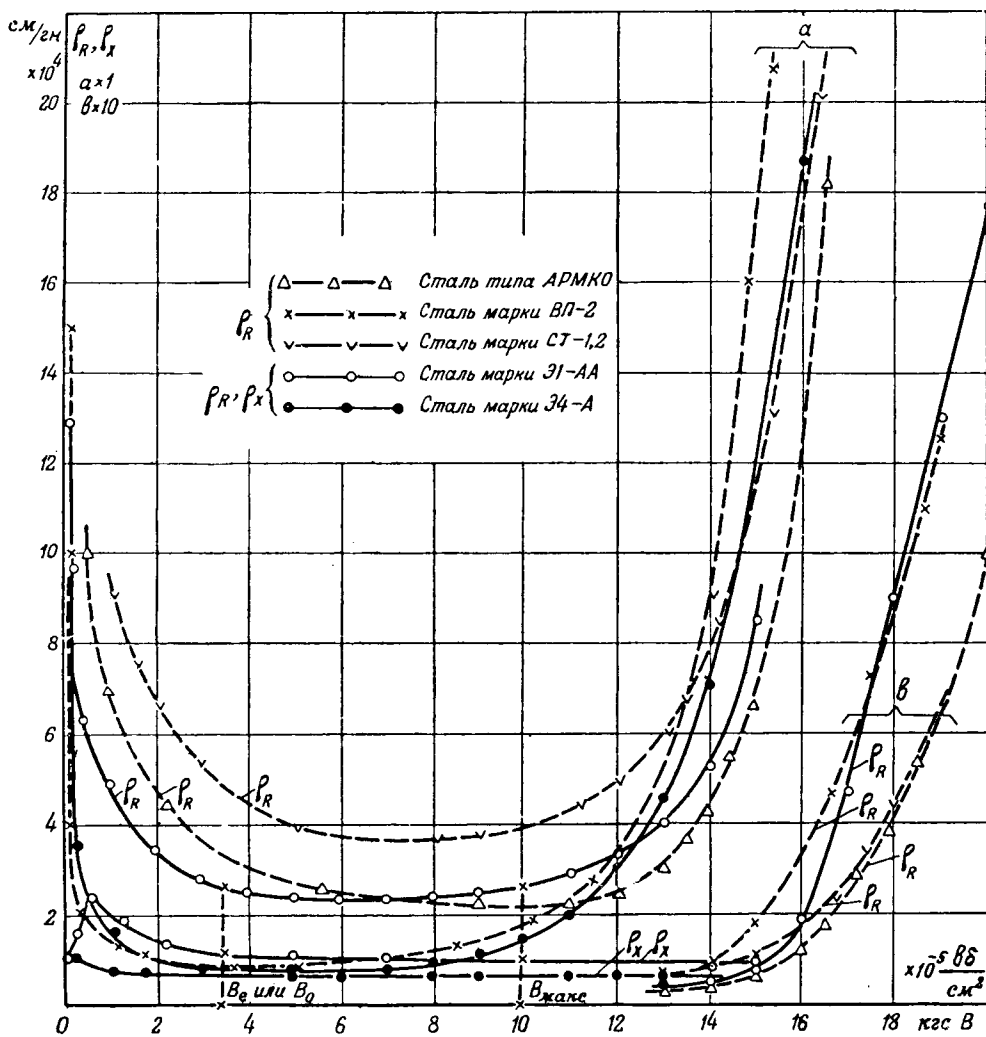


Рис. 2. Кривые удельных активных и реактивных магнитных сопротивлений стали в функции магнитной индукции.

Аналитический метод. Значительное число конструкций электрических приборов и аппаратов имеют такие магнитные цепи, величины воздушных зазоров и н. с., что работа их укладывается в диапазоне индукций с почти постоянным витным сопротивлением. Это и понятно — в этом диапазоне требуется меньше н. с. для пропускания потока по длине магнитопровода. Из введенных на рис. 2 магнитных характеристик видно, что ряд марок стали имеет достаточно широкий диапазон индукций, где ρ_R и ρ_X можно брать постоянными. Так, для стали марки АА постоянство ρ_R и ρ_X сохраняется при изменении индукции примерно от 3,5 до 10 кгс, для стали Э4-А в пределах от 2 до 8 кгс, для стали типа Армко — от 6,5 до 12,5 кгс, для стали П-2 от 2 до 8 кгс и для стали СТ-1,2 от 2 до 10 кгс.

Таким образом, в указанном диапазоне индукций мы вправе применить к расчету магнитных цепей теорию активного четырехполюсника. Для получения схемы замещения и уравнений для расчета магнитной цепи воспользуемся основным положением теории активного четырехполюсника [3]. При постоянной н. с. катушки текущее значение разности магнитных потенциалов между сердечниками и текущее значение магнитного потока вдоль длины сердечника (рис. 4) будет:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_e \operatorname{ch} \sqrt{\frac{g}{l}} Z_\mu (l-x) + (\dot{\Phi}_e - \dot{\Phi}_a) \sqrt{\frac{Z_\mu}{G_\mu}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{g}{l}} Z_\mu (l-x), \quad (1)$$

$$(\dot{\Phi}_x - \dot{\Phi}_a) = \dot{U}_e \sqrt{\frac{G_\mu}{Z_\mu}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{g}{l}} Z_\mu (l-x) + (\dot{\Phi}_e - \dot{\Phi}_a) \operatorname{ch} \sqrt{\frac{g}{l}} Z_\mu (l-x); \quad (2)$$

здесь \dot{U}_e и $\dot{\Phi}_e$ — разность магнитных потенциалов и магнитный поток в конце сердечника при $x=l$, (а и вб);

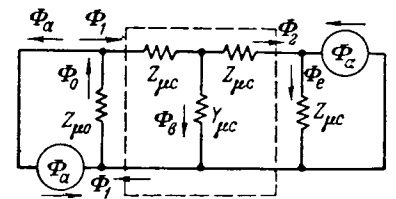
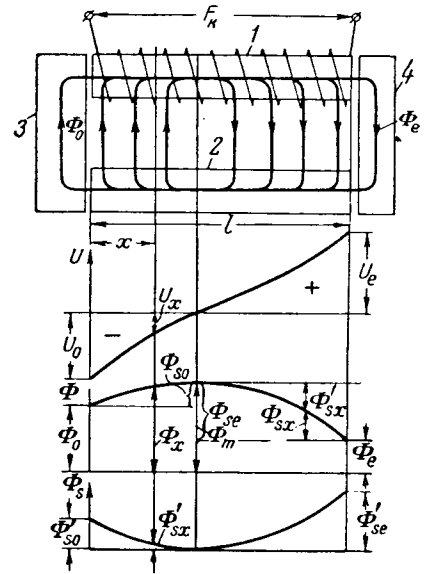


Рис. 4. Магнитная цепь с распределенной н. с. и ее схема замещения.

Z_μ и $Y_\mu = G_\mu$ — полное магнитное сопротивление стали сердечника и полная магнитная проводимость рассеяния между сердечниками, взятая на всю длину сердечника l , ($\frac{1}{2H}$ и $2H$):

$$Z_\mu = Z_{\mu 1} + Z_{\mu 2} = \dot{\rho}_{z1} \frac{l_1}{S_1} + \dot{\rho}_{z2} \frac{l_2}{S_2};$$

$$Y_\mu = G_\mu = gl; \quad l = l_1 = l_2,$$

где $Z_{\mu 1}$ и $Z_{\mu 2}$ — полные магнитные сопротивления сердечников 1 и 2;

g — магнитная проводимость рассеяния на единицу длины между сердечниками;

S_1 и S_2 — площади сечения сердечников, см^2 .

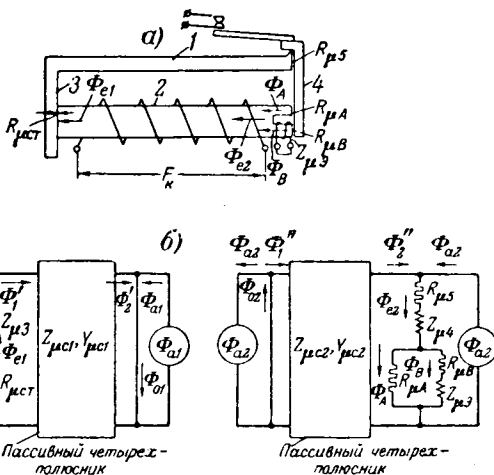
Намагничивающая сила катушки $F_k = \dot{\Phi}_a Z_\mu$.

Комплексное значение удельных магнитных сопротивлений стали сердечников ρ_{z1} и ρ_{z2} определяем через активные и реактивные магнитные сопротивления:

$$\rho_{z1} = \rho_{R1} + j\rho_{X1} \quad \text{и} \quad \rho_{z2} = \rho_{R2} + j\rho_{X2}.$$

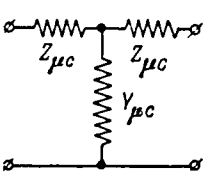
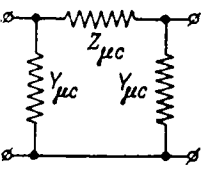
Значения ρ_{R1} , ρ_{R2} , ρ_{X1} и ρ_{X2} берем из магнитных характеристик стали при заданных индукциях в сердечниках (рис. 2).

Автор, пользуясь известными соотношениями [Л. 1, 2] между постоянными четырехполюсника и элементами схемы замещения, получил для Т- и П-образной схемы расчетные уравнения для комплексного магнитного сопротивления схемы $Z_{\mu с}$ и комплексной магнитной проводимости схемы $Y_{\mu с}$, которые выражены через постоянные параметры магнитной цепи R_μ , X_μ и G_μ (табл. 1).



3. Расчетная схема замещения реле переменного тока с поворотным ярком.

Расчетные уравнения магнитных сопротивлений и проводимостей схемы замещения магнитной цепи

Тип схемы замещения	Полное магнитное сопротивление схемы четырехполюсника и его составляющие		Полная проводимость схемы замещения четырехполюсника и ее составляющие	
	более точно	приближенно	более точно	приближенно
	$Z_{\mu c} = R_{\mu c} + jX_{\mu c}$ $R_{\mu c} = \frac{R_{\mu}}{2} - \frac{G_{\mu}}{24} (R_{\mu}^2 - X_{\mu}^2)$ $X_{\mu c} = \frac{X_{\mu}}{2} \left(1 - \frac{R_{\mu} G_{\mu}}{6}\right)$	$Z_{\mu c} = \frac{1}{2} Z_{\mu} = \frac{1}{2} (R_{\mu} + jX_{\mu})$ $R_{\mu c} = \frac{R_{\mu}}{2}$ $X_{\mu c} = \frac{X_{\mu}}{2}$	$Y_{\mu c} = g_{\mu c} - jb_{\mu c}$ $g_{\mu c} = G_{\mu} \left(1 + \frac{R_{\mu} G_{\mu}}{6}\right)$ $b_{\mu c} = -\frac{G_{\mu}^2 X_{\mu}}{6}$	$Y_{\mu} = G_{\mu}$ $g_{\mu} = G_{\mu}$ $b_{\mu} = 0$
	$Z_{\mu c} = R_{\mu c} + jX_{\mu c}$ $R_{\mu c} = R_{\mu} + \frac{1}{6} G_{\mu} (R_{\mu}^2 - X_{\mu}^2)$ $X_{\mu c} = X_{\mu} \left(1 + \frac{1}{3} G_{\mu} R_{\mu}\right)$	$Z_{\mu} = R_{\mu} + jX_{\mu}$ $R_{\mu c} = R_{\mu}$ $X_{\mu c} = X_{\mu}$	$Y_{\mu c} = g_{\mu c} - jb_{\mu c}$ $g_{\mu c} = \frac{G_{\mu}}{2} \left(1 - \frac{G_{\mu} R_{\mu}}{12}\right)$ $b_{\mu c} = \frac{G_{\mu}^2 X_{\mu}}{24}$	$Y_{\mu} = \frac{G_{\mu}}{2}$ $g_{\mu} = \frac{G_{\mu}}{2}$ $b_{\mu} = 0$

Необходимо отметить, что для ряда конструкций магнитных систем, выполненных из электротехнических сталей, $Z_{\mu c}$ и $Y_{\mu c}$ можно определять по приближенным уравнениям с достаточной для практики точностью (табл. 1). В тех случаях, когда магнитная цепь сделана из стали с высокими потерями, например цепь индукционно-тепловой реле, или если она работает при повышенной частоте, расчет следует вести по более точным уравнениям.

При $x=0$ уравнения (1) и (2) представим через постоянные четырехполюсника A , B и C :

$$\begin{aligned} \dot{U}_o &= A U_e + B (\dot{\Phi}_e - \dot{\Phi}_a); \\ (\dot{\Phi}_o - \dot{\Phi}_a) &= C U_e + A (\dot{\Phi}_e - \dot{\Phi}_a). \end{aligned} \quad (3)$$

Для составления схемы замещения положим:

$$\dot{\Phi}_o = \dot{\Phi}_a + \dot{\Phi}_1 \quad \text{и} \quad \dot{\Phi}_e = \dot{\Phi}_a + \dot{\Phi}_2. \quad (4)$$

Тогда уравнение (3) будет:

$$\dot{U}_o = A \dot{U}_e + B \dot{\Phi}_2; \quad \dot{\Phi}_1 = C \dot{U}_e + B \dot{\Phi}_2, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_o &= -\dot{\Phi}_o Z_{\mu o}; \quad \dot{U}_e = \dot{\Phi}_e Z_{\mu e}; \\ Z_{\mu o} &= R_{\mu o} + Z_{\mu 3}; \quad Z_{\mu e} = R_{\mu e} + Z_{\mu 4}; \end{aligned}$$

$Z_{\mu o}$, $Z_{\mu e}$ — магнитные сопротивления нагрузок концов цепи.

В результате получим уравнения пассивного четырехполюсника с входным и выходным потоками $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_2$. На основании уравнений (4) — (5) составлена схема замещения магнитной цепи (рис. 4).

Таким образом, магнитная цепь с распределенной н. с. вдоль длины сердечника представлена нами в виде схемы замещения с пассивным четырехполюсником, на концах которого включены нагрузки $Z_{\mu o}$ и $Z_{\mu e}$ и сосредоточены источники потока $\dot{\Phi}_a$, заменяющие распределенную н. с. катушки \dot{F}_k , которая связана с $\dot{\Phi}_a$ и магнитным сопротивлением сердечника 1 и 2 Z_{μ} уравнением $\dot{F}_k = \dot{\Phi}_a Z_{\mu}$.

Пользуясь схемой замещения, можно получить расчетные уравнения для потоков $\dot{\Phi}_o$, $\dot{\Phi}_1$ и $\dot{\Phi}_2$, выраженных через н. с. катушки и конструктивные параметры магнитной цепи, с учетом сопротивления стали:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_o &= \frac{\dot{\Phi}_a Z_{\mu c}}{Z_{\mu n}} (\zeta + Z_{\mu e} Y_{\mu c}); \quad \dot{\Phi}_e = \frac{\dot{\Phi}_a Z_{\mu c}}{Z_{\mu n}} (\zeta + Z_{\mu o} Y_{\mu c}); \\ \zeta &= 2 + Z_{\mu c} Y_{\mu c}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_b &= \frac{\dot{\Phi}_a Z_{\mu c} Y_{\mu c}}{Z_{\mu n}} (Z_{\mu e} - Z_{\mu o}); \quad Z_{\mu n} = (Z_{\mu c} + Z_{\mu o}) + \\ &+ (Z_{\mu c} + Z_{\mu e}) (\zeta - 1 + Y_{\mu c} Z_{\mu o}). \end{aligned} \quad (7)$$

Для ряда магнитных систем (рис. 1,б, 3,а) можно с достаточной для практики точностью положить $\dot{Z}_{\mu o} = 0$. Тогда (6), (7) переписываются в виде:

$$\dot{\Phi}_m = \dot{\Phi}_m = \frac{\dot{\Phi}_a Z_{\mu c}}{Z_{\mu m}} (\zeta + Z_{\mu e} Y_{\mu c}); \quad \dot{\Phi}_e = \zeta \frac{\dot{\Phi}_a Z_{\mu c}}{Z_{\mu m}}; \quad (8)$$

$$\dot{\Phi}_{se} = \dot{\Phi}_b = \frac{\dot{\Phi}_a}{Z_{\mu m}} \dot{Y}_{\mu c} Z_{\mu e} Z_{\mu c};$$

$$Z_{\mu m} = \dot{\zeta}(Z_{\mu c} + Z_{\mu e}) - Z_{\mu e}; \quad \dot{F}_k = \dot{\Phi}_a Z_{\mu}. \quad (9)$$

Под расчета магнитной цепи с распределенн. с. при $Z_{\mu o} = 0$ сводится, таким образом, к следующему:

При заданных размерах $l_1, l_3, l_4, S_1, S_2, S_3, S_4$ и δ_e и заданной величине индукции B_e или B_m по рис. 2 находим ρ_R и ρ_X . Затем определяем Z_{μ} , $Z_{\mu e}$ и G_{μ} . Используя табл. 1, находим $\dot{Y}_{\mu c}$ и $Z_{\mu m}$. Пользуясь (8), (9), определяем (при заданном B_e) или $\dot{\Phi}_e$ (при заданном B_m), ж рассеяния Φ_{se} и н. с. катушки F_k . Откладывая заданную величину потока Φ_e или Φ_m по вещественной оси комплексной плоскости, получим необходимые сдвиги фаз между определенными векторами.

Если в (8), (9) положить магнитное сопротивление стали $Z_{\mu} = 0$, то эти уравнения приобретут уже известных в литературе соотношений [10,19]:

$$\Phi_o = F_k \left(\frac{1}{R_{\mu e}} + \frac{1}{2} G_{\mu} \right);$$

$$\Phi_e = \frac{F_k}{R_{\mu e}} \quad \text{и} \quad \Phi_{se} = \frac{1}{2} F_k G_{\mu}.$$

Уравнения (8) дают только начальное и конечные значения магнитного потока.

Для определения максимального значения потока и его координат необходимо магнитную цепь с двумя воздушными зазорами δ_0 и δ_e (рис. 5 и 1,а) или с большим сопротивлением стали Z_{μ} разбить на две эквивалентные, причем можно раздела провести там, где поток имеет максимум, а разность магнитных потенциалов равна нулю. Для замыкания потока в каждую ветвь вводим ярмо с магнитным сопротивлением, равным нулю: $Z_{\mu o1} = Z_{\mu o2} = 0$. Каждая из указанных магнитных цепей имеет свою н. с. F_{k1} и F_{k2} которые в сумме должны дать полную н. с. катушки $\dot{F}_k = \dot{F}_{k1} + \dot{F}_{k2}$.

Текущее значение \dot{U}_x и $\dot{\Phi}_x$ вдоль длины сердечников, выраженное через $\dot{\Phi}_a$, и конструктивные постоянные магнитной цепи определяем из уравнений:

$$\dot{U}_x = \dot{\Phi}_a \left[\dot{N}_1 \operatorname{ch} \sqrt{G_{\mu} Z_{\mu}} \left(1 - \frac{x}{l} \right) - \dot{N}_2 \sqrt{\frac{Z_{\mu}}{G_{\mu}}} \operatorname{sh} \sqrt{G_{\mu} Z_{\mu}} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right]; \quad (10)$$

$$\dot{\Phi}_x = \dot{\Phi}_a \left[1 - \dot{N}_2 \operatorname{ch} \sqrt{G_{\mu} Z_{\mu}} \left(1 - \frac{x}{l} \right) + \dot{N}_1 \sqrt{\frac{G_{\mu}}{Z_{\mu}}} \operatorname{sh} \sqrt{G_{\mu} Z_{\mu}} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right]; \quad (11)$$

$$\dot{N}_1 = \frac{Z_{\mu e} Z_{\mu c}}{Z_{\mu n}} (\dot{\zeta} + Z_{\mu o} \dot{Y}_{\mu c});$$

$$\dot{N}_2 = \frac{1}{Z_{\mu n}} [Z_{\mu o} + Z_{\mu e} (\dot{\zeta} + Z_{\mu o} \dot{Y}_{\mu c} - 1)].$$

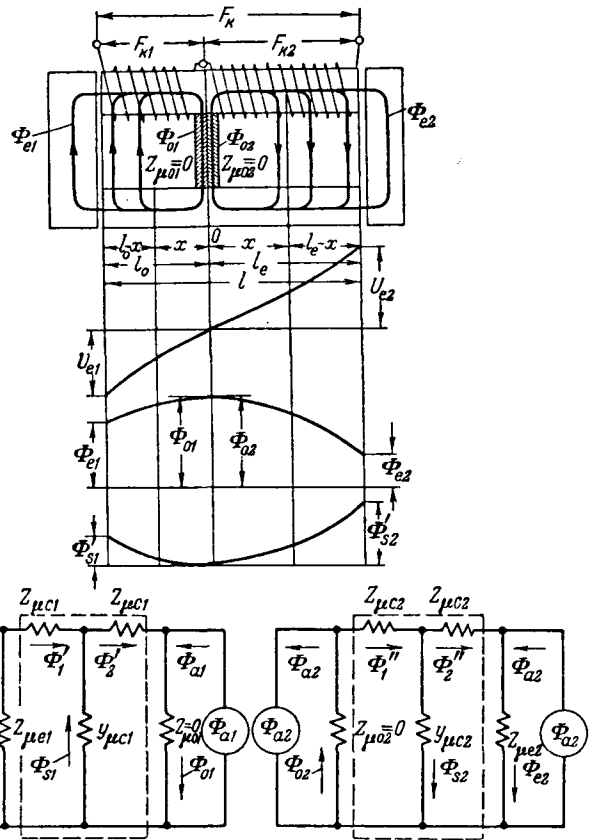


Рис. 5. Две магнитные цепи, в сумме эквивалентные цепи рис. 4 и ее схемы замещения.

Координату максимума потока Φ_m можем определить из (10), полагая $U_x = 0$:

$$\sqrt{\frac{Z_{\mu}}{G_{\mu}}} \operatorname{tg} h \sqrt{G_{\mu} Z_{\mu}} k = \frac{\dot{N}_1}{\dot{N}_2};$$

здесь

$$k = \frac{l - l_o}{l} = \frac{l_e}{l}.$$

Гиперболический тангенс разложим в ряд:

$$\operatorname{tg} h \sqrt{G_{\mu} Z_{\mu}} k = (G_{\mu} Z_{\mu})^{\frac{1}{2}} k - (G_{\mu} Z_{\mu})^{\frac{3}{2}} \frac{k^3}{3} + \dots$$

Как показывают численные расчеты распространенных конструкций магнитных систем приборов и аппаратов, выполняемых из электротехнических сталей, в указанном разложении можно ограничиться первым членом; тогда

$$k = \frac{l_e}{l} = \left| \frac{Z_{\mu e} Z_{\mu c} (\dot{\zeta} + Z_{\mu o} \dot{Y}_{\mu c})}{Z_{\mu} [Z_{\mu o} + Z_{\mu e} (\dot{\zeta} + Z_{\mu o} \dot{Y}_{\mu c} - 1)]} \right|. \quad (12)$$

В том случае, когда сопротивление стали не учитывается, уравнение (12) напишется в виде уже известного в литературе [Л.8,10]:

$$\begin{aligned} l_e &= l \frac{Z_{\mu e} + \frac{1}{2} Z_{\mu o} G_{\mu} Z_{\mu e}}{Z_{\mu o} + Z_{\mu e} + G_{\mu} Z_{\mu o} Z_{\mu e}} = \\ &= l \frac{G_o + \frac{1}{2} G_{\mu}}{G_e + G_o + G_{\mu}}; \quad Z_{\mu e} = \frac{1}{G_e}; \quad Z_{\mu o} = \frac{1}{G_o}. \end{aligned}$$

Таким образом, (12) является более общим уравнением. Оно позволяет при заданной длине l и известном значении k определить l_e , т. е. знать положение Φ_m и $U_x = 0$.

Пользуясь (8), (9), для каждой магнитной цепи с Т-образной схемой замещения можно написать расчетные формулы. Для первой цепи:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{e1} &= \dot{U}_o = \frac{\Phi_{a1}}{Z_{\mu m1}} \dot{i}_1 Z_{\mu e} Z_{\mu c1}; \\ \Phi_{o1} = \Phi_{o2} = \Phi_m &= \frac{\Phi_{a1}}{Z_{\mu m1}} Z_{\mu c1} (\dot{i}_1 + Z_{\mu e1} \dot{Y}_{\mu c1}); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Phi_{e1} = \Phi_o = \frac{\Phi_{a1}}{Z_{\mu m1}} \dot{i}_1 Z_{\mu c1};$$

$$\Phi_{s1} = \Phi_{s0} = \frac{\Phi_{a1}}{Z_{\mu m1}} Z_{\mu c1} Z_{\mu e1} \dot{Y}_{\mu c1}; \quad (14)$$

$$\dot{F}_{\kappa 1} = \dot{\Phi}_{a1} Z_{\mu 1}.$$

Для второй магнитной цепи уравнения будут иметь аналогичный вид, следует только индекс 1 заменить на 2.

Здесь приняты следующие обозначения:

$$Z_{\mu e1} = Z_{\mu o} = R_{\mu o} + \dot{p}_z \frac{l_3}{S_3};$$

$$Z_{\mu e2} = Z_{\mu e} = R_{\mu e} + \dot{p}_z \frac{l_4}{S_4}; \quad (15)$$

$$Z_{\mu 1} = \dot{p}'_{z1} \frac{l_o}{S_1} + \dot{p}'_{z2} \frac{l_o}{S_2}; \quad Y_{\mu c1} = G_{\mu 1} = gl_o; \quad (16)$$

$$Z_{\mu 2} = \dot{p}''_{z1} \frac{l_e}{S_1} + \dot{p}''_{z2} \frac{l_e}{S_2}; \quad Y_{\mu c2} = G_{\mu 2} = gl_e; \quad (17)$$

$$Z_{\mu m1} = \dot{i}_1 (Z_{\mu c1} + Z_{\mu e1}) - Z_{\mu e1};$$

$$\dot{i}_1 = 2 + Z_{\mu c1} \dot{Y}_{\mu c1}; \quad (18)$$

$$Z_{\mu m2} = \dot{i}_2 (Z_{\mu c2} + Z_{\mu e2}) - Z_{\mu e2};$$

$$\dot{i}_2 = 2 + Z_{\mu c2} \dot{Y}_{\mu c2}. \quad (19)$$

Рассмотрим ход расчета магнитной цепи, имеющей два воздушных зазора δ_o и δ_e .

Положим, что даны размеры магнитной цепи (рис. 1, а; 4): l , l_3 , l_4 , S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , δ_e и δ_o и индукция в воздушном зазоре B_e . Требуется определить Φ_o , Φ_m , F_{κ} , Φ_{so} , Φ_{se} , l_o и l_e .

1) По индукции $|B_e|$ определяем из кривых рис. 2 значение ρ_R и ρ_X .

2) Пользуясь уравнениями табл. 1 и (15), находим из (12) значение $k = \frac{l_e}{l}$. Из уравнения $l_o = l - l_e$ определяем l_o . Зная l_e и l_o по (16)... (19), подсчитываем магнитные сопротивления $Z_{\mu 1}$, $Z_{\mu 2}$, $Z_{\mu c2}$, $Z_{\mu m1}$, $Z_{\mu c1}$, $Z_{\mu m2}$.

3) Совмещая с вещественной осью $|\dot{\Phi}_e| = |\dot{B}_e| S_1 = |\dot{\Phi}_{e2}|$, из (14) определяем по величине и фазе Φ_{a2} и $F_{\kappa 2}$. Величина Φ_{a2} дает возможность найти $\Phi_{o2} = \Phi_m$, U_{e2} [уравнение (13)] и Φ_{se} [уравнение (14)].

4) Так как максимумы потоков двух магнитных систем совпадают, то из (13) становится известным $\dot{\Phi}_{a1}$. Зная Φ_{a1} , легко найти \dot{U}_{e1} , $\dot{\Phi}_{so}$ и $\dot{F}_{\kappa 1}$.

5) Полная н. с. катушки определяется уравнению:

$$\dot{F}_{\kappa} = \dot{F}_{\kappa 1} + \dot{F}_{\kappa 2}.$$

Ход расчета будет тот же и в том случае, когда вместо $|\dot{B}_e|$ задано $|\dot{B}_o|$.

Если задано максимальное значение индукции

$$|\dot{B}_m| = \frac{|\Phi_m|}{S_1} = \frac{|\Phi_{o1}|}{S_1} = \frac{|\Phi_{o2}|}{S_2},$$

то также находим $\dot{Z}_{\mu c}$, Z_e , $Y_{\mu} Z_{\mu e}$, $Z_{\mu o}$, l_e , l_o . Затем по $|\Phi_{o1}| = |\Phi_{o2}|$ определяем остальные величины.

Расчет магнитной цепи легко проводить также, когда даны ампервитки катушки F_{κ} , размеры сердечников и δ_o . Задаваясь $|B_o|$, определяем $\dot{\Phi}_e$, $\dot{\Phi}_m$, $\dot{\Phi}_{se}$, $\dot{\Phi}_{so}$ и $Z_{\mu e}$.

В этом случае величина воздушного зазора δ_e (или $Z_{\mu e}$) должна быть вполне определена, поскольку известны F_{κ} и $|\dot{\Phi}_o|$.

В тех случаях, когда зазор δ_o мал или равен нулю (рис. 1, а, б), разница между Φ_m и Φ_o так мала. Если, например, взять значение B_o (рис. для стали Э1-АА порядка 4...5 кгс, то B_m выходит за пределы индукций, при которых ρ_R и ρ_X постоянны.

Значения потоков Φ_o и Φ_e определяются (8). Величины же $Z_{\mu o}$ и $Z_{\mu e}$ надо определять из конструкций (рис. 1, а и б) соответственно из уравнений:

$$Z_{\mu o} = R_{\mu 3} + R_{\mu o}; \quad Z_{\mu e} = R_{\mu 4} + R_{\mu e};$$

$$Z_{\mu o} = Z_{\mu 3}; \quad Z_{\mu e} = R_{\mu \delta} + Z_{\mu 4} +$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{R_{\mu A}} + \frac{1}{R_{\mu c}} + \frac{1}{R_{\mu B} + Z_{\mu \delta}}}; \quad (20)$$

здесь $R_{\mu \delta}$, $R_{\mu A}$, $R_{\mu B}$, $R_{\mu c}$, $Z_{\mu \delta}$ — магнитные сопротивления соответственно воздушных зазоров и экрана (рис. 1, б).

Когда разницу между Φ'_m и Φ_e или Φ_o оценить трудно, следует рассматривать как одну магнитную цепь (рис. 1, а, б и 3), состоящую из двух эквивалентных независимых цепей так, как это было показано ранее (рис. 5). При этом формулы и порядок расчета остается тот же самый. Что касается сопротивлений нагрузки одного конца эквивалентных цепей (нагрузка другого конца равны нулю), то они определяются согласно конфигурации магнитной цепи. Для примера на рис. 3 приведена схема замещения реле переменного тока с поворотным якорем где

$$Z_{\mu e1} = R_{\mu c m} + Z_{\mu 3} \quad \text{и} \quad Z_{\mu e2} = R_{\mu 5} + Z_{\mu 4} +$$

$$+ \frac{R_{\mu A} (R_{\mu B} + Z_{\mu \delta})}{R_{\mu A} + R_{\mu B} + Z_{\mu \delta}}. \quad (21)$$

Таким образом, замена одной цепи двумя эквивалентными дает полный расчет магнитной цепи, позволяет точно знать, кроме Φ_o и Φ_e , точные пределы индукций и определить величину и расположение максимального потока в сердечнике. Полученные схемы замещения и расчетные формулы позволяют также провести анализ влияния температуры и частоты на работу электромагнитных механизмов переменного тока [9,13].

Реактивное магнитное сопротивление стали переменной частоте будет выражаться уравнением [Л.5]:

$$\rho_{Xf} = \rho_X - \rho_{Xo} \left(1 - \frac{f}{f_o}\right); \quad (23)$$

Здесь ρ_X — находится из рис. 2 при заданной индукции и частоте $f_o = 50$ гц, ρ_{Xo} — реактивное железо магнитное сопротивление, определяемое вихревыми токами в стали, оно с изменением частоты остается постоянным и равняется для стали марки Э1-АА $\rho_{Xo} = 0,3410^4$ см/гн.

Графоаналитический метод. Для магнитной цепи с распределенной н. с. имеем дифференциальные уравнения:

$$-\frac{d\Phi_x}{dx} = gU_x; \quad (24)$$

$$\frac{dU_x}{dx} = f_\kappa - \Phi_x \left[\frac{1}{S_1} \rho_{R1}(B_{x1}) + \frac{1}{S_2} \rho_{R2}(B_{x2}) \right]; \quad (25)$$

Здесь x — координата рассматриваемого сечения по длине магнитопровода (рис. 4);

Φ_x и U_x — магнитный поток в сердечнике и разность магнитных потенциалов между сердечниками 1 и 2 при координате x ;

g — удельная проводимость рассеяния между сердечниками 1 и 2 в предположении, что она не зависит от координаты x ;

f_κ — н. с. катушки на единицу длины сердечника $f_\kappa = \frac{F_\kappa}{l}$;

S_1 и S_2 — площади сечения сердечников; $\rho_{R1}(B_{x1})$ и $\rho_{R2}(B_{x2})$ — удельные активные магнитные сопротивления стали сердечников, величина которых зависит от индукции. Все величины взяты в практической системе единиц.

Дифференцируя (24) и подставляя в (25), имеем:

$$-\frac{1}{g} \frac{d^2\Phi_x}{dx^2} = f_\kappa - \Phi_x \left[\frac{1}{S_1} \rho_{R1}(B_{x1}) + \frac{1}{S_2} \rho_{R2}(B_{x2}) \right]. \quad (26)$$

Таким образом, связь между потоком Φ_x и координатой x выражается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка.

Для простоты рассмотрения возьмем сердечник из одного и того же материала и равного сечения. Тогда (26) принимает вид:

$$-\frac{1}{g} \frac{d^2\Phi_x}{dx^2} = f_\kappa - \frac{2\Phi_x}{S} \rho_X(B_x). \quad (27)$$

Для решения этого дифференциального уравнения пользуемся методом изоклин — приближенного численного интегрирования.

Как известно [Л. 16...18], изоклиной называется геометрическое место точек, в которых касательные ко всем интегральным кривым параллельны, иначе говоря, имеют одинаковый наклон: $Q = \text{tg } \alpha = \text{const}$. Имея семейство изоклин, весьма просто построить интегральные кривые. При достаточной густоте сетки изоклин точность решения дифференциального уравнения получается вполне достаточной.

Связь между удельным магнитным сопротивлением и индукцией представим в аналитическом виде [Л.5]. Так, для стали марки Э1-АА можем взять выражение:

$$\rho_R(B_x) = \sqrt{\frac{\gamma S}{B_x(S - \beta \Phi_x)}}, \quad (28)$$

где γ и β — постоянные коэффициенты.

Подставив (28) в (27), получим:

$$-\frac{d^2\Phi_x}{dx^2} = g f_\kappa - 2g \sqrt{\frac{\gamma \Phi_x}{S - \beta \Phi_x}}. \quad (29)$$

В этом уравнении поток Φ_x и производную потока по длине сердечника выразим через координаты y и z :

$$y = m_1 \Phi_x; \quad z = -m_2 \frac{d\Phi_x}{dx} \quad \text{и} \quad \frac{dz}{dy} = \text{tg } \alpha = Q;$$

здесь m_1 и m_2 — единица масштаба магнитного потока Φ_x и его производной

$\frac{d\Phi_x}{dx}$ по длине сердечника.

Так как

$$\frac{d^2\Phi_x}{dx^2} = -\frac{1}{m_2} \frac{dz}{dx} \quad \text{и} \quad \frac{dz}{dx} = \frac{dz}{dy} \frac{dy}{dx} = -\frac{m_1}{m_2} z Q, \quad \text{то} \quad \frac{d^2\Phi_x}{dx^2} = \frac{m_1}{m_2^2} z Q. \quad (30)$$

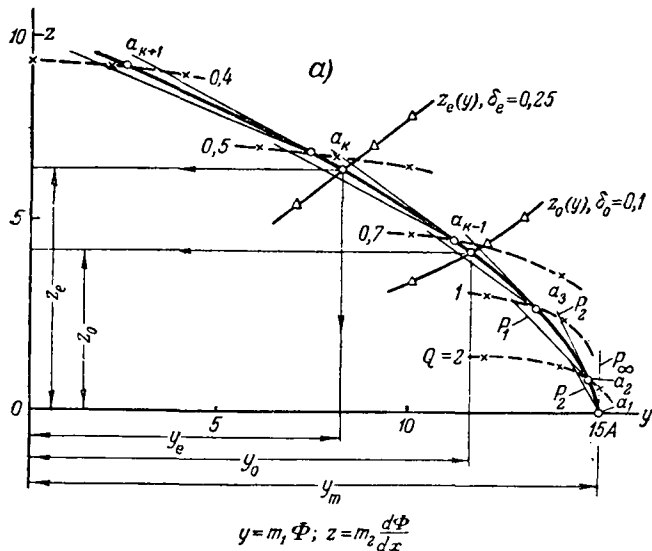
Из (28) и (30) получаем уравнение изоклин

$$z = -\frac{m_2^2 g}{m_1 Q} \left[f_\kappa - 2 \sqrt{\frac{\gamma}{\left(\frac{S m_1}{y} - \beta\right)}} \right]. \quad (31)$$

Чтобы построить по (31) семейство изоклин, необходимо задаться значением тангенса угла наклона касательной к интегральной кривой $Q = \text{tg } \alpha$. Рассмотрим вариант, когда:

Дано f_κ , Φ_m , S , S_3 , S_4 , l_3 , l_4 , $R_{\mu o}$, $R_{\mu e}$, требуется определить Φ_e , Φ_{so} , Φ_{se} , l , x_o , x_e и F_κ .

На рис. 6,а дано построение изоклин (пунктирные кривые) для положительного значения Q . При отрицательном значении Q изоклины будут зеркальным отображением предыдущих. На рис. 6,б проведено построение лучей при различ-



$$y = m_1 \Phi; z = m_2 \frac{d\Phi}{dx}$$

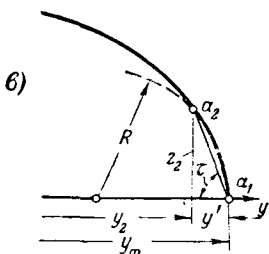
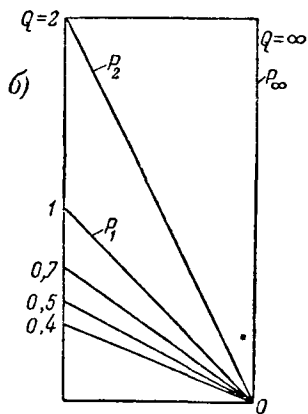


Рис. 6. Кривые для определения Φ_0 и Φ_e по заданному Φ_m при различных нагрузках на концах магнитопровода с распределенной н. с.

ных значениях Q . Заметим, что весь расчет по (31) прост. Действительно, подсчитав одну изоклину $z=f(y)$, достаточно простым делением на Q можно получить остальные. Кроме этого, при данном Q нет необходимости подсчитывать все точки в промежутке от $y=0$ до $y=y_m$, надо ограничиться только минимумом, позволяющим провести плавно изоклину (см. ниже табл. 2 примера).

При наличии семейства изоклин построение интегральной кривой не представляет особого труда. Построение начинаем с точки A (рис. 6, а). Проводим из этой точки два луча P_∞ и P_2 , параллельных аналогичным лучам рис. 6, б. Луч P_∞ принадлежит изоклине, которая совпадает с осью y и имеет $\text{tg } \alpha = \infty$ (угол $\alpha = 90^\circ$). Другой луч P_2 относится к изоклине с $\text{tg } \alpha = Q = 2$. На изоклине с $Q = 2$ берем точку a_2 , расположенную, примерно, посередине между лучами P_∞ и P_2 . Через точки a_1 и a_2 и будет проходить интегральная кривая. Из a_2 , аналогично предыдущему, проводим лучи P_2 и P_1 соответственно значениям $Q = 2$ и $Q = 1$ пересечения с изоклиной I , и берем также точку a_3 , примерно, посередине между этими лучами. При достаточно близком расстоянии изоклин друг от друга отрезок изоклины, отсекаемый двумя лучами, можно сделать малых размеров.

Проведя подобные построения, находим a_{k-1} , a_k и т. д. Соединяя их плавной кривой получим интегральную кривую $z = \varphi(y)$ (сплошная кривая). По этой кривой довольно просто определить изменение магнитного потока Φ по длине сердечника x . Заменим интегральную кривую $z = \varphi(y)$ (рис. 6, а) рядом прямых участков.

Уравнение прямой, проходящей через точки кривой $z(y)$, как известно, будет:

$$z - z_k = \frac{y_{k+1} - z_k}{y_k - y_{k+1}} (y - y_k);$$

$$z = \frac{m_2}{m_1} \frac{dy}{dx} = \frac{y(z_{k+1} - z_k) - (y_k z_{k+1} - z_k y_{k+1})}{y_k - y_{k+1}}$$

Тогда элемент длины магнитопровода между точками a_k и a_{k+1} кривой $y=f(x)$ будет (рис. 7),

$$\Delta x_k = \frac{m_2}{m_1} \int_{y_{k+1}}^{y_k} \frac{(y_k - y_{k+1}) dy}{(z_{k+1} - z_k)y + (y_{k+1}z_k - z_k y_{k+1})} = \frac{m_2(y_k - y_{k+1})}{m_1(z_{k+1} - z_k)} \ln \frac{z_{k+1}}{z_k} \quad (32)$$

По этому уравнению можно подсчитать длину элементов, начиная только с Δx_2 , так как длина первого участка Δx_1 равно бесконечности. Заменив участок интегральной кривой $a_1 a_2$ частью окружности с радиусом R и центром на оси y (рис. 6, б) приближенно определим:

$$\Delta x_1 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{2y'}{z_2} \sin \tau \quad (33)$$

Полученная, таким образом, кривая $y = \varphi(x)$ показывает изменение магнитного потока вдоль длины сердечника. Причем начало координат мы расположили в точке магнитопровода, где поток имеет максимальное значение (рис. 7).

Для того чтобы определить значение потока на концах магнитной системы Φ_0 и Φ_e , необходимо

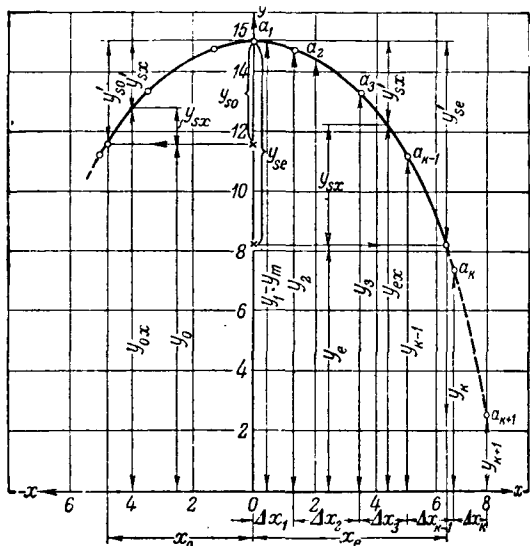


Рис. 7. Изменение магнитного потока вдоль длины магнитопровода для случая с распределенной н. с.

ать величины магнитных сопротивлений воздушных зазоров у ярма $R_{\mu o}$ и якоря $R_{\mu e}$, а также магнитного сопротивления стали ярма $R_{\mu 3}$ и якоря $R_{\mu 4}$ (рис. 4).

Сопротивления $R_{\mu o}$ и $R_{\mu e}$ можно определить по формулам, хорошо описанному в литературе [9, 10] а сопротивления стали указанных участков — по уравнениям [Л.5]:

$$R_{\mu 3} = \rho_{R3} \frac{l_3}{S_3} = l_3 \sqrt{\frac{\gamma}{\Phi(S_3 - \beta\Phi)}}; \\ R_{\mu 4} = \rho \frac{l_4}{S_4} = l_4 \sqrt{\frac{\gamma}{\Phi(S_4 - \beta\Phi)}}; \quad (34)$$

где l_3 , l_4 , S_3 и S_4 — соответственно длины и площади сечения ярма и якоря (рис. 4).

Для концов магнитной цепи уравнение (24) пишется в виде

$$-m_2 \frac{d\Phi_o}{dx} = m_2 U_o g = z_o; \\ -m_2 \frac{d\Phi_e}{dx} = m_2 U_e g = z_e; \quad (35)$$

где U_o и U_e — разности магнитных потенциалов на концах магнитной системы. Они равны

$$U_o = -\Phi_o (R_{\mu o} + R_{\mu 3o}); \quad U_e = \Phi_e (R_{\mu e} + R_{\mu 4o}). \quad (36)$$

где $R_{\mu 3o}$ и $R_{\mu 4o}$ — магнитные сопротивления ярма и якоря при потоках Φ_o и Φ_e , подсчитанных по формулам (34). Как видно из (35), значения z_o и z_e пропорциональны разности магнитных потенциалов между сердечниками на концах магнитопровода. Представим z_o и z_e в таком виде:

$$z_o = -\frac{m_2}{m_1} g y_o z_{\mu o}; \quad z_e = +\frac{m_2}{m_1} g y_e z_{\mu e}; \quad (37)$$

где $z_{\mu o} = R_{\mu o} + R_{\mu 3o}$ и $z_{\mu e} = R_{\mu e} + R_{\mu 4o}$.

Если теперь построить кривые по уравнениям:

$$z_o(y) = -\frac{m_2}{m_1} g y (R_{\mu o} + R_{\mu 3}); \\ z_e(y) = +\frac{m_2}{m_1} g y (R_{\mu e} + R_{\mu 4}), \quad (38)$$

пересечения их с ветвями интегральной кривой $\psi(y)$ (рис. 6, а) дают координаты y_o , y_e , z_o , z_e , которые определяют потоки Φ_o и Φ_e , а также разности магнитных потенциалов U_o и U_e . Зная U_o и U_e , по кривой $y = \psi(x)$ (рис. 7) определяем значения x_o , x_e и длину сердечника $l = x_o + x_e$. По l находим ампервитки катушки, необходимые для обеспечения Φ_e , Φ_m и Φ_o , $F_k = f_k l$.

Из кривой $y = \psi(x)$ легко также определить требуемое значение потоков рассеяния вдоль длины сердечника. Оно равно разности между соответствующими ординатами. Для левой половины магнитной системы (рис. 4) $y_{sx} = y_m - y_{ox}$, для правой $y_{sx} = y_m - y_{ex}$. Максимальные потоки рассеяния определяем из уравнений:

$$\Phi_{so} = \frac{1}{m_1} (y_m - y_o); \quad \Phi_{se} = \frac{1}{m_1} (y_m - y_e). \quad (39)$$

При наличии кривых $z = \psi(y)$ и $y = \psi(x)$ можно построить кривую $z = f(x)$ (рис. 8). Эта кривая

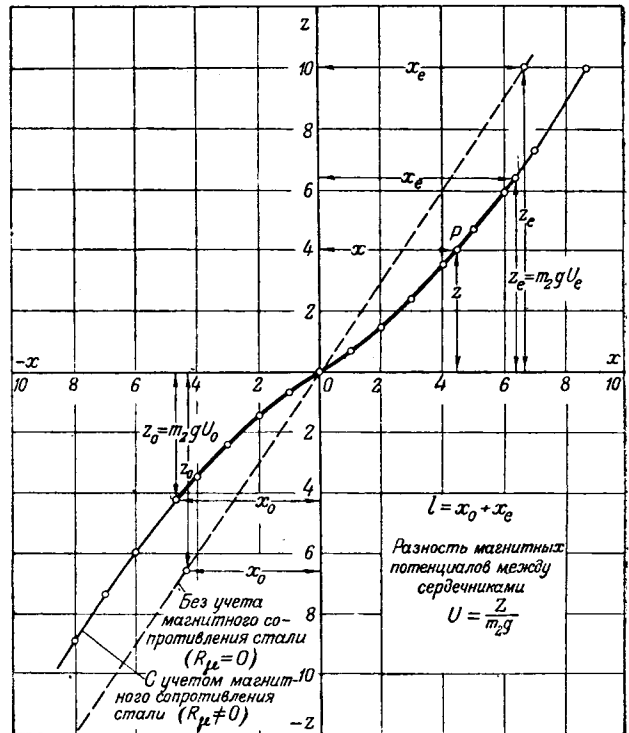


Рис. 8. Изменение разности магнитных потенциалов по длине магнитопровода с учетом и без учета сопротивления стали для случая с распределенной н. с.

показывает изменение разности магнитных потенциалов между сердечниками с учетом магнитного сопротивления стали (сплошная кривая). Там же показана аналогичная кривая при тех же условиях, но без учета сопротивления стали (пунктирная кривая). Как видно, отклонения от разности магнитных потенциалов на концах достигают значительных величин (максимально 58%), хотя разница для x_o и x_e и не велика.

Возможен также расчет и при других начальных условиях. Например, когда дано: F_k , l , S , S_3 , S_4 и $R_{\mu o}$. Задаваясь Φ_o , определяем Φ_m , Φ_e , Φ_{so} , Φ_{se} , x_o , x_e и $R_{\mu e}$. Или дано: f_k , S , S_3 , S_4 , $R_{\mu o}$ и $R_{\mu e}$. Задаваясь Φ_e , определяем Φ_m , Φ_o , Φ_{so} , Φ_{se} , l , x_o , x_e и F_k .

Использование в расчете экспериментальных кривых удельных магнитных сопротивлений. Представляет большой практический интерес расчет магнитной цепи, у которой удельное магнитное сопротивление выражено не аналитически, а в виде экспериментальной кривой, построенной в функции индукции: $\rho_R = f(B)$ (рис. 2).

Для магнитной системы с распределенной н. с. можно получить формулу для построения изоклин, если учесть (26) и (30):

$$z = -\frac{m_2 g}{m_1 Q} \left\{ f_k - \frac{y}{m_1} \left[\frac{1}{S_1} \rho_{R1}(B_{x1}) + \frac{1}{S_2} \rho_{R2}(B_{x2}) \right] \right\}, \quad (40)$$

где $\rho_{R1}(B_{x1})$ и $\rho_{R2}(B_{x2})$ берем из графика удельных магнитных сопротивлений для выбранной марки стали. При равных сечениях сердечников имеем:

$$z = -\frac{m_2^2 g}{m_1 Q} \left[f_k - \frac{2y}{S m_1} \rho_R(B_x) \right]. \quad (41)$$

Определение Q и дальнейший ход расчета ничем не отличаются от рассмотренного выше.

Приложение. Числовой пример. Требуется рассчитать магнитную цепь электромагнита соленоидного типа (рис. 1, б), работающего на постоянном токе.

Дано: $F_k = 2000$ а, $l = 6,8$ мм, $2a = b = 20$ мм, $c = 15$ мм, $\delta_0 = 0,6$ мм. Необходимо определить: Φ_e , Φ_m , Φ_{so} , Φ_{so} , x_0 , x_e , U_0 , U_e , δ_e .

Выбираем масштабы. Задаем магнитной индукцией в воронтичке $B_0 = 15$ кгс = $15 \cdot 10^{-5} \frac{\text{вб}}{\text{см}^2}$; $m_1 = 0,510^5$ см/вб;

$m_2 = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{см}}{\text{вб/см}}$; магнитное сопротивление воздушного зазора воронтичка

$$R_{\mu 0} = \frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} = \frac{0,06}{1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 2} = 239 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{гн}}.$$

Для стали типа Армко (рис. 2) при $B = 15$ кгс находим:

$$\rho_R = 6,67 \cdot 10^4 \text{ см/гн}.$$

Сопротивление стали воронтичка

$$R_{\mu 3} = \rho_{R3} \frac{l_3}{S_0} = \rho_{R3} \frac{\pi r + (c - \delta_0)}{S_0} = 6,67 \cdot 10^4 \frac{[\pi \cdot 0,5 + (1,5 - 0,06)]}{2} = 10 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{гн}}.$$

Для построения изоклин одна координата точки A определяется

$$y_0 = m_1 \Phi_0 = 15 \text{ см},$$

а другая¹ Z_0 определяется из (37):

$$z_0 = \frac{m_2}{m_1} g y_0 (R_{\mu 0} + R_{\mu 3}) = \frac{3 \cdot 10^5}{0,5 \cdot 10^5} \cdot 3,18 \cdot 10^{-8} \times 15 (239 + 10) 10^4 = 7,1 \text{ см};$$

здесь $g = 3,18 \cdot 10^{-8}$ гн/см.

Начальное значение тангенса угла наклона касательной к интегральной кривой Q_0 определяем из (41):

$$Q_0 = \text{tg } \alpha_0 = -\frac{m_2^2 g}{m_1 z_0} \left[f_k - \frac{2y}{m_1 S_1} \rho_{R1}(B_0) \right] = -\frac{3^2 \cdot 10^{10} \cdot 3,18 \cdot 10^{-8}}{0,5 \cdot 10^5 \cdot 7,1} \left[\frac{2000}{6,8} - \frac{2 \cdot 15 \cdot 6,67 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 10^5 \cdot 2} \right] = -2,22.$$

Откуда $\alpha_0 = 65^\circ 50'$. Задаваясь в уравнении $Q = n Q_0$ значением $n = 1; 1,5; 3; 0,7; 0,5$ и $0,4$ и пользуясь формулой (41), строим семейство изоклин. Для каждого значения n определяем Q и α . Расчет z при различных индукциях сведен в табл. 2.

По изоклинам строим интегральную кривую $z = f(y)$. Согласно рис. 6, в и рис. 9 первый элемент

$$\Delta x_1 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{2y'}{z_1} \sin \tau = \frac{3 \cdot 10^5}{0,5 \cdot 10^5} \cdot \frac{2 \cdot 0,2}{1,92} \sin 85^\circ \cdot 10' = 0,663 \text{ см}.$$

Подсчет последующих элементов для магнитопровода проводим по (32) (табл. 3).

Пользуясь кривой $x = f(y)$, по заданному потоку $\Phi_0 = B_0 S_0 = 15 \cdot 10^{-5} \cdot 2 = 30 \cdot 10^{-5}$ вб определяем координаты

¹ z_p и U_0 откладываем в положительной плоскости, поэтому берем знак плюс.

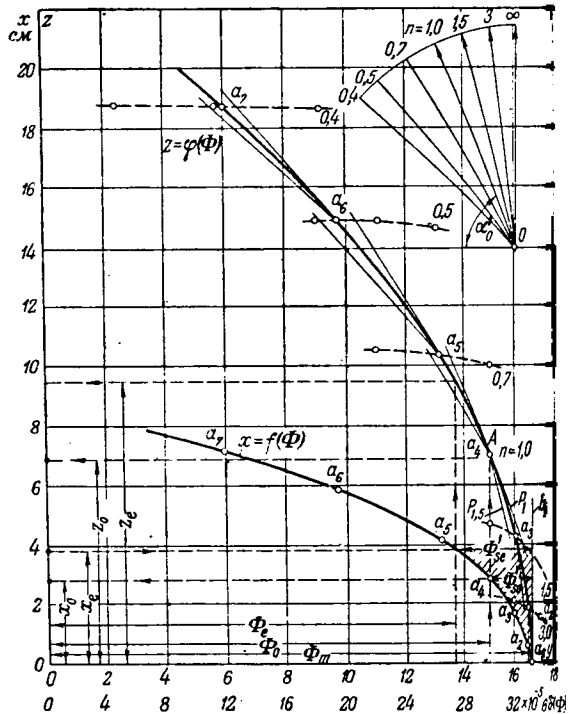


Рис. 9. Кривые для определения магнитных потоков Φ_m , Φ_{so} , Φ_0 , координат максимума потока x_0 и x_e , величин z_0 и z_e , пропорциональных разности магнитных потенциалов на концах магнитопроводов, при заданном потоке в воронтичке Φ_0 , для случая с распределенной индукцией.

Необходимые данные для построения изоклин

B, кгс у, см	$\rho_R(B_x)$ см гн 10^4	Qz	Значение координаты z, см					
			n=1	1,5	3,0	0,7	0,5	
			Q=2,22	3,33	6,66	1,56	1,11	
2,25	4,45	16,7						
5,6	2,6	16,64						
9	2,22	16,58						
11	2,27	16,54						
13	3,05	16,35						
15	6,67	15,7	7,1	4,73	2,36			
16,0	12,5	14,5		4,37	2,18	10,6	14,92	15,7
17,2	29,0	11,1		3,34	1,67	10,47	14,7	

Табл. 2

К определению элементов длины магнитопровода

Обозначение точек	y_k , см	z_k , см	y_{k+1} , см	z_{k+1} , см	Элемент длины магнитопровода, см
a_2	16,8	0	16,6	1,92	0,663
a_3	16,6	1,92	16,05	4,3	1,115
a_4	16,05	4,3	14,97	7,1	1,153
a_5	14,97	7,1	13,15	10,4	1,272
a_6	13,15	10,4	9,7	14,95	1,625
a_7	9,7	14,95	5,9	18,75	1,348

Всего 7,176

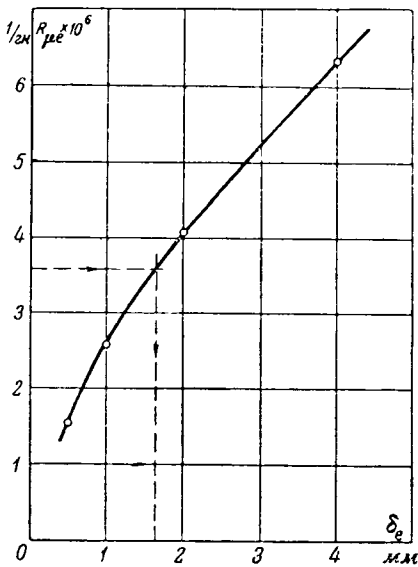


Рис. 10. Определение величины воздушного зазора по заданному магнитному сопротивлению.

у максимального потока $x_0 = 2,9$ см и $x_e = l - x_0 = 6,8 - 2,9 = 3,9$ см. По значению x_e находим из графика $f(\Phi)$ величину потока $\Phi_e = 27,4 \cdot 10^{-5}$. Максимальный ток в сердечнике определяется длиной отрезка на оси отсекаемого интегральной кривой $z = \varphi(y)$, $\Phi_m = 33,6 \cdot 10^{-5}$ вб. Поток рассеяния (заштрихованная область рис. 9) в любой точке длины магнитопровода определяется отрезком между вертикальной прямой a_1, b_1 и кривой $x = f(y)$. Этот отрезок параллелен оси y . Максимальные потоки рассеяния: $\Phi_{so} = \Phi_m - \Phi_e = (33,6 - 27,4) \cdot 10^{-5} = 6,2 \cdot 10^{-5}$ вб; $\Phi_{se} = \Phi_m - \Phi_e = (33,6 - 27,4) \cdot 10^{-5} = 6,2 \cdot 10^{-5}$ вб. По значениям Φ_o и Φ_e определяем Z_o и разность магнитных потенциалов на концах магнитопроводов:

$$U_o = -\frac{Z_o}{m_{2g}} = -\frac{6,95}{3 \cdot 10^5 \cdot 3,18 \cdot 10^{-8}} = 728 \text{ а};$$

$$U_e = \frac{Z_e}{m_{2g}} = \frac{9,55}{3 \cdot 10^5 \cdot 3,18 \cdot 10^{-8}} = 1000 \text{ а.}$$

При определении магнитного сопротивления ярма 4 (рис. 1,2) полагаем, что поток Φ_e выходит из торца яра, рассеиваясь, целиком проходит по сечению ярма, где индукция в ярме

$$B_4 = \frac{\Phi_e}{S_4} = \frac{1}{2} \cdot 27,4 \cdot 10^{-5} = 13,7 \cdot 10^{-5} \text{ вб/см}^2;$$

$$\rho_{R4} = 4 \cdot 10^4 \text{ см/гн} \text{ и } R_{\mu 4} = \rho_{R4} \frac{l_4}{S_4} = 4 \cdot 10^4 \cdot \frac{3,1}{2} = 6,2 \cdot 10^4 \text{ 1/гн.}$$

В этой части длины сердечника, равной δ_e , пренебрегаем, так как она мала по сравнению с l_4 . Магнитное сопротивление зазора δ_e будет:

$$\frac{U_e}{\Phi_e} - R_{\mu 4} = \frac{1000}{27,4 \cdot 10^{-5}} - 6,2 \cdot 10^4 = 359 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{гн}}.$$

Зная значением δ_e , строим по уравнению

$$R_{\mu e} = \frac{\delta_e}{\mu_0 a_p b_p}$$

кривую $R_{\mu e} = f(\delta_e)$ (рис. 10). Здесь a_p и b_p расчетные жеры полюса [Л. 11]

$$a_p = a(1 + 2\sigma_x), \quad b_p = b(1 + 2\sigma_y),$$

σ_x и σ_y — коэффициенты выпучивания определяемые кривой автора [Л. 11].

Для примера подсчитаем $R_{\mu e}$ при $\delta_e = 0,2$ см.

Значение коэффициента «выпучивания» с грани b при $\frac{a}{\delta_e} = \frac{1}{0,2} = 5$ и $\frac{x}{\delta_e} = \frac{1,5}{0,2} = 7,5$ будет $2\sigma_x = 0,63$. Коэф-

фициент «выпучивания» с грани a при $\frac{2b}{\delta_e} = \frac{2}{0,1} = 20$ и

$\frac{2z_a}{\delta_e} = \frac{1}{0,1} = 10$. Найдем $2\sigma_c = 0,19$. Магнитное сопротивление

$$R_{\mu e} = \frac{0,2 \cdot 10^8}{1,256 \cdot 1,2(1 + 0,69)(1 + 0,19)} = 412 \cdot 10^4.$$

Пользуясь кривой $R_{\mu e} = f(\delta_e)$, найдем для расчетного значения $R_{\mu e} = 359 \cdot 10^4$ величину зазора $\delta_e = 1,65$ мм (рис. 10). Если не учитывать «выпучивания», то величина зазора

$$\delta_e = \mu_0 a b R_{\mu e} = 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 1,2 \cdot 359 \cdot 10^4 = 0,9 \text{ мм.}$$

Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1946.
2. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. Ч. II. Госэнергоиздат, 1946.
3. В. И. Коваленков. Основы теории магнитных цепей. Издание АН СССР, 1940.
4. Б. С. Сотсков. Методы расчета магнитных цепей переменного тока. Автоматика и телемеханика, № 2, 1940.
5. Б. К. Буль. Аналитическое определение магнитных сопротивлений и потерь в стали. Электричество, № 5, 1950.
6. Н. А. Лившиц. Приложение методов двойного графического и численного интегрирования нелинейных уравнений к определению законов распределения магнитного потока вдоль магнитопровода нейтральных электромагнитных механизмов. Автоматика и телемеханика, № 2, 1940.
7. Н. Н. Шумиловский. Комплексный метод расчета магнитных цепей. Автоматика и телемеханика, № 4, 1940.
8. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
9. Б. К. Буль. Влияние частоты на время действия индукционных реле тока. Электричество, № 7, 1940.
10. Н. А. Лившиц, Д. В. Спицин и А. В. Данилин. Теория и расчет элементов автоматических систем. ГОНТИ, 1939.
11. Б. К. Буль. К расчету магнитных проводимостей поля вблизи воздушного зазора. Электричество, № 7, 1952.
12. Б. С. Сотсков. Методы расчета магнитных цепей переменного тока с учетом потерь в железе. ВЭП, № 8, 1940.
13. Б. К. Буль. Влияние высших гармоник на работу индукционных реле с короткозамкнутым витком. Автоматика и телемеханика, № 5, 1939.
14. М. И. Витенберг. Расчет телефонных и кодвых реле. Госэнергоиздат, 1947.
15. А. С. Займовский и В. В. Усов. Металлы и сплавы в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.
16. А. К. Власов. Курс высшей математики. Т. II. ОГИЗ, 1946.
17. А. А. Андрианов и С. Э. Хайкин. Теория колебаний. ОНТИ, 1937.
18. Под общей редакцией проф. К. М. Полыванова. Физические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1950.
19. Б. С. Сотсков. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры. Госэнергоиздат, 1950.



Влияние э. д. с. самоиндукции в цепи тяговых электродвигателей на проскальзывание колес при буксовании и юзе

Кандидат техн. наук, доц. Б. П. ПЕТРОВ

Московский энергетический институт имени Молотова

Когда усилие, развиваемое тяговым двигателем на обode колес электрического подвижного состава, превосходит предельное по сцеплению, возникает проскальзывание колес — с ускорением при тяговом режиме (буксование) или с замедлением при тормозном режиме (юз). Явления постоянно сопутствуют процессу реализации тягового или тормозного режима. Наиболее очевидные отрицательные последствия нарушения сцепления: опасное повышение скорости вращения буксующего колеса и его двигателя (при последовательном возбуждении), износ бандажей, частичная потеря в большинстве случаев тягового (тормозного) усилия.

Однако работами советских ученых [Л. 2 ... 8] установлено, что проскальзывание ведущих колес электрического подвижного состава в некоторые моменты может улучшить его тяговые свойства — увеличить предельные значения тяговых или тормозных усилий. Открыты новые виды скольжения (например, перемежающееся). В связи с этим повысился интерес к более детальному изучению процессов при проскальзывании колес. Изыскиваются способы эффективного использования ограниченных по величине или периодически повторяющихся проскальзываний колес для повышения тяговых свойств электроподвижного состава, а также способы, позволяющие уверенно вести поезд на пределе по сцеплению, на грани опасного проскальзывания колес, что особенно важно при автоматическом управлении.

Решение этих задач связано с дальнейшим детальным исследованием процессов буксования и юза, постепенным устранением неизбежных на первых этапах исследований упрощений. В частности, в выполненных ранее исследованиях, относящихся к двигателю постоянного тока, предполагалось, что электрические процессы протекают значительно быстрее механических, и не учитывалось влияние э. д. с. самоиндукции в цепи двигателей на процесс проскальзывания.

Ниже приведено исследование, которое является попыткой устранить это допущение. Оно показывает, что в ряде случаев процесс проскальзывания может быть обрисован более полно, если учесть влияние э. д. с. самоиндукции.

Показано, что в некоторых случаях э. д. с. самоиндукции в цепи двигателей оказывает значительное влияние на процесс проскальзывания колес. Дано приближенное решение дифференциального уравнения движения колеса при буксовании и юзе с учетом индуктивности цепи тягового двигателя.

Первоначально рассмотрим проскальзывание колес одного из n последовательно соединенных двигателей при индуктивном приводе колес.

Для того чтобы получить уравнения, удобные для анализа и решения, примем следующие допущения:

1. Коэффициент сцепления ψ при проскальзывании уменьшается пропорционально скорости проскальзывания u (м/сек):

$$\psi = \psi_0 - k_0 u, \quad (1)$$

где ψ_0 — наибольшее значение коэффициента сцепления при данной скорости движения; k_0 характеризует угол наклона зависимости $\psi(u)$, сек/м.

В действительности, как известно, зависимость $\psi(u)$ нелинейная и разрывная (знак сцепления мгновенно меняется при изменении направления скольжения).

2. Масса поезда велика, скорость движения поезда за время переходного процесса неизменяется (v_0 , м/сек).

3. Магнитный поток двигателей Φ в зоне переходного процесса меняется по линейному закону:

$$\Phi = \Phi_n + k I_a, \quad (2)$$

где I_a — ток возбуждения, а.

4. Самоиндукция цепи постоянна. Вихревые токи в магнитопроводе не учитываются.

5. Перед возникновением проскальзывания (при $-\infty < t < 0$) тяговое усилие двигателя равно предельному по сцеплению. Проскальзывание возникает вследствие внезапного уменьшения коэффициента сцепления, давления на рельсо, пускового сопротивления или повышения напряжения сети, нарушающих это установленное предельное равновесие:

$$P\psi_0 = F_0 = c_2 \Phi_0 I_0 = c_2 (\Phi_n + k I_0) I_0 \quad (3)$$

или

$$P\psi_0 = c_2 (\Phi_n + k I_0) I_0, \quad (4)$$

где F_0 — начальное усилие на обode колес кт;

P — давление на колесо, кг;

I_0 — начальный установившийся на пределе по сцеплению ток якоря, а;

$c_2 \Phi_0$ — произведение начального магнитного потока и постоянной двигателя, кг/а.

6. Сопротивление вращения колеса от трения подшипниках и пр. не учитываем ввиду его относительно небольшой величины.

При этих условиях составим два исходных уравнения.

Дифференциальное уравнение вращения букующего колеса после нарушения сцепления

$$m \frac{du}{dt} = F - \Pi \psi \tag{5}$$

или, учитывая (1) и (2):

$$c_2 (\Phi_n + kI) I - m \frac{du}{dt} + \Pi k_o u = \Pi \psi_o, \tag{6}$$

где $m = \frac{J}{R_k^2}$ — приведенная к кругу катания эффективная масса колеса, якоря двигателя и передачи;

J — момент инерции колеса, якоря двигателя и передачи;

I — ток якоря;

R_k — радиус колеса.

При последовательном соединении для цепи двигателей справедливо в переходный период уравнение:

$$U_c = Irn + Ln \frac{dI}{dt} + nc_1 v_o (\Phi_n + kI) + c_1 u (\Phi_n + kI), \tag{7}$$

где U_c — напряжение сети, в;

$c_1 \Phi$ — постоянная и магнитный поток двигателей;

r — сопротивление цепи на один двигатель, ом;

L — индуктивность цепи на один двигатель, гн.

Для более сложных электрических цепей уравнения переходного процесса могут быть оставлены по принципу контурных токов [Л.9].

Совместное рассмотрение исходных уравнений (6) и (7) приводит к сложному нелинейному уравнению второго порядка, решение и анализ которого весьма затруднительны.

Для упрощения исходных уравнений воспользуемся следующими дополнительными допущениями:

1. Зависимость тягового усилия F от тока согласно рис. 1 представим уравнением:

$$F = F_n + k_1 I, \tag{8}$$

т. е. говоря, в исследуемой зоне, вблизи тока нелинейную зависимость заменяем линейной.

2. В уравнении (7) только в последнем члене примем поток неизменным и равным его значению в начальный момент

$$\Phi_o = \Phi_n + kI_o, \tag{9}$$

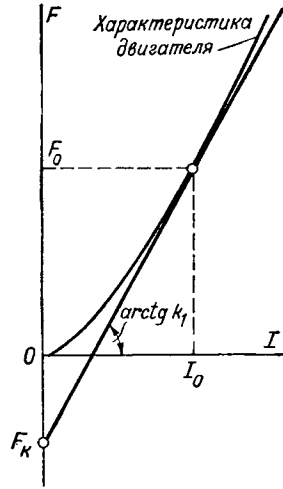


Рис. 1. Определение коэффициентов k_1 и F_n по кривой тягового усилия двигателя $F(I)$.

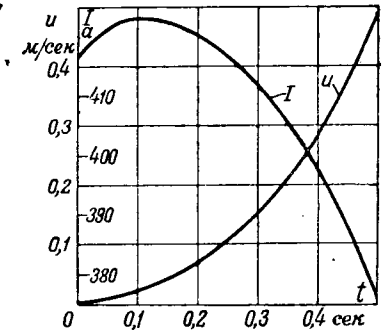


Рис. 2. Развитие буксования одного двигателя - последовательного возбуждения при нормальном насыщении.

т. е. считаем, что доля э. д. с. вращения, зависящая от скорости проскальзывания u и потока, изменяется только пропорционально скорости проскальзывания при неизменном потоке.

При умеренных отклонениях тока (и потока) от начального значения, учитывая, что буксование возникает при значительных насыщениях, когда $k(I - I_0) \ll \Phi_o$, и что в целом член $c_1 u k (I - I_0)$ значительно меньше всех остальных, это допущение оправдано.

Производя замены в (6) и (7) согласно (8) и (9), получаем исходные линейные уравнения, которые после функциональных преобразований (с учетом начальных условий $I = I_0$; $u_o = 0$) и при сохранении для изображений прежних обозначений имеют вид:

$$k_1 I - (mp - \Pi k_o) u = \Pi \psi_o - F_n, \tag{10}$$

$$n(r + c_1 k v_o + Lp) I + c_1 \Phi_o u = U_c - nc_1 v_o \Phi_n + Ln I_o p, \tag{11}$$

где p — оператор.

Решение этой системы уравнений (приложение 1) приводит к следующим выражениям для изображений тока $I(p)$ и скорости скольжения $u(p)$:

$$\left. \begin{aligned} I(p) &= \frac{M(p)}{N(p)}, \\ u(p) &= \frac{S}{N(p)}, \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

где

$$M(p) = Ln m I_o p^2 + [(U_c - nc_1 v_o \Phi_n) m - nk_o \Pi I_o L] p + [c_1 \Phi_o (\Pi \psi_o - F_n) - \Pi k_o (U_c - nc_1 v_o \Phi_n)], \tag{13}$$

$$S = k_1 (U_c - nc_1 v_o \Phi_n) - (\Pi \psi_o - F_n) (r + c_1 k v_o) n, \tag{14}$$

$$N(p) = L m n p^2 + n [m (r + c_1 k v_o) - \Pi k_o L] p + [k_1 c_1 \Phi_o - \Pi k_o n (r + c_1 k v_o)]. \tag{15}$$

Из характеристического уравнения (15) определяются корни p_1 и p_2 .

Как это следует из примерных расчетов, для двигателей нормального насыщения эти корни вещественные. Тогда оригиналы решений (12) согласно формуле разложения [Л. 1] будут иметь следующий вид:

$$I(t) = \frac{M(0)}{N(0)} + \frac{M(p_1)e^{p_1 t}}{p_1 N'(p_1)} + \frac{M(p_2)e^{p_2 t}}{p_2 N'(p_2)}, \quad (16)$$

$$u(t) = \frac{S}{N(0)} + S \left[\frac{e^{p_1 t}}{p_1 N'(p_1)} + \frac{e^{p_2 t}}{p_2 N'(p_2)} \right]. \quad (17)$$

Приведем пример численного решения этих уравнений для данных приложения II, пример 1, которые соответствуют буксованию одного двигателя ДПЭ-340 при внезапном повышении напряжения. На основании расчета построены кривые изменения во времени тока и скорости скольжения (рис. 2). По этим кривым, выбирая значения u и I для равных моментов времени, построена зависимость скорости скольжения от тока (рис. 3, $L=0,06$ гн). Там же приведена аналогичная зависимость $u(I)$ для $L=0$, являющаяся, по существу, тяговой характеристикой двигателя при повышенном до 1510 в напряжении. Сопоставление обеих кривых рис. 3 позволяет наглядно оценить влияние э. д. с. самоиндукции на развитие процесса буксования.

При $L=0$ (рис. 3) ток мгновенно увеличивается от $I_0=416,5$ до 427 а, а затем по мере развития буксования уменьшается. В данном случае имеет место разносное буксование; $\lim u|_{t \rightarrow \infty} = \infty$. В случае $L \neq 0$ ток уже не может изменяться мгновенно. В процессе его увеличения скольжение развивается, ограничивая дальнейший рост тока. Уменьшение тока также происходит постепенно. В результате увеличенной разности между тяговым усилием и силой трения ускорение колеса больше, чем в случае $L=0$. Скорость проскальзывания при $L \neq 0$ с некоторого момента превышает скорость проскальзывания при $L=0$. Это превышение в начальной стадии развития относительно довольно большое.

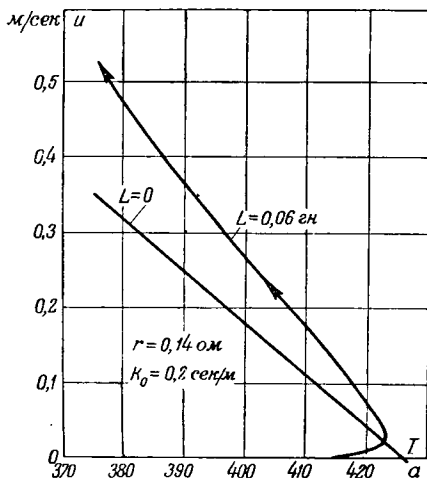


Рис. 3. Сравнение переходных процессов при буксовании одного двигателя нормального насыщения с учетом ($L=0,06$ гн) и без учета э. д. с. самоиндукции ($r=0,14$ ом; $k_0=0,2$ сек/м).

В дальнейшем абсолютная разница обеих кривых возрастает, так как в данном конкретном случае, как следует из рис. 2, непрерывно увеличивается скорость уменьшения тока и соответственно э. д. с. самоиндукции, которая соответственно и определяет превышение кривой $L=0,06$ над кривой $L=0$, как это ясно из уравнения (7).

Следовательно, вследствие наличия э. д. с. самоиндукции буксование будет всегда развиваться более интенсивно, чем это указывалось во всех ранее проводимых исследованиях, в которых принималось $L=0$.

Различие кривых рис. 3 тем больше, чем меньше сопротивление цепи и зависимость потока от тока в якоре. Как известно, в двигателях последовательного возбуждения эта зависимость наибольшая, а в двигателях смешанного возбуждения, в схемах рекуперации с независимым возбуждением или с возбудителем, — значительно меньшая. Кроме этого при быстрых переходных процессах вихревые токи в магнитопроводе препятствуют изменению потока. Также в схеме рекуперации со стабилизирующими сопротивлениями изменение тока возбуждения при переходных процессах весьма сильно отстает от изменения тока в якоре, и во время колебательных процессов в цепи якоря ток возбуждения меняется весьма незначительно. Поэтому весьма вероятно, что процесс буксования или киза будет иногда развиваться при почти неизменном потоке возбуждения; этот предельный случай целесообразно специально исследовать.

Если принять условие $\Phi = \Phi_0$, то новые уравнения переходных процессов могут быть получены, если в уравнениях (10) и (11) положить $k=0$; $\Phi_n = \Phi_0$; $k_1 = c_2 \Phi_0$. Соответственно изменяются коэффициенты уравнений (13), (14) и (15). В частности, новое характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$p^2 + 2ap + b = p^2 + \frac{(mr - \Pi k_0 L)p}{Lm} + \frac{c_1 c_2 \Phi_0^2 - \Pi r n k_0}{Lmn}. \quad (18)$$

Анализ уравнения (18) в общем виде затруднителен.

Очевидно, однако, что: 1) при известных условиях, когда $mr < \Pi k_0 L$ или $c_1 c_2 \Phi_0^2 < \Pi r n k_0$, один из коэффициентов уравнения может быть отрицательным. Тогда переходный процесс (по Гурвицу) неустойчив. Первое неравенство приводит к разрастающимся колебательным процессам, а второе — к разносному процессу; 2) переходный процесс может быть иногда колебательным (корни комплексные сопряженные).

В соответствии с последним предположением, справедливость которого при принятом предположении ($\Phi = \Phi_0$) подтверждена на ряде примеров, получаем следующее решение системы уравнений относительно тока (приложение III):

$$I = I_y + Ae^{\alpha t} \sin(\omega t + \gamma); \quad (19)$$

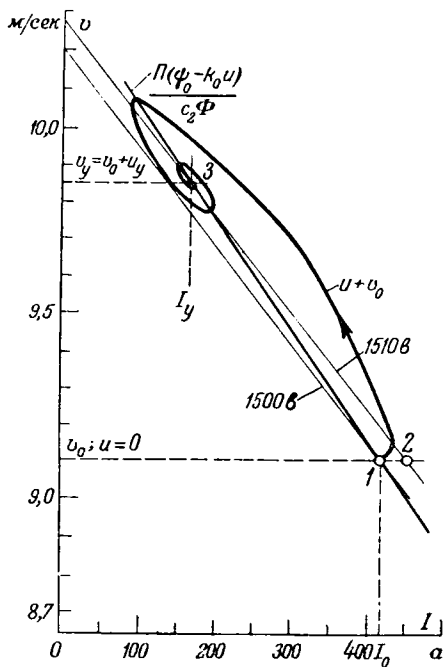


Рис. 7. $u(I)$ для случая буксования одного двигателя ($r=0,4$ ом; $\Phi_0=пост$; $L=0,04$ гн; $k_0=0,2$ сек/м).

ся из скорости движения поезда, поэтому в уравнении (11) знак при члене, содержащем u , отрицателен. Решая это новое уравнение совместно с (10) при $\Phi = \Phi_0$, получаем такое же, как и при буксовании, характеристическое уравнение (18), иными словами условия устойчивости и характер переходного процесса в обоих случаях одинаковые.

Решения уравнений относительно I и u по своей структуре также аналогичны (19) и (20), но, естественно, при нескольких других значениях коэффициентов. Поэтому отличие от процесса буксования только в знаке скольжения.

На рис. 8 приведена кривая $u(I)$ для юза одного из шести последовательно соединенных двигателей. Она рассчитана по данным приложения II, пример 4, при изменении напряжения сети с 3 000 до 2 800 в. При этих условиях скорость скольжения достигает величины большей, чем скорость движения, т. е. при $u = v_0$ скользящее колесо останавливается и затем начинает вращаться в сторону, противоположную движению.

При столь большой амплитуде отклонения скорости колеса от начального значения решение не может быть точным даже для двигателя независимого возбуждения, так как $k_0 \neq пост$. Однако характер явления качественно правилен и подтверждает ранее сделанный вывод, что с учетом э. д. с. самоиндукции процесс проскальзывания развивается более интенсивно.

Таким образом, исследование процессов проскальзывания при $\Phi = пост$ показывает, что следует считаться с возможностью возникновения более сложных процессов юза и буксования, чем это представлялось до сих пор. В частности, возможно развитие колебательных процессов. Более

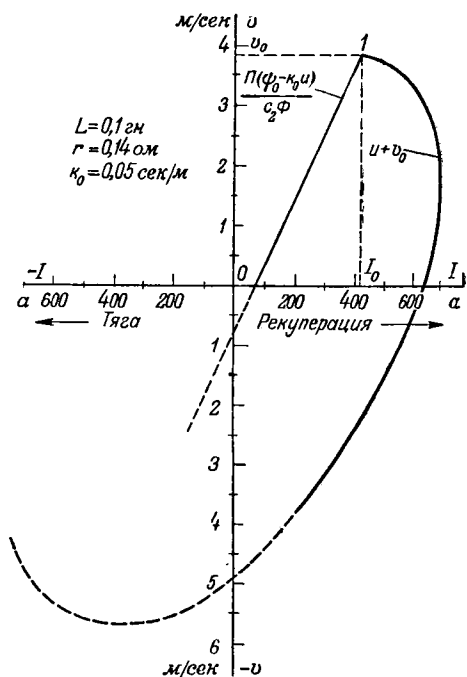


Рис. 8. $u(I)$ для случая юза одного из шести последовательно соединенных двигателей ($r=0,14$ ом; $\Phi_0=пост$; $L=0,1$ гн; $k_0=0,05$ сек/м).

подробное исследование этих явлений возможно только на базе экспериментов.

Заключение. Электродвижущая сила самоиндукции в цепи двигателей во время буксования или юза колес оказывает существенное влияние на процесс проскальзывания колес и должна учитываться при экспериментальном и теоретическом изучении буксования и юза, особенно в тех случаях, когда поток возбуждения двигателей мал и зависит от тока в якоре и сопротивление цепи двигателей невелико.

Современная теория буксования и юза, развитая и дополненная с учетом процессов, обусловленных самоиндукцией в цепи двигателей, является еще более совершенным орудием исследования режимов работы электроподвижного состава.

Приложение I. Из коэффициентов уравнений (11) и (11) составляем определители:

$$N(p) = \begin{vmatrix} k_1 & -(mp - \Pi k_0) \\ n(r + c_1 k v_0 + Lp) & c_1 \Phi_0 \end{vmatrix},$$

решение его — см. уравнение (15);

$$S = \begin{vmatrix} k_1 & (\Pi \psi_0 - F_n) \\ n(r + c_1 k v_0 + Lp) & (U_c - n c_1 v_0 \Phi_n + n L I_0 p) \end{vmatrix},$$

решение его см. уравнение (14);

$$M(p) = \begin{vmatrix} (\Pi \psi_0 - F_n) & -(mp - \Pi k_0) \\ (U_c - n c_1 v_0 \Phi_n + n L I_0 p) & c_1 \Phi_0 \end{vmatrix},$$

решение его см. уравнение (13).

Приложение II. Данные. Двигатель ДПЭ-340. Давление на ось $\Pi = 22$ т; $\psi_0 = 0,25$;

$$c_1 \Phi_0 = 146,5 \text{ в сек/м}; \quad c_2 \Phi_0 = 13,2 \text{ кг/а};$$

$$I_0 = 416,5 \text{ а}; \quad m = \frac{\Pi k_{г.м}}{9,81} = 560 \text{ кг сек}^2/\text{м},$$

где $k_{г.м} = 0,25$ — коэффициент инерции вращающихся масс

Пример 1. $L=0,06$ гн (индуктивность якоря и обмотки возбуждения при большом насыщении); $r=0,14$ ом; $n=1$; $k_o=0,2$ сек/м (учитывая, что скорости скольжения велики), $v_o=9,841$ м/сек (при 1500 в). Напряжение пошется до 1510 в.

Пример 2. $L=0,04$ гн (индуктивность одного якоря в большом насыщении); $k_o=0,2$ сек/м; $n=1$; $v_o=9,841$ м/сек (при 1500 в). Напряжение повышается до 10 в, $r=0,14$ ом.

Пример 3. $r=0,4$ ом; $v_o=9,1$ м/сек (при 1500 в). гальное, как в примере 2.

Пример 4. $n=6$; $r=0,14$ ом; $v_o=3,8$ м/сек (при 3000 в). Напряжение снижается до 2800 в; $L=0,1$ гн (нормальное насыщение); $k_o=0,05$ сек/м (среднее за большой интервал изменения скорости скольжения).

Приложение III. Производя в уравнениях (10) и (11) замены ($k_o=0$; $\Phi_n=\Phi_o$; $k_1=c_2\Phi_o$) и применяя функциональное преобразование по Карсону с сохранением обозначений для преобразованных функций $I(p)$, $u(p)$ и оригиналов $I(t)$ и $u(t)$, получим систему уравнений:

$$In(r+Lp) + c_1\Phi_o u = U_c - nc_1\Phi_o v_o + nLI_o p, \quad (\text{III},1)$$

$$c_2\Phi_o I + (\text{П}k_o - mp) = \text{П}\phi_o. \quad (\text{III},2)$$

Изображение решения для тока:

$$I(p) = \frac{\begin{vmatrix} (U_c - nc_1\Phi_o v_o + nLI_o p) & c_1\Phi_o \\ \text{П}\phi_o & (\text{П}k_o - mp) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n(r+Lp) & c_1\Phi_o \\ c_2\Phi_o & (\text{П}k_o - mp) \end{vmatrix}} = \frac{nLmI_o p^2 + (U_c m - nc_1\Phi_o v_o m - nL\text{П}k_o I_o) p + \text{П}[c_1\Phi_o (nv_o k_o + \phi_o) - k_o U_c]}{Lmn p^2 + (mr - \text{П}k_o L) np + (c_1 c_2 \Phi_o^2 - \text{П}k_o nr)} = \frac{K_3 p^2 + K_2 p + K_1}{p^2 + 2ap + b}. \quad (\text{III},3)$$

Воспользовавшись таблицей обратных преобразований изображений в оригиналы [Л. 1], получаем уравнение (19),

$$A = \sqrt{B^2 + C^2}, \quad \text{tg } \gamma = \frac{B}{C},$$

$$B = K_3 - \frac{K_1}{p_1 p_2}, \quad C = \frac{1}{\beta} \left(K_2 - K_3 a - \frac{K_1 a}{p_1 p_2} \right),$$

$p_1 : p_2 = \alpha \pm j\omega$ — корни характеристического уравнения (18).

Установившееся значение для тока I_y получаем согласно теореме разложения из уравнения (III, 3), принимая $p=0$.

Изображение решения для скорости скольжения:

$$U(p) = \frac{\begin{vmatrix} n(r+Lp) & (U_c - nc_1\Phi_o v_o + nLI_o p) \\ c_2\Phi_o & \text{П}\phi_o \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n(r+Lp) & c_1\Phi_o \\ c_2\Phi_o & (\text{П}k_o - mp) \end{vmatrix}} = \frac{nr\text{П}\phi_o - U_c c_2\Phi_o - nc_1 c_2 \Phi_o^2 v_o}{Lmn p^2 + (mr - \text{П}k_o L) np + (c_1 c_2 \Phi_o^2 - \text{П}k_o nr)} = \frac{K_4}{p^2 + 2ap + b}.$$

По таблице обратных преобразований изображений оригиналы [Л. 1] получаем уравнение (20), где

$$u_y = \frac{K_4}{b}, \quad \beta = \frac{\omega}{a}.$$

Литература

1. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергоиздат, 1948.
2. Л. И. Трахтман. Буксование при тяге и юз при электрическом торможении электроподвижного состава. МЭМИИТ, вып. 2, 1939.
3. Д. К. Минов. Основные выводы из сравнительных испытаний электровозов ВЛ-19 и С_с-11. Бюллетень завода «Намо», февраль 1936.
4. Д. К. Минов. Буксование электровоза и процессы электрической цепи тяговых двигателей. Электричество, 1941.

5. Д. К. Минов. Роль скольжения колес при реализации тягового усилия и структура коэффициента сцепления при электрической тяге. Известия АН СССР, № 4, 1947.

6. Д. К. Минов. Применение метода конечных разностей для исследования процесса буксования и юза при электрической тяге. Известия АН СССР, № 2, 1948.

7. М. Р. Барский. Сцепление колес с рельсами и использование сцепного веса электровозов (Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, диссертация, 1950).

8. И. Н. Сердинова. Исследование процесса юза во время рекуперативного торможения (Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, диссертация, 1949).

9. Б. П. Петров. Исследование устойчивости схем электроподвижного состава. Электричество, № 4, 1951.

[5. 3. 1952]



К расчету перенапряжений в трансформаторных обмотках

Доктор техн. наук, проф. В. А. КАРАСЕВ,
кандидат техн. наук А. В. СКЛЯНИН

Ивановский энергетический институт

Введение. Вопросу расчета перенапряжений в обмотках трансформаторов при импульсных воздействиях посвящено много работ советских и зарубежных авторов. В более поздних работах

придается большое значение правильному расчету магнитных связей с учетом взаимоиנדукции между всеми элементами исследуемой обмотки.

Большинство авторов приходит к выводу, что электромагнитная взаимоиנדукция играет решающую роль в возникновении и характере нестационарных процессов в обмотке. Однако подход к изучению магнитных связей и математический анализ явлений у ряда авторов производятся по-разному, что приводит к различной величине расчетных перенапряжений. При рассмотрении магнитных связей одни авторы исходят из общего магнитного потока, пронизывающего обмотку [Л. 3, 5], другие — из взаимоиנדукции двух витков, взятых независимо от остальной части обмотки [Л. 1, 2, 4]. Подробного опытного исследования магнитных связей при различных состояниях обмоток до сих пор не производилось.

В 1944 и 1946 гг. опубликована теория одного из авторов настоящей статьи [Л. 1, 2]. В этой теории, как база для анализа импульсных явлений, вводятся в расчет «функции взаимоиנדукции» магнитных и электростатических связей, т. е. зависимость взаимоиנדукции двух элементов обмотки от расстояния между ними. Разумеется, что вид функции электромагнитной взаимоиנדукции при закороченной и разомкнутой вторичной обмотке низшего напряжения различен. При рассмотрении функции электростатической взаимоиנדукции имеется в виду наличие промежуточных витков, так как они оказывают влияние на величину взаимной индуктивности двух витков. В этой теории полученное решение для распределения потенциалов по обмотке удовлетворяет исходному интегродифференциальному уравнению.

В нашей работе экспериментальным путем выясняется, в какой степени основные положения рассматриваемой теории соответствуют действительным явлениям в обмотке при переходных режимах.

В соответствии с этой основной целью работа разделяется на следующие этапы:

Приводятся результаты исследования магнитных и электростатических связей между элементами обмоток трансформаторов и перенапряжений в них при импульсных и высокочастотных воздействиях. Разработан метод экспериментального исследования функций взаимоиנדукций. Опытные данные подтверждают ранее опубликованную теорию электромагнитных процессов в обмотках [Л. 1].

1. Исследованы электростатическая и электромагнитная взаимоиנדукции между витками первичной обмотки высшего напряжения в зависимости от расстояния между ними.

2. Опытным путем определены периоды собственных колебаний обмотки при установившемся синусоидальном режиме и исследованы перенапряжения в обмотках при импульсном режиме.

3. Проведено сопоставление опытных данных с теорией.

В настоящей статье излагаются более подробно результаты исследования только для одного, практически важного случая, когда вторичная обмотка закорочена, а нейтраль первичной заземлена.

Метод экспериментального исследования
Опыты проведены на двух моделях однофазных трансформаторов без масла, при различных включениях первичной и вторичной обмоток, а также при замещении последней полым медным цилиндром (экраном) с толщиной стенки 2,5 мм.

Результаты опытных закономерностей, приведенные ниже, относятся к модели, у которой основные данные сердечника и первичной обмотки следующие: стальной сердечник квадратного сечения 70 × 70 мм, число катушек 14, витков в катушке 430, длина провода всей обмотки 2400 м, средний диаметр 127 мм, длина обмотки (l) 300 мм, ширина канала между обмотками 15 мм (из них 4 мм толщина гетинаксового цилиндра).

Измерения взаимоиנדукций производились при установившемся синусоидальном режиме в диапазоне частот от 50 гц до 200 кц.

Частоты возбуждающего напряжения были выбраны, исходя из предварительного ориентировочного подсчета диапазона частот собственных колебаний обмоток реальных трансформаторов. Частоты свыше 200 кц соответствуют высшим гармоническим, для которых преобладает емкостный эффект в обмотке, поэтому с точки зрения магнитных связей действие таких частот представляется меньший интерес.

Напряжение возбуждающего генератора высокой частоты применялось в пределах от 30 до 100 в. В действительных условиях импульсные

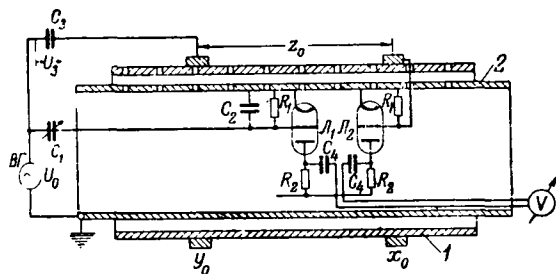


Рис. 1. Схема измерения электростатической взаимоиנדукции.

1—изоляционный цилиндр; 2—медный цилиндр.

перенапряжение в высоковольтных трансформаторах может превосходить рабочее напряжение в 4... 5 раз, но, несмотря на это, волновой ток невелик по сравнению с рабочим током. Поэтому индукция в стали от волнового тока невелика, особенно при вторичной закороченной обмотке. При малых значениях индукций магнитная проницаемость более или менее постоянна и ферромагнитная нелинейность сказывается мало. В наших опытах постоянство магнитной проницаемости контролировалось осциллографированием формы синусоиды напряжения при измерении электромагнитной взаимоиנדукции в пределах индукций приблизительно от 5 до 30 гс.

При измерении электростатической взаимоиנדукции применялась схема, представленная на рис. 1. Выражение для функции взаимоиנדукции $n_0(x_0, y_0)$ между двумя витками с координатами x_0 и y_0 имеет вид:

$$n_0(x_0, y_0) = \frac{U(x_0)}{q_0(y_0)},$$

где $U(x_0)$ — потенциал измерительного витка с координатой x_0 ;

$q_0(y_0)$ — заряд возбуждающего витка y_0 , отнесенный к единице периметра витка.

Измеряя напряжение U_3 на известной емкости C_3 , можно определить заряд $q_0(y_0)$. Потенциал, возбуждаемый зарядом $q_0(y)$, в витке с координатой x_0 подавался на сетку одной усилительной лампы L_2 , а на сетку второй такой же лампы L_1 включалось напряжение U_2 с емкостного делителя $C_1—C_2$ генераторного напряжения. На выходе усилительных ламп включался улевой указатель. Изменением величины емкости C_2 уравнивались сеточные потенциалы ламп.

Исходя из условия равновесия, взаимоиנדукция подсчитывалась по опытным данным по формуле

$$n_0(x_0, y_0) = U_0 \frac{C_1 \cdot p}{(C_1 + C_2) \cdot C_3 \cdot U_3},$$

где p — периметр витка.

¹ Функция взаимоиנדукции отнесена к единице периметра витка, о чем напоминает индекс нуль у символа n .

² Координаты витков x и y выражены в долях действительной длины обмотки l : $x_0 = \frac{x}{l}$ и $y_0 = \frac{y}{l}$.

С целью исключения влияния посторонних полей на элементы схемы, а также для уменьшения паразитных емкостных токов усилительное устройство вместе с другими элементами схемы размещалось внутри медного цилиндра, который заземлял вторичную обмотку. Усилительное устройство перемещалось внутри цилиндра в соответствии с перемещением измерительного витка, от которого конец провода к лампе L_2 протаскивался через отверстия в медном и гетинаксовом цилиндрах. Это позволило уменьшить длину конца провода и, следовательно, его емкость на цилиндр при любом расстоянии между витками.

Измерение электромагнитной взаимоиנדукции производилось по двум схемам. В первой схеме одна из катушек первичной обмотки возбуждалась синусоидальным током $I(y_0)$, а на зажимах второй катушки с координатой x_0 измерялось напряжение при различном расстоянии между витками. Напряжение измерялось ламповым вольтметром или осциллографом с большими входными сопротивлениями.

Взаимоиנדукция $m_0(x_0, y_0)$, отнесенная к единице периметра витка, подсчитывалась по формуле

$$m_0(x_0, y_0) = \frac{U(x_0)}{p \cdot I(y_0) \cdot \omega_{x_0} \cdot \omega_{y_0}},$$

где ω_{x_0} , ω_{y_0} — числа витков соответственно в измерительной и возбуждающей катушке.

Во второй схеме (рис. 2), которая применялась при контрольных испытаниях, измерения основаны на взаимной компенсации напряжений на концах измерительной катушки и на сопротивлении r .

При условии

$$r \ll \frac{1}{\omega C}$$

нетрудно получить, что

$$m_0(x_0, y_0) = \frac{r \cdot R \cdot C}{p \cdot \omega_{x_0} \cdot \omega_{y_0}}.$$

В обеих схемах для уменьшения доли емкостных токов в полном токе, ниже определенного предела при измерениях использовались катушки с различным числом витков в зависимости от частоты приложенного напряжения.

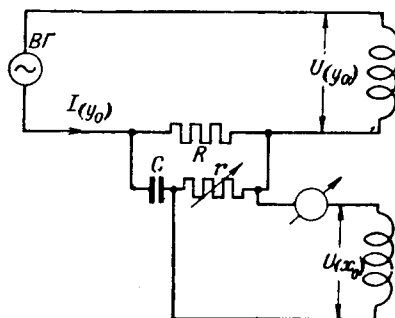


Рис. 2. Схема измерения электромагнитной взаимоиנדукции.

Для контроля опытных данных высокочастотного режима электромагнитная взаимная индукция измерялась по первой схеме также при импульсном воздействии на виток (катушку) y_0 . При этом осциллографировались возбуждающий ток и напряжение на концах витка x_0 .

Кроме того, для оценки величины потерь в меди катушек и в стали сердечника в опытах высокочастотного режима измерялся фазный угол тока $I(y_0)$ по отношению к напряжениям $U(x_0)$ и $U(y_0)$.

Опытное определение периодов собственных колебаний всей первичной обмотки производилось методом резонансных кривых.

Исследование импульсного режима обмотки проведено на основе анализа осциллограмм, полученных при обмере напряжений вдоль обмотки с помощью осциллоскопа.

Функции электростатической и электромагнитной взаимной индукции и периоды собственных колебаний обмотки. Результаты измерений электростатической взаимной индукции показали, что функции взаимной индукции при заземленной вторичной обмотке и при экране, замещающем вторичную обмотку, совпадают между собой.

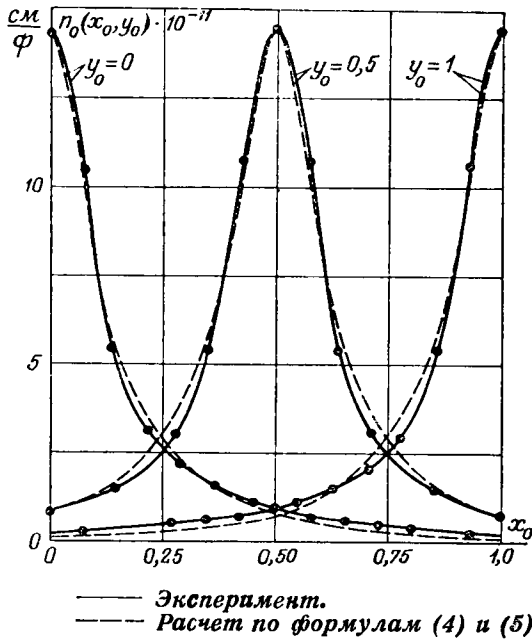


Рис. 3. Функции электростатической взаимной индукции.

Если не учитывать влияния промежуточных обесточенных витков обмотки на взаимную индукцию, то расчет³ $n_0^*(x_0, y_0)$ можно произвести по формуле [Л.1]:

$$n_0^*(x_0, y_0) = n_0^*(z_0) = \frac{9 \cdot 10^{11}}{\epsilon} \ln \frac{z_0^2 + 4a_0^2}{z_0^2}, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

³ В отличие от принятого выше обозначения $n_0(x_0, y_0)$, где учитывается влияние промежуточных витков, здесь принято обозначение взаимной индукции со звездочкой.

z_0 — расстояние между исследуемыми витками ($z_0 = y_0 - x_0$); $a_0 = \frac{a}{l}$, где a — ширина канала между обмотками.

Результаты измерений $n_0^*(x_0, y_0)$ при отсутствии между исследуемыми витками промежуточных витков достаточно хорошо совпадают с подсчетом по формуле (1). Но результаты опытов по измерению взаимной индукции между двумя витками при наличии на гетинаксовом цилиндре промежуточных витков (рис. 3) отличаются от теоретической и опытной зависимости для $n_0^*(x_0, y_0)$. Наличие промежуточных витков приводит к нарушению геометрического подобия (дуальности) магнитного поля витка и электрического поля заряда, распределенного по тому же витку.

Функцию электромагнитной взаимной индукции $m_0(x_0, y_0)$ при замещении вторичной обмотки экраном можно представить в виде [Л. 1]:

$$m_0(x_0, y_0) = m_0(z_0) = 10^{-9} \ln \frac{z_0^2 + 4a_0^2}{z_0^2}. \quad (2)$$

Опытная зависимость для $m_0(x_0, y_0)$ хорошо совпадает с расчетной по формуле (2).

Как видно из формул (1) и (2), функции $n_0^*(x_0, y_0)$ и $m_0(x_0, y_0)$ подобны между собой, это подобие подтверждается и опытом, но функции $n_0(x_0, y_0)$ и $m_0(x_0, y_0)$ не подобны, что следует из результата, изложенного выше.

Такие результаты дают основание утверждать, что процесс в обмотке нельзя представить в виде движения обычной плоской волны, даже в таком простейшем случае, когда вторичная обмотка замещена экраном.

Для тонких обмоток при закороченной вторичной обмотке расчет электромагнитной взаимной индукции можно произвести по приближенной формуле [Л. 1]

$$m_0(x_0, y_0) = 10^{-9} \{ -2 \ln |z_0| - \ln(z_0^2 + 4a_0^2) \} - M_0, \quad (3)$$

где $M_0 = \text{const}$.

Как видно из рис. 4, опытные кривые достаточно хорошо сходятся с расчетными. Такая зависимость имеет место во всем диапазоне частот приложенного напряжения от 50 гц до 200 кгц.

Измерения фазового угла между током $I(y_0)$ и напряжением $U(x_0)$ показывают, что потери в стали при закороченной вторичной обмотке можно не учитывать во всем диапазоне частот.

Отметим, что измерение при импульсном режиме дает характер кривых такой же, что и при высокочастотном режиме.

В таблице даны полученные из опыта отношения периода основной гармоники (417 мксек) при изолированной нейтрали и разомкнутой вторичной обмотке к периодам трех первых гармоник при различных состояниях обмоток.

Кратность периодов собственных колебаний первичной обмотки

Экран обмотки	Нейтраль изолирована		Нейтраль заземлена		Вторичная обмотка замещена экраном	
	Вторичная обмотка		Вторичная обмотка		Нейтраль первичной	
	разомкнута	закорочена	разомкнута	закорочена	изолирована	заземлена
1	1,0	5,85	7,30	7,35	8,37	18,0
2	9,21	10,90	17,50	17,80	22,30	29,2
3	18,40	18,90	28,40	28,40	31,40	36,0

Из таблицы видно, что периоды колебаний меняются в широких пределах в зависимости от состояния вторичной обмотки и нейтрали первичной.

При разомкнутой вторичной обмотке играют большую роль высокочастотные потери в стали. К, при возбуждении высокой частотой отдельной катушки, насаженной на сердечник, получались следующие отношения реактивного тока, протекающего в катушку, к активному току (с точностью до 10%):

kgc	3	6	12	18	40	80
I_a	2,30	1,80	1,65	1,50	1,75	1,65

Сопоставление опытных результатов с расчетом. Рассматриваем случай, когда нейтраль вторичной обмотки заземлена, а вторичная обмотка закорочена. Для этого случая произведем сопоставление опытных кривых распределения потенциалов с расчетом по теории [Л. 1, 2]. При этом необходимо знать закономерности для функций взаимоиндукции.

Для упрощения вычислений будем представлять взаимоиндукции в виде экспоненциальных функций, что приближенно всегда можно сделать. Кроме того, при широких катушках функции взаимоиндукции, вычисленные на основе ближней теории, сами по себе экспоненциальны.

Электростатическую функцию взаимоиндукции (рис. 3) можно представить в виде:

$$n_0(z_0) = H \cdot e^{-\sigma |z_0|} \tag{4}$$

можно принять, что постоянная⁴

$$\sigma = \sqrt{\frac{C}{K}}, \tag{5}$$

C — емкость всей обмотки на землю; K — продольная емкость.

Постоянную H можно подсчитать по формуле [Л. 1]:

$$H = \frac{p}{2\sqrt{CK}}$$

Это последнее соотношение подтверждается опытом.

⁴ Длину обмотки здесь и далее принимаем равной длине.

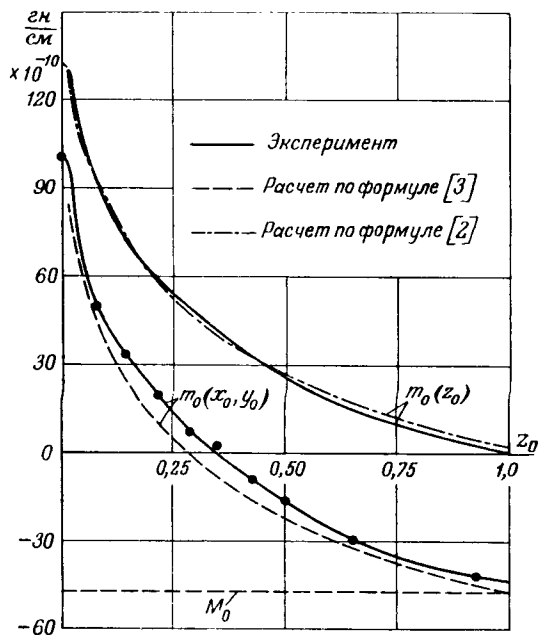


Рис. 4. Функции электромагнитной взаимоиндукции. Вторичная обмотка закорочена ($y_0 = 0$).

В формуле (3) для функции электромагнитной взаимоиндукции постоянная слагающая M_0 выпадает в результате ортогонализации функций при решении интегродифференциального уравнения [Л. 1].

При заземленной нейтрали колебательные составляющие тока переходного режима симметричны относительно середины обмоток, поэтому действие одной обмотки на другую равно нулю. Таким образом, отсутствие M_0 в окончательном выражении распределения потенциалов по обмотке оправдывается и с физической стороны. Функцию взаимоиндукции можно представить с достаточным приближением к опытной и теоретической зависимости интерполирующей зависимостью вида (рис. 4):

$$m_0(z_0) = F \cdot e^{-\rho |z_0|} - M_0, \tag{6}$$

где F и ρ — постоянные.

В нашем случае постоянные в формулах (4), (6) имеют следующие значения:

$$H = 14,5 \cdot 10^{11}; \sigma = 6,77; F = 131 \cdot 10^{-10}; \rho = 3,69.$$

Принимая конечное распределение потенциалов по обмотке в виде прямой и пользуясь формулами теории [Л. 1, 2], произведем подсчет распределения потенциалов (рис. 5).

Учитывая все принятые допущения, считаем, что степень совпадения теории и эксперимента удовлетворительна.

Для рассматриваемого случая включения обмоток проведено сопоставление кратности частот собственных колебаний, полученных из опыта на нашей модели, с кратностью частот, рассчитанных по теориям различных авторов:

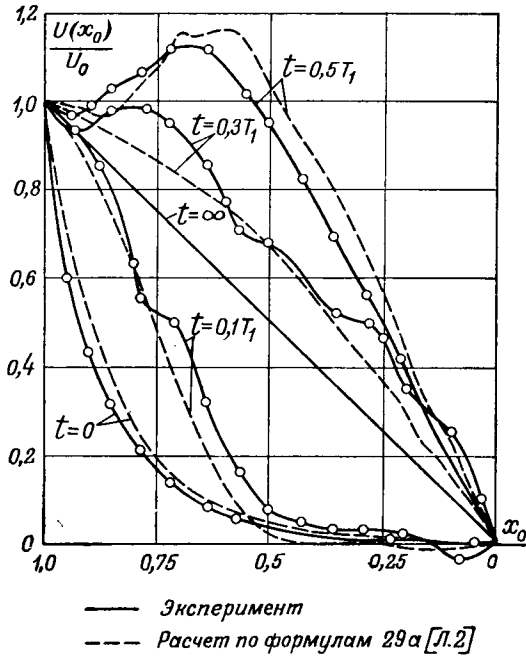


Рис. 5. Распределение потенциалов вдоль обмотки с заземленной нейтралью в различные моменты времени. Волна $1/600$ мксек. u_0 — амплитуда падающей волны. Вторичная обмотка закорочена. На кривых — моменты времени в долях основного периода T_1 .

В. А. Карасева [Л. 12], Г. Н. Петрова [Л. 3], Вагнера (Wagner) [Л. 6] и Бьюлей (Bewley) [Л. 5].

Как видно из рис. 6, ближе всего к опытной кривой проходят кривые по теориям В. А. Карасева и Г. Н. Петрова. В каждой из этих теорий расчет магнитных связей производится по-разному, что приводит к разной закономерности кратности периодов.

В реальных трансформаторах имеют место некоторые отступления от условий в наших моделях, а именно: усиление изоляции концевых катушек обмоток, наличие бака с маслом и пр. Для решающих гармоник эти отступления не имеют существенного значения.

Заключение. Изложенное выше не исчерпывает всех вопросов, которые пришлось решать при исследовании перенапряжений в подопытных моделях. Однако приведенные здесь результаты исследования магнитных и электро-

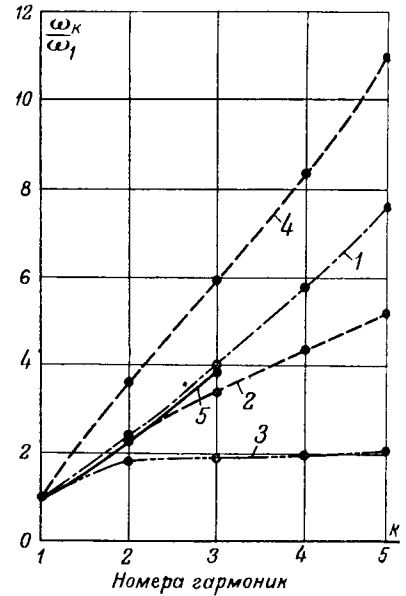


Рис. 6. Кратность частот собственных колебаний обмотки. Нейтраль заземлена, вторичная обмотка закорочена.

Кривая 1 — по В. А. Карасеву; 2 — по Г. Н. Петрову; 3 — по Вагнеру; 4 — по Бьюлею; 5 — экспериментальные данные.

статических связей, а также распределения потенциалов по обмотке и определение периодов собственных колебаний указывают на правильность исходных положений рассматриваемой теории.

Литература

1. В. А. Карасев. Теория электромагнитных процессов в обмотках. Госэнергоиздат, 1946.
2. В. А. Карасев. Теория расчета перенапряжений в обмотках трансформаторов. Электричество, № 11 — стр. 18, 1944.
3. Г. Н. Петров. К расчету перенапряжений в трансформаторах. Бюллетень ВЭИ, № 12, стр. 28, 1935.
4. В. Н. Глазанов. Теория перенапряжений в обмотках трансформаторов и защита их. ОНТИ, 1934.
5. Л. В. Бьюлей. Волновые процессы в линиях передачи и трансформаторах. ОНТИ. 1938.
6. Wagner, Колебания блуждающих волн в трансформаторах. Arch. für EI-lik, т. VI, стр. 301, 1918.



характеристиках преобразовательных установок

Кандидаты техн. наук А. В. БАЕВ, И. А. КРИЧЕНОВА, В. Е. ПОЛЯКОВ,
В. М. СИНЬКОВ и инж. В. Ю. СРОДНЫХ

Уральский политехнический институт имени Кирова

Режим работы преобразовательных (выпрямительно-инверторных) установок при заданных метрах оборудования

Приведена методика построения характеристик преобразовательных установок в координатах углов регулирования α и β . Наиболее важные для целей эксплуатации зависимости получены для случая наличия бесконечно большой индуктивности в цепи выпрямленного тока.

в работе, выведены и построены для случая наличия бесконечно большой индуктивности в цепи выпрямленного тока. Используя известные соотношения между углами α и β , сопротивлением цепи R и средними значениями выпрямленных напряжений и тока, можно получить следующие

величине напряжений переменного тока полностью определяется углом зажигания выпрямителя α

соотношения между углами α и β , сопротивлением цепи R и средними значениями выпрямленных напряжений и тока, можно получить следующие

ла опережения инвертора β . Поэтому наиболее удобно для эксплуатации таких установок строить зависимости между основными электрическими величинами в координатах β , α . Кривые голянных значений передаваемой мощности P , реактивной мощности Q_1 и Q_2 , значений выпрямленного напряжения U_1 и U_2 , коэффициентов мощности $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ и угла поворота инвертора δ , построенные в координатах β , α , являются основными характеристиками преобразовательной установки¹.

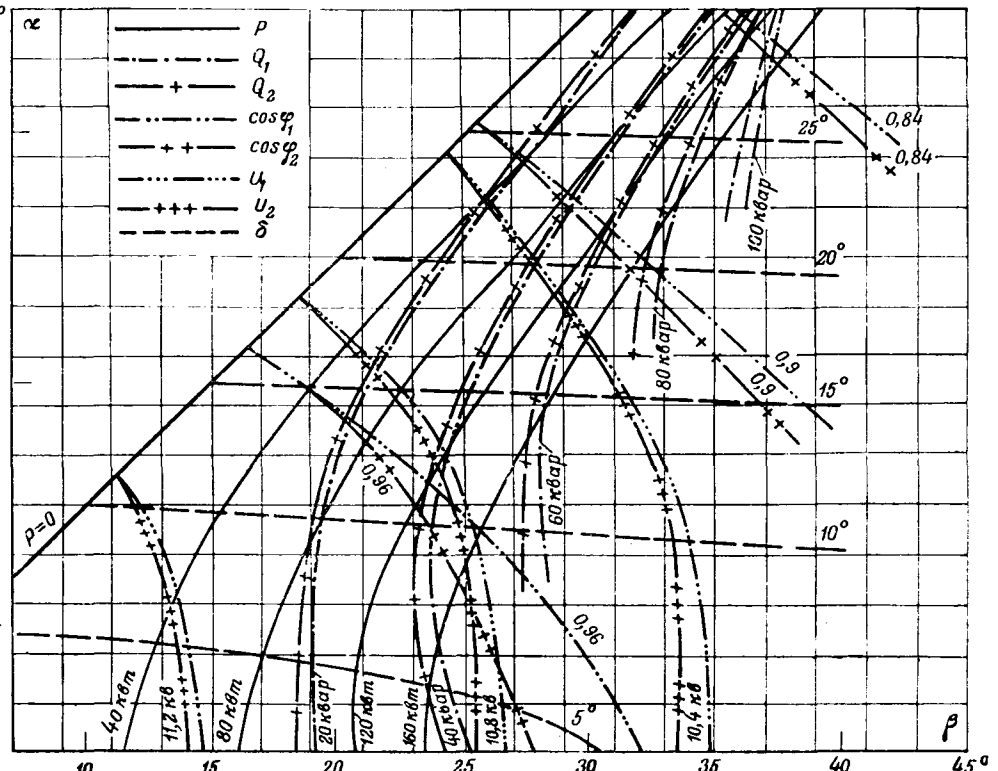


Рис. 1. Характеристики преобразовательной установки при $\alpha = 1$ ($r = 0$; $L = \infty$).

Построение характеристик в координатной сетке углов регулирования β и α дает возможность легко оплать их оптимальные соотношения при том значении передаваемой активной мощности и по условиям устойчивой работы установли и минимума потребляемой реактивной мощности. Характеристики при этих условиях выявляют, в каком диапазоне выгодно изменять углы регулирования, а также когда и каким образом целесообразнее изменить соотношение коэффициентов трансформации трансформаторов. Основные уравнения и зависимости, приводимые

выражения для выпрямленного тока и передаваемой мощности:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} m \sin \frac{\pi}{m} E_2}{\pi \left[R + \frac{m}{2\pi} (x_1 + x_2) \right]} (a \cos \alpha - \cos \beta), \quad (1)$$

$$P = P_1 \cos^2 \alpha + P_{12} \cos \alpha \cos \beta + P_2 \cos^2 \beta, \quad (2)$$

$a = \frac{E_{1m}}{E_{2m}}$ — отношение максимальных э. д. с. выпрямителя и инвертора на стороне переменного тока;

Индекс 1 относится к выпрямителю, 2 — к инвер-

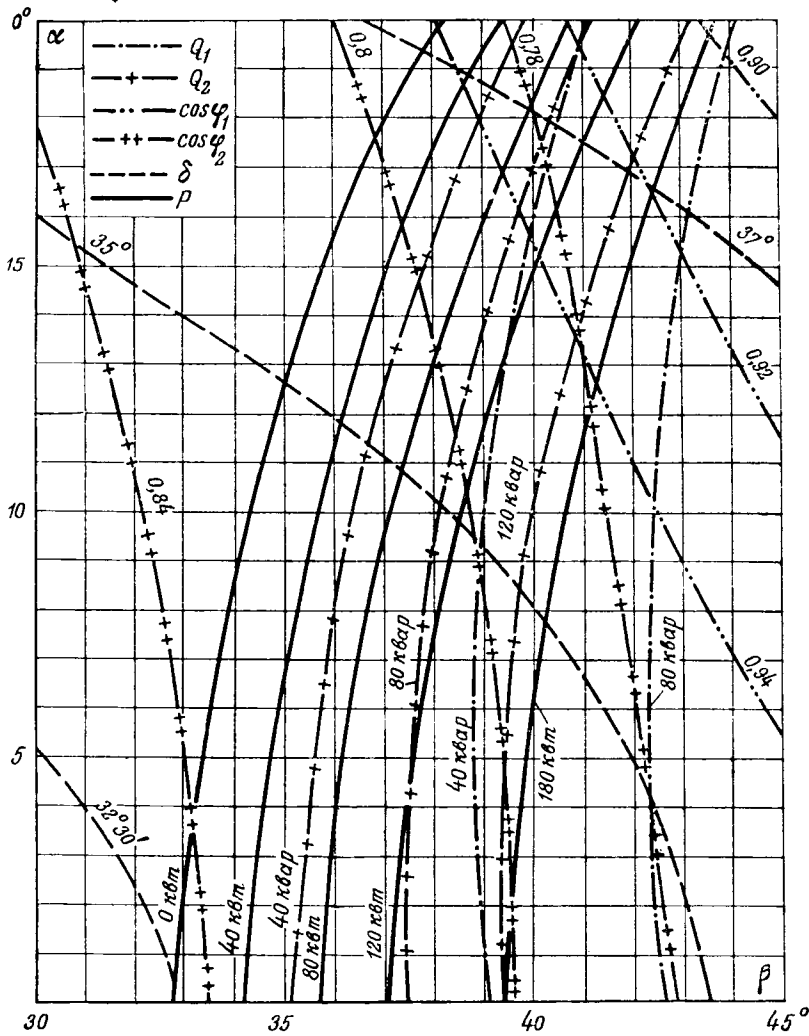


Рис. 2. Характеристики преобразовательной установки при $a = 0,84$ ($r = 0$; $L = \infty$).

E_1 и E_2 — действующие значения этих э. д. с.; m — число фаз;

x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления анодных цепей. В формуле (2) P_1 , P_{12} и P_2 — коэффициенты, имеющие размерность мощности и являющиеся функциями параметров линий, трансформаторов и схемы преобразования (числа фаз).

На рис. 1 и 2 показаны построенные в соответствии с выражениями (1) и (2) для $a = 1$ и $a = 0,84$ семейства линий постоянных мощностей в координатах β , α .

Построение линий постоянных реактивных мощностей Q произведено по уравнению

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где φ — угол сдвига фаз первых гармоник тока и напряжения. Пренебрежение потерями в трансформаторах и намагничивающей мощностью позволило установить общий характер зависимостей Q от a и степени снижения уровней напряжения на обоих концах.

Используя известные выражения для углов сдвига фаз основной волны φ_1 и φ_2 , получаем следующие уравнения, необходимые для построения

линий постоянных коэффициентов мощности выпрямителя и инвертора координатах β , α :

$$\cos \beta = 0,5a [(1 - H_1) 2 \cos \alpha + H_1 \cos (2\varphi - \alpha)],$$

$$\cos \alpha = 0,5a [(2 - H_2) \cos \beta + H_2 \cos (2\varphi - \beta)],$$

где

$$H_1 = \frac{R + B_1 + B_2}{B_1}; \quad H_2 = \frac{R + B_1 + B_2}{B_2}$$

$$B_1 = \frac{mx_1}{2\pi}; \quad B_2 = \frac{mx_2}{2\pi}.$$

Для построения линий постоянных значений угла погасания δ в координатах β , α из тех же исходных выжений находим:

$$\cos \alpha = \frac{1}{a} \left[\frac{I_k}{I_{2m}} \cos \delta + \cos \beta \left(1 - \frac{I_k}{I_{2m}} \right) \right]$$

где

$$I_k = \frac{1}{x_2} \sqrt{2 E_2 \sin \frac{\pi}{m}}$$

и

$$I_{2m} = \frac{E_{2m}}{R + B_1 + B_2}.$$

Введя аналогичное обозначение $\frac{E_{1m}}{R + B_1 + B_2}$, получаем уравнение построения линий равных напряжений

$$U_1 = (E_{1m} - B_1 I_{2m} a) \cos \alpha + B_1 I_{2m} a \cos$$

$$U_2 = (E_{2m} - B_2 I_{2m}) \cos \beta + B_2 I_{2m} a \cos$$

Все приведенные формулы, как и рис. 1 относятся к шестифазной схеме с нулем, с шестифазной на экспериментальной линии постоянного тока.

Построенные теоретически (эксплуатационные) характеристики преобразовательной установки на напряжение 12 кв были проверены экспериментально с хорошим совпадением результатов.

Эксплуатационные характеристики могут быть использованы для:

1) предварительного анализа режимов работы преобразовательной установки;

2) выбора оптимального режима работы установки эксплуатационным персоналом с учетом требований устойчивой работы инвертора;

3) выявления соотношений между основными величинами при разработке устройства автоматики;

4) анализа влияния колебаний напряжения в приемной сети и отклонения коэффициента трансформации выпрямителя инвертора на устойчивость и режимы работы преобразовательной установки.

Расчет нагревательных элементов электрических калориферов

Кандидат техн. наук А. Д. СВЕНЧАНСКИЙ и инж. С. А. МАЛЫШЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В электрических калориферах выделяющееся нагревательных элементов тепло передается воздушному потоку конвекцией.

Точный расчет теплопередачи конвекцией в электрокалориферах представляет значительные трудности ввиду сложности формы нагревательных элементов и неопределенности степени турбулентности воздушного потока. Учитывая это положение, авторами была сконструирована специальная опытная установка и проведено экспериментальное исследование коэффициентов теплоотдачи в электрокалориферах.

Установка представляла собой собственно электрокалорифер со съемными, удобно заменяемыми рамками с нагревательными элементами, пробный вентилятор и соединяющие их трубопроводы, работающие по замкнутому циклу. Для измерения расхода воздуха, а следовательно, и средней скорости была использована нормальная диафрагма диаметром 160 мм, выполненная из хромоникелевой жароупорной стали. Для обеспечения правильной работы расходомера для прямого участка трубопровода перед диафрагмой была взята в 4 м, т. е. 20D и 1 м или более после диафрагмы. Контрольные замеры трубчатых проточных элементов дали для средней скорости воздуха в калорифере очень хорошее совпадение с показаниями диафрагмы.

Регулирование воздушного потока осуществляется с помощью поворотной заслонки у вентилятора, что давало возможность изменять скорость в пределах от 5 до 20 м/сек. За заслонкой были установлены успокоители (трубки длиной 400 мм и диаметром 35 мм), поглощавшие вихри воздушного потока. Схема включения нагревателей давала возможность плавно регулировать подаваемое напряжение в больших пределах и подбирать тем самым необходимую мощность.

Температура нагревателей измерялась тонкочromельалюмелевыми термопарами, горячие концы которых вводились в высверленные в нагревателях отверстия и приваривались. Средние температуры воздушного потока измерялись перед и после калорифера с помощью рамочных термопар сопротивления. Опыты проводились при температурах воздушного потока 100...200°С, температура нагревательных элементов составляла 300...500°С.

Даны результаты экспериментальной работы по определению коэффициентов теплоотдачи проволочных и ленточных нагревателей электрических калориферов. Построены графики, удобные для проведения практических расчетов.

Исследованию подвергались рамочные, свободнообдуваемые проволочные и ленточные нагреватели с разным шагом,

установленные в количестве до 7 рамок последовательно по направлению воздушного потока, а также рамки со спиральными проволочными и ленточными нагревателями, выполненные в соответствии с типовыми промышленными конструкциями.

В результате проведенных опытов были получены зависимости коэффициентов теплоотдачи нагревателей от скорости воздушного потока в виде графиков для каждого типа нагревателя. Как видно из рис. 1, значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{полн}$ различны для разных удельных поверхностных мощностей нагревателей. Объясняется это тем, что некоторая часть тепла передается воздуху не непосредственно нагревателями, а излучается ими на стенки калорифера, и уже от стенок передается воздушному потоку. Если подсчитать количество излучаемой нагревателями энергии и вычесть его, то мы получим коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_{конв}$, значения которого почти не зависят от удельной поверхностной мощности.

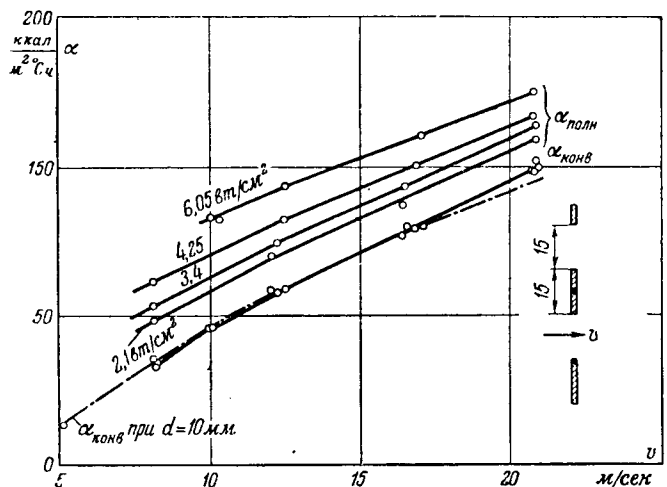


Рис. 1. Коэффициенты теплоотдачи α свободно обдуваемого ленточного нагревателя сечением 15×15 мм, расположенного длинной стороной поперек воздушного потока:

$$\alpha_{полн} = \frac{Q_{полн}}{F_H \Delta t_{cp}}; \quad \alpha_{конв} = \frac{Q_{полн} - Q_{изл}}{F_H \Delta t_{cp}}; \quad d_{эвк} = \frac{P_L}{\pi}$$

Сравнение полученных коэффициентов теплоотдачи для свободно обдуваемых проволочных и ленточных нагревателей показало, что при соотношении сторон ленты около 1 : 10 можно ленточные нагреватели заменить эквивалентными проволочными, причем при расположении ленты длинной стороной сечения вдоль направления движения воздушного потока эквивалентный диаметр для ленты будет равен ее периметру, деленному на 4,7, т. е.

$$d_{\text{экр}} = \frac{\Pi_s}{1,5\pi},$$

а при расположении ленты длинной стороной сечения поперек направления движения воздуха,

$$d_{\text{экр}} = \frac{\Pi_s}{\pi}.$$

Надо отметить, что в применяемых на практике конструкциях электрокалориферов лента всегда располагается именно длинной стороной сечения вдоль направления движения потока воздуха.

Сравнение ленточных и проволочных нагревателей показывает, что с точки зрения расхода никрома ленточные нагреватели всегда выгоднее проволочных, однако из конструктивных соображений (большей жесткости) для мелких сечений целесообразнее применять проволочные нагреватели (до диаметров проволоки 4,0...4,5 мм), а при больших — ленточные.

Из сравнения коэффициентов теплоотдачи проволочных и ленточных свободно обдуваемых зигзагообразных нагревателей с различным шагом выяснилось, что практически теплоотдача конвекцией не зависит от шага, если шаг полуволны равен или больше $2,5 d_{\text{экр}}$, что большей частью и имеет место.

Сравнение коэффициентов теплоотдачи нескольких последовательно установленных, по направлению движения воздуха, нагревателей показало, что теплоотдача конвекцией различных рядов также практически одинакова, если расстояние между соседними рядами не менее $7 d_{\text{экр}}$.

Значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией для свободно подвешенных проволочных спиралей мало отличаются от коэффициентов теплоотдачи конвекцией зигзагообразных проволочных нагревателей, если шаг спирали не менее $2,5 d$ проволоки, а диаметр спирали не более $10...12 d$.

Отклонения температур отдельных точек спиралей от средней при этом оказались равными максимум 13%, поэтому практически и для спиралей, и для прямых проволок при расчетах можно брать одни и те же значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией.

Сравнение условий теплоотдачи свободно обдуваемых нагревателей с теплоотдачей рамочных нагревателей показало, что свободно обдуваемые части рамочных нагревателей при равных условиях имеют те же температуры, что и свободно обдуваемые нагреватели, закрытые же крепежными деталями участки имеют более высокую

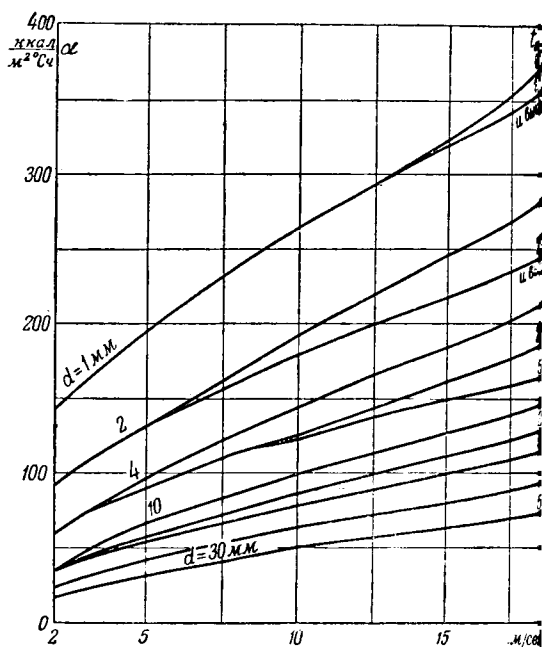


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи конвекцией нагревателей электрокалориферов в поперечном воздушном потоке.

температуру. Таким образом, полученными данными по коэффициентам теплоотдачи конвекции для свободно обдуваемых нагревателей можно пользоваться для всех типов рамочных нагревателей электрокалориферов, но следует иметь в виду наличие местных перегревов, охватывающих весьма ограниченные участки нагревателя, но могущих достигать величины в $200...220^\circ\text{C}$ (при максимальных удельных поверхностных мощностях). Эти перегревы необходимо иметь в виду при установлении допустимых рабочих температур нагревателей. Для того чтобы распространить полученные экспериментальные результаты на все применяемый в электрокалориферах диапазон сечений и температур, они были обработаны в больших размерных величинах и была получена для исследованных нагревателей единая обобщенная зависимость, связывающая критерий Нуссельта Рейнольдса: $Nu = 0,238 \cdot Re^{0,6}$ для значений $Re = 1000$ и выше. Для меньших значений критерия Рейнольдса $Re = 80...1000$ сохраняется известная зависимость:

$$Nu = 0,625 Re^{0,46}.$$

На этой основе был рассчитан график зависимости коэффициента теплоотдачи конвекцией нагревателей электрокалориферов в поперечном воздушном потоке от скорости последнего для эквивалентных диаметров от 1 до 30 мм и температур воздуха от 0 до 500°C (рис. 2).

Для упрощения расчета нагревателей электрокалориферов были построены более удобные для пользования графики допустимых (рекомендуемых) удельных поверхностных мощностей нагревателей в зависимости от скорости воздушного потока для различных эквивалентных диаметров и вполне определенных температур воздуха и в

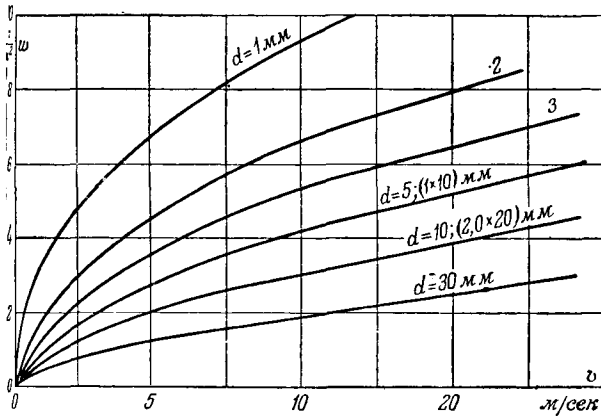


Рис. 3. Допустимая удельная поверхностная мощность нагревателей электрокалориферов при $t_{\text{возд}} = 200^\circ \text{C}$; $\Delta t = 300^\circ \text{C}$; $t_{\text{н}} = 500^\circ \text{C}$; $w_{\text{изл}} = 0,8 \dots 0,55 \text{ вт/см}^2$.

вателя. Графики эти (рис. 3 и 4) составлены для температур нагрева воздушного потока в электрокалорифере в 200 и 500°С. Предельная температура нагревателя была взята для первого случая 500°С, а для второго — 600°С. Такие ограничения предельной температуры нагревателей были приняты как из конструктивных соображений, так и из соображений возможности местных перегревов в закрытых крепежными деталями частях нагревателей.

По графикам рис. 3 и 4 может быть найдена допустимая удельная поверхностная мощность нагревателей с учетом лишь теплоотдачи непосредственно обтекающему их воздушному потоку, как уже указывалось, некоторая часть энергии излучается нагревателями на стенки калорифера и крепежные детали, от которых и передается воздушному потоку. Это количество добавочной энергии постоянное для каждого графика и равно как удельная поверхностная мощность w_1 . Заданное значение удельной мощности w_1 , передаваемой излучением, нужно прибавить к полученному из графика основному значению.

Меньшие значения $w_{\text{изл}}$ относятся к сильно экранированным нагревателям.

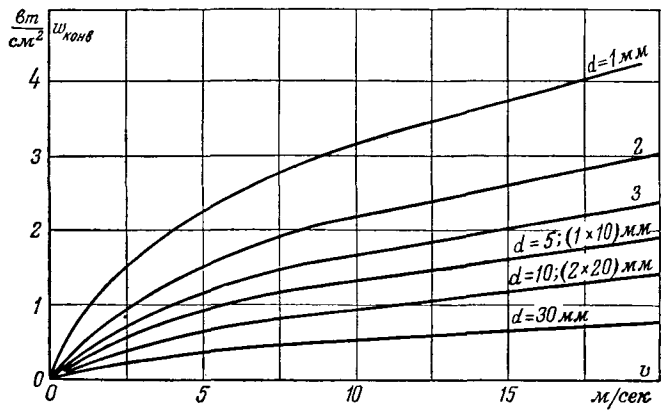


Рис. 4. Допустимая удельная поверхностная мощность нагревателей электрокалориферов при $t_{\text{возд}} = 500^\circ \text{C}$; $\Delta t = 100^\circ \text{C}$; $t_{\text{н}} = 600^\circ \text{C}$; $w_{\text{изл}} = 0,55 \dots 0,4 \text{ вт/см}^2$.

Таким образом, при расчете нагревателей электрокалориферов необходимо, прежде всего, по температуре нагрева воздуха выбрать соответствующий график. Из этого графика по ожидаемой скорости воздушного потока и имеющимся в наличии размерам нагревателя калорифера можно определить по графику основную удельную поверхностную мощность и к ней прибавить излучаемую мощность. По этой результирующей величине и производится расчет нагревателя.

Например, если задана температура нагрева воздуха в 200°С, скорость воздушного потока 15 м/сек и ставится нихромовая проволока диаметром в 3 мм, то по графику на рис. 3 находим допустимую удельную поверхностную мощность в 6,4 вт/см², и, считая, что нагреватель слабо экранирован, получаем окончательную удельную поверхностную мощность, равную $6,4 + 0,8 = 7,2 \text{ вт/см}^2$.

Скорость движения воздушного потока в электрокалорифере может быть получена из аэродинамического расчета. Обычно для электрокалориферов эта скорость берется равной 10...15 м/сек.

[5.3. 1952]



К теории преобразования схем Г. Крона

Кандидат техн. наук, доц. Н. Г. МАКСИМОВИЧ

Львовский политехнический институт

Разработанная Г. Кроном теория преобразования электрических схем [Л. 1] базируется на следующем выводе.

Показано, что основы теории преобразования схем Г. Крона содержат крупные ошибки, вследствие чего ряд положений названной теории является неправильным.

Кроме того, предлагается, что мгновенные значения суммарных мощностей рассматриваемых схем равны друг другу:

$$\vec{e} \vec{i} = \vec{E} \vec{I}.$$

Пусть электрическая схема, описываемая n независимыми линейными уравнениями, связывающими э. д. с. e_k с токами схемы i_k ($k=1, 2, 3, \dots, n$), выражена при помощи матричного уравнения:

$$\vec{e} = z \vec{i}, \quad (1)$$

где $\vec{e} = (e_1, e_2, e_3, \dots, e_n)$ — n — мерный вектор э. д. с.;

$\vec{i} = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_n)$ — n — мерный вектор токов¹;

z — квадратная матрица сопротивлений.

Г. Крон преобразует данную схему в некоторую новую схему, описываемую уже m независимыми уравнениями между ее э. д. с. E_k и токами I_k ($k=1, 2, 3, \dots, m$), причем, как правило, $m \neq n$ и желает представить взаимосвязи, существующие между э. д. с. и токами, в новой схеме при помощи матричного уравнения, аналогичного уравнению (1):

$$\vec{E} = Z \vec{I}, \quad (2)$$

где $\vec{E} = (E_1, E_2, \dots, E_m)$ — m — мерный вектор э. д. с. новой схемы;

$\vec{I} = (I_1, I_2, \dots, I_m)$ — m — мерный вектор токов новой схемы;

Z — квадратная матрица сопротивлений новой схемы.

Зависимость между токами новой схемы \vec{I} и токами данной схемы \vec{i} определяется при помощи матрицы преобразования C , которая найдется из геометрических взаимоотношений, существующих между данной и новой схемами;

$$\vec{i} = C \vec{I}. \quad (3)$$

Следует подчеркнуть, что Крон, пытаясь придать своей теории достаточно общий характер, считает, что хотя матрица C и определяется взаимоотношением рассматриваемых электрических схем, но все же преобразование (3) является, по его мнению, общим преобразованием токов.

¹ Вместо понятия многомерного вектора некоторые авторы применяют матрицу-столбец.

Это соотношение определяет, по Крону основную физическую связь, существующую между данной и преобразованной схемами.

На основании вышеизложенных оснований предпосылок находятся \vec{E} и Z новой преобразованной схемы следующим способом [Л. 1, стр. 11...12].

Подставляя (3) в уравнение (4), имеем:

$$\vec{e} C \vec{I} = \vec{E} \vec{I}.$$

Сокращая, получаем:

$$\vec{e} C = \vec{E},$$

$$\vec{E} = C_t \vec{e}$$

или

$$\vec{e} = C_t^{-1} \vec{E}.$$

При нахождении матрицы сопротивлений новой схемы в уравнение (1) подставляются значения \vec{e} и \vec{i} из зависимостей (3) и (8):

$$C_t^{-1} \vec{E} = z C \vec{I}.$$

После умножения сторон уравнения на C получится:

$$\vec{E} = C_t z C \vec{I}. \quad (4)$$

Сравнивая полученную зависимость с уравнением (2), имеем:

$$Z = C_t z C. \quad (5)$$

Г. Крон считает, что вышеизложенные положения о преобразовании схем, основанные в принципе инвариантности мощности, дают возможность находить э. д. с. \vec{E} , матрицу сопротивлений Z , а следовательно, на основании уравнения (2) и токи \vec{I} сложной схемы, зная э. д. с. \vec{e} и токи \vec{i} и сопротивления z более простой схемы.

Вышеприведенный вывод Г. Крона, являющийся основой его теории преобразования схем, в корне неправилен и содержит следующие грубые ошибки:

1. Неправильным является сделанный Г. Кроном переход от уравнения (5) к уравнению (6)

как нельзя делить уравнение (5) на \vec{I} . Общеизвестно, что в матричных уравнениях можно произвести сокращения на матрицу только в том случае, когда последняя является квадратной матрицей с детерминантом, отличным от нуля. В нашем

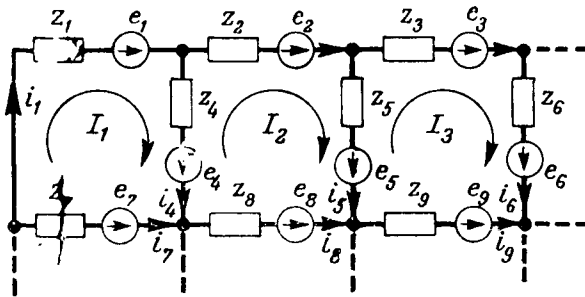


Рис. 1.

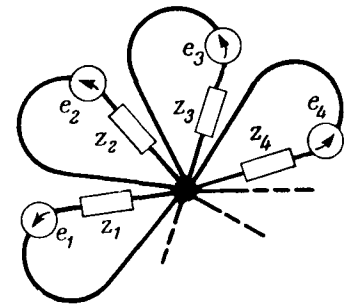


Рис. 2.

случае \vec{I} , являясь многомерным вектором тока, представляется в матричной форме как матрица-столбец, а следовательно, опущенное Γ . Кронем сокращение уравнения (5) являлось бы правильным только для одномерного, равного нулю, вектора \vec{I} .

2. Невозможным является получение из уравнения (7) зависимости (8), так как не существует в общем случае понятия C_i^{-1} . Матрица преобразования C , а следовательно, и транспонированная матрица C_t являются прямоугольными матрицами ($m \neq n$), а понятия обратной матрицы для прямоугольных матриц, как известно, не существует.

Несколько лет назад уже Э. А. Мееровичем [Л. 2] было указано, что зависимости (11) и (7) могут быть получены простым путем на основании I и II законов Кирхгофа и что нет никакой необходимости постулировать инвариантность мощности (4).

Одновременно следует подчеркнуть, что переход от системы э. д. с. и токов \vec{e} и \vec{i} к системе \vec{E} и \vec{I} обозначает не что иное, как переход от системы э. д. с. и токов отдельных ветвей схемы к системе э. д. с. и токов независимых контуров той же схемы. Уравнение (2) является не чем иным, как системой уравнений контурных токов данной схемы, записанной в матричной форме [Л. 5]. Уравнение (4) инвариантности мощности выполняется вследствие того, что преобразования, как это было сказано раньше, соответствуют переходу от токов ветвей к токам контуров одной и той же схемы.

С другой стороны, если рассмотрим преобразованную по Крону схему (рис. 2), полученную в результате соединения всех узлов данной схемы (рис. 1) в один узел, то хотя между параметрами преобразованной и данной схем существуют зависимости (7) и (11), на основании которых можно вычислить \vec{E} и Z , имея \vec{e} и z , но легко убедиться, что уравнение (4) инвариантности мощности для этих схем не выполняется.

Наконец, следует отметить, что нет никакой необходимости вычислять многомерный вектор \vec{E} и матрицу сопротивлений Z при помощи зависимостей (7) и (11).

Учитывая, что уравнение (2) представляет собой систему уравнений контурных токов, записанную в матричной форме, мы можем величины \vec{E}

и Z определить непосредственно из схемы (рис. 1).

В самом деле, \vec{E} является многомерным вектором э. д. с. контуров, т. е. каждая составляющая этого вектора равняется сумме э. д. с. соответствующего контура:

$$\vec{E} = [(e_1 + e_4 - e_7), (e_2 + e_5 - e_8 - e_4), (e_3 + e_6 - e_9 - e_5), \dots].$$

Легко видеть, что эти составляющие — правые стороны уравнений контурных токов.

Матрица сопротивлений является диагонально-симметричной матрицей. Элементы, расположенные по диагонали этой матрицы, представляют собой сопротивления, равные сумме сопротивлений ветвей соответствующих контуров. В любой клетке l -той строки и k -го столбца матрицы помещены сопротивления ветви общей l -му и k -му контурам, причем сопротивления эти ставятся со знаком плюс, если контурные токи в рассматриваемой ветви имеют согласное направление, и со знаком минус, если направления контурных токов в ветви противоположны.

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 + z_4 + z_7, & -z_4 & 0 & \dots \\ -z_4 & z_2 + z_5 + z_8 + z_4, & -z_5 & \dots \\ 0 & -z_5 & z_3 + z_6 + z_9 + z_5, & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Таким образом, как видим, матрица Z — это матрица, составленная из коэффициентов уравнений контурных токов.

Из вышеизложенного следует, что подвергающаяся уже неоднократной критике [Л. 3, 4] так называемая теория преобразования Г. Крона базируется на ложном, неправильном выводе.

Теория эта не является столь общей, как ее представляет автор, и требует коренной, критической переработки.

Литература

1. G. Крон. The application of tensors to the analysis of rotating electrical machinery, 1942.
2. Э. А. Меерович. Геометрическая теория электрических цепей. Электричество, № 2, 1947.
3. А. В. Берендеев. О работах Крона по применению тензорного исчисления в электротехнике. Электричество, № 12, 1950.
4. Л. Н. Грузов. К статье А. В. Берендеева „О работах Крона“. Электричество, № 3, 1951.
5. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд. АН СССР, 1951.

[9. 11. 1951]



Расчет цепей с нелинейными элементами методом поправок

Доктор техн. наук, проф. Р. А. ВОРОНОВ

Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта

Определение токов отдельных участков цепи, содержащих нелинейные элементы, сравнительно просто проводится для постоянного тока, но встречает большие трудности при переменном токе, главным образом из-за наличия сдвигов фаз между токами и напряжениями.

Эти трудности возрастают в тех случаях, когда нелинейные элементы не обладают тепловой инерцией и становятся причиной нарушения синусоидальности токов.

Если в цепи имеется только один нелинейный элемент, то оказывается очень удобным представлять всю остальную часть цепи в виде линейного

Рассматривается метод расчета цепей с нелинейными элементами, при котором сначала определяются токи и напряжения по ориентировочно выбранным значениям сопротивлений этих элементов, а затем по их характеристикам находят поправки. После двух или даже одной поправки полученные результаты оказываются достаточно точными. Метод рассчитан на цепи постоянного и синусоидального переменного токов, но во многих случаях он дает хорошие результаты и в тех случаях, когда нелинейные элементы вызывают появление несинусоидальности кривых.

и не могут быть распределены на цепи с несколькими нелинейными элементами. Если при этом требуется определить значения только для одного режима работы, они оказываются несколько громоздкими.

В настоящей работе показано, как подобное

представление цепи может быть использовано для ее расчета без проведения графических построений и как этот расчет может быть распространен на случай нескольких различных нелинейных элементов.

Представляя всю цепь в виде схемы рис. 1 где Z_n — вынесенный нелинейный элемент с большой тепловой инерцией, вольтамперная характеристика которого представлена на рис. 2, можно записать соотношение между токами и напряжениями:

$$\dot{U} = A\dot{U}_n + B\dot{I}_n = (AZ_n + B)\dot{I}_n.$$

Если задаться произвольным значением сопротивления нелинейного элемента Z_1 , то соответствующий ток и напряжение на нем будут:

$$\dot{I}_{n1} = \frac{\dot{U}}{AZ_1 + B} = \dot{I}_a;$$

$$\dot{U}_{n1} = \dot{I}_{n1}Z_1 = \frac{\dot{U}Z_1}{AZ_1 + B} = \dot{U}_b.$$

Если бы принятое сопротивление Z_1 соответствовало по своей величине сопротивлению нелинейного элемента при данном режиме его работы, то точка n , определяемая значениями \dot{I}_{n1} и \dot{U}_{n1} , попала бы на характеристику рис. 2. В действительности эта точка окажется в стороне от характеристики и тем дальше от нее чем с большей ошибкой было выбрано сопротивление.

Используя характеристику, определим, какому току \dot{I}_b соответствует найденное напряжение \dot{U}_b и какому напряжению \dot{U}_a соответствует найденный ток \dot{I}_a . Эти значения определяют точки a и b характеристики. В цепи постоянного тока истинное положение точки характеристики, определяющей работу нелинейного элемента в данном режиме, будет обязательно

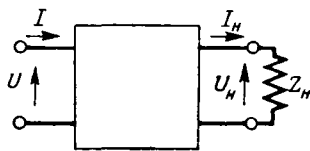


Рис. 1.

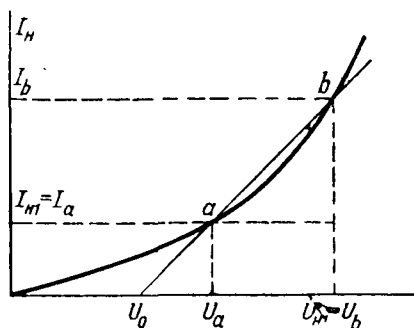


Рис. 2.

четырёхполюсника, нагрузкой которого служит нелинейный элемент. Когда нет искажения синусоидальности или ею можно пренебречь, то подобное представление позволяет использовать построение характеристик четырёхполюсника и нагрузки [Л. 1] или построение круговых диаграмм [Л. 2].

Эти же построения легко проводятся и для цепей постоянного тока.

Такие графоаналитические методы решения удобны, но не всегда могут быть использованы

жать на участке $a-b$ кривой. В цепях переменного тока при наличии больших сдвигов фаз а точка может выйти за участок $a-b$, но е же будет лежать близко от него.

Спрямяя участок $a-b$ характеристики, можно выразить для него соотношение между U_n и I_n уравнением:

$$\dot{U}'_n = \dot{U}_0 + Z_\partial \dot{I}'_n \quad (3a)$$

$$U'_n = U_0 + z_\partial I'_n, \quad (3b)$$

$$Z_\partial = z_\partial e^{j\varphi_n}$$

представляет среднее значение динамического сопротивления нелинейного элемента для данного участка характеристики. Значение тока нелинейного элемента, отвечающее этой спрямленной характеристике, может быть получено из соотношений (1) и (3):

$$\dot{U} = A (\dot{U}_0 + Z_\partial \dot{I}'_n) + B \dot{I}'_n,$$

откуда

$$\dot{I}'_n = \frac{\dot{U} - A\dot{U}_0}{AZ_\partial + B}; \quad \dot{U}'_n = \frac{\dot{U}Z_\partial + \dot{U}_0B}{AZ_\partial + B}. \quad (4)$$

Сравнивая полученное выражение (4) для спрямленной характеристики с полученным ранее выражением (2) для предварительно выбранного сопротивления Z_1 , найдем поправку $\Delta\dot{U}'_n$, которую нужно прибавить к значению \dot{U}'_n для получения более точного значения \dot{U}'_n :

$$\Delta\dot{U}'_n = U'_n - \dot{U}'_n = \frac{\dot{U}_0(AZ_1 + B) - \dot{U}(Z_1 - Z_\partial)}{(AZ_\partial + B)(AZ_1 + B)} B. \quad (5)$$

Величину этой поправки легко выразить через найденные ранее значения токов и напряжений, соответствующих концам спрямленного участка характеристики. Так как

$$z_\partial = \frac{U_b - U_a}{I_b - I_a}; \quad \frac{I_b}{I_a} = \frac{U_b - U_0}{U_a - U_0}; \quad z_1 = \frac{U_b}{I_a}$$

следовательно,

$$U_0 = \frac{U_a I_b - U_b I_a}{I_b - I_a},$$

то, принимая во внимание соотношение (1), получим при отсутствии сдвигов фаз (для постоянного или переменного тока в цепи с чисто активными сопротивлениями)

$$\Delta U_n = \frac{(U_a - U_b)(I_a - I_b)B}{(U_a - U_b)A + (I_a - I_b)B}.$$

Так как для четырехполюсника

$$\frac{B}{A} = z_{окз}$$

равно сопротивлению обратного короткого замыкания, то окончательно будем иметь для поправки выражение

$$\Delta U_n = \frac{(U_a - U_b)(I_a - I_b)z_{окз}}{(U_a - U_b) + (I_a - I_b)z_{окз}}. \quad (6)$$

Эту поправку следует прибавить к полученному значению напряжения $U_n = U_b$:

$$U'_n = U_n + \Delta U_n. \quad (7)$$

Аналогичную поправку найдем и для тока:

$$\Delta I_n = - \frac{(U_a - U_b)(I_a - I_b)}{(U_a - U_b) + (I_a - I_b)z_{окз}}, \quad (8)$$

которую следует прибавить к значению тока:

$$I'_n = I_n + \Delta I_n. \quad (9)$$

Поправка может рассматриваться как появление дополнительного тока, вызванного при обратном коротком замыкании включением э. д. с., приложенной к выходным зажимам (место нелинейного элемента) и равной найденной поправке для напряжения ΔU_n , что дает:

$$\Delta I_n = - \frac{\Delta U_n}{z_{окз}}. \quad (10)$$

Для цепи синусоидального переменного тока при наличии сдвига фаз, вызванных линейным четырехполюсником или нелинейным реактивным элементом,¹ поправки $\Delta\dot{U}'_n$ и $\Delta\dot{I}'_n$ уже не будут совпадать по фазе с самими исправляемыми величинами \dot{U}'_n и \dot{I}'_n , что приводит к необходимости производить их сложение уже не алгебраически, а геометрически. Полагая

$$Z_1 = z_1 e^{j\varphi_n}, \quad Z_\partial = z_\partial e^{j\varphi_n}, \quad Z_{окз} = z_{окз} e^{j\varphi_{окз}},$$

$$\dot{U}'_n = U_n e^{j\psi},$$

получим поправку для напряжения

$$\Delta\dot{U}'_n = \Delta U_n e^{j\beta} = \frac{(U_a - U_b)(I_a - I_b)z_{окз} e^{j(\psi + \varphi_{окз} - \varphi_n)}}{(U_a - U_b) + (I_a - I_b)z_{окз} e^{j(\varphi_{окз} - \varphi_n)}} \quad (11)$$

и для тока

$$\Delta\dot{I}'_n = - \frac{\Delta\dot{U}'_n}{Z_{окз}} = - \frac{\Delta U_n}{z_{окз}} e^{j(\beta - \varphi_{окз})} = \Delta I_n e^{j(\beta - \varphi_{окз})}. \quad (12)$$

Нелинейный элемент с большой тепловой инерцией может быть только активным, и в этих уравнениях угол φ_n следует принять равным нулю².

Значения напряжения и тока после внесения этих поправок (их модули) могут быть получены из векторной диаграммы рис. 3 по соотношениям для косоугольных треугольников

$$U'_n = \sqrt{U_n^2 + (\Delta U_n)^2 + 2U_n \Delta U_n \cos(\beta - \psi)},$$

$$I'_n = \sqrt{I_n^2 + (\Delta I_n)^2 + 2I_n \Delta I_n \cos(\beta - \psi - \varphi_{окз} + \varphi_n)}. \quad (13)$$

¹ Последнее только при возможности пренебрежения появляющейся при этом несинусоидальностью.

² Эти соотношения могут быть использованы для расчетов и при наличии нелинейных безинерционных элементов как активных, так и реактивных, почему угол φ_n взят в них в общем виде.

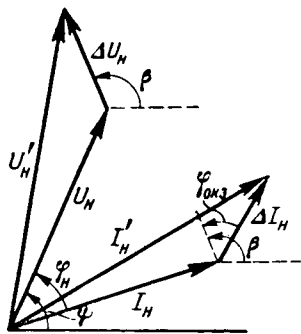


Рис. 3.

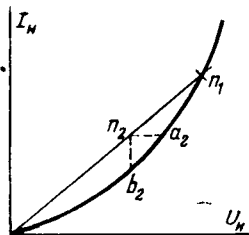


Рис. 4.

При малых значениях поправок по сравнению с самими исправляемыми величинами (менее 10%) или же при углах, близких к нулю или 180° (косинусы более 0,9), с вполне достаточной точностью можно воспользоваться соотношениями

$$\begin{aligned} U'_N &= U_N + \Delta U_N \cos(\beta - \psi), \\ I'_N &= I_N + \Delta I_N \cos(\beta - \psi - \varphi_{окз} + \varphi_N). \end{aligned} \quad (14)$$

Найденные значения U'_N и I'_N будут соответствовать спрямленной характеристике и тем ближе к истинным, чем больше подходит прямая к данному участку кривой. Если точка n' , определяемая этими значениями, все-таки еще далека от характеристики, то, исходя из ее координат, можно повторно найти поправки для нового участка характеристики (уже меньшего, чем первоначальный), затем вновь и так далее до тех пор, пока результат не получится с требуемой точностью. Обычно уже после второй поправки положение точки не будет отличаться от кривой характеристики, в большинстве же случаев можно ограничиться даже одной первой поправкой.

Расстояние между точками a и b и точность результата после первой поправки во многом зависит от выбора предварительного значения сопротивления Z_1 . Предполагая работу нелинейного элемента в определенной части характеристики, следует для значения сопротивления Z_1 выбирать величину, соответствующую середине этого участка. После определения положений точек a и b можно, если они окажутся далеко друг от друга, вместо вычисления поправок взять новое значение для сопротивления Z_1 по середине этого участка, вновь вычислить значения тока и напряжения и только после этого уже вводить поправки.

Если характеристика близка к прямолинейной, то имеет смысл первое вычисление произвести или для $Z_1=0$ (короткое замыкание), или же для $Z_1=\infty$ (холостой ход). В этом случае одна из поправок будет сразу давать соответствующее значение тока или напряжения.

Если в цепи имеется нелинейный безинерционный элемент (активный или реактивный), то, строя для него вольтамперную характеристику в действующих значениях и пренебрегая получающимися при этом искажениями синусоидальности кривых (если они не слишком велики),

можно распространить на такие цепи рассмотренный метод расчета. Точность получаемых результатов в большинстве случаев оказывается достаточно точной. Для реактивных элементов угол φ_n следует брать по эквивалентным синусоидам и учитывать его изменение при внесении поправок. Нелинейный реактивный элемент удобно рассматривать так же, как параллельное соединение реактивного элемента со сдвигом в 90° и активный элемент, который часто можно принять линейным.

Рассматриваемый метод расчета дает возможность находить изменения любого напряжения или тока, получающиеся в связи с изменением приложенного напряжения сети. Если для некоторого значения U_1 напряжения сети найдена точка n_1 характеристики нелинейного элемента (рис. 4) и определены все остальные токи и напряжения цепи, то для нового напряжения сети, если бы сопротивление нелинейного элемента оставалось неизменным, точка перешла бы в точку n_2 , получаемую из пропорции

$$\frac{on_1}{on_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

В таком же отношении изменились бы и все остальные токи и напряжения. Находя на характеристике соответствующие точки a_2 и b_2 , можно указанным выше путем определить поправку для напряжения на нелинейном элементе, а затем, считая, ее за дополнительную э. д. с., найти соответствующие поправки и для остальных значений. Повторяя все для ряда значений напряжения сети, можно построить все необходимые характеристики.

Этот метод постепенного приближения может быть распространен на цепи с несколькими нелинейными элементами. Выбирая предварительные значения сопротивлений для всех нелинейных элементов и рассматривая один из них в виде нагрузки, находим для него поправки для напряжения и тока и определяем новое, исправленное значение сопротивления. Принимая теперь это новое значение, находим поправки для второго нелинейного элемента, считая уже его в качестве нагрузки, затем то же повторяем для следующего элемента и так далее. После внесения поправки во все сопротивления нелинейных элементов вновь вносим поправку в сопротивление первого элемента, затем второго и так далее. Обычно оказывается достаточным двух таких обходов всех элементов и дальнейших поправок уже не требуется.

Применение этого метода дает возможность быстро и просто находить с достаточной точностью все токи и напряжения цепи при наличии одного и даже нескольких нелинейных элементов.

Для иллюстрации рассмотренного метода рассмотрим два числовых примера расчета.

Приложение 1. В схеме рис. 5, включенной на напряжение 120 в переменного тока, имеется активное сопротивление $R=25$ ом, катушка с сопротивлением $Z_0=20 + j45$ ом и нелинейный активный элемент H_3 , вольт-

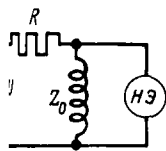


Рис. 5.

амперная характеристика которого приведена на рис. 6. Требуется определить токи и напряжения отдельных участков цепи.

В соответствии с характеристикой следует, что сопротивление $HЭ$ может изменяться в пределах от 20 до 75 $ом$. Выбираем среднее значение $z_1 = 50$ $ом$. Для линейной части

обычным путем определяем коэффициенты четырехугольника:

$$A = 1,29 \angle -21^\circ; B = 25 \angle 0^\circ; C = 0,0203 \angle -66^\circ; D = 1 \angle 0^\circ$$

то сопротивление обратного короткого замыкания

$$Z_{окз} = \frac{B}{A} = 19,4 \angle 21^\circ.$$

выбранного значения сопротивления $HЭ$ находим ток в нем:

$$I_n = \frac{\dot{U}}{AZ_1 + B} = \frac{120 \angle 0^\circ}{1,29 \cdot 50 \angle -21^\circ + 25 \angle 0^\circ} = 1,36 \angle -15^\circ 10'$$

напряжение на его зажимах

$$\dot{U}_n = I_n Z_1 = 1,36 \cdot 50 \angle -15^\circ 10' = 68 \angle -15^\circ 10'.$$

ответствующая этим значениям точка n определит на характеристике рис. 6 точки a и b со значениями:

$$I_a = 1,36 \text{ а}; I_b = 1,53 \text{ а}; U_a = 45 \text{ в}; U_b = 68 \text{ в}.$$

по уравнению (11) находим поправку для напряжения

$$\Delta \dot{U}_n = \frac{(45 - 68)(1,36 - 1,58) \cdot 19,4 \angle (21^\circ - 15^\circ 10')}{(45 - 68) + (1,36 - 1,58) \cdot 19,4 \angle 21^\circ} = -3,64 \angle 1^\circ 25',$$

по уравнению (12) поправку для тока

$$\Delta I_n = -\frac{-3,64 \angle 1^\circ 25'}{19,4 \angle 21^\circ} = 0,188 \angle -19^\circ 35'.$$

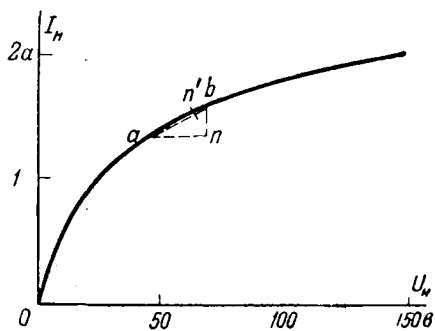


Рис. 6.

как эти поправки малы по сравнению с самими величинами, то можно воспользоваться уравнениями (14):

$$U'_n = 68 - 3,64 \cdot \cos(1^\circ 25' + 15^\circ 10') = 64,5 \text{ в},$$

$$I'_n = 1,36 + 0,188 \cdot \cos(1^\circ 25' + 15^\circ 10' - 21^\circ) = 1,54 \text{ а}.$$

ответствующая этим значениям точка n' лежит так близко к характеристике, что дальнейшего уточнения не требуется. При этом сопротивление $HЭ$

$$R_n = \frac{64,5}{1,54} = 42 \text{ ом}$$

Ток в сопротивлении R определится как сумма тока, проходящего в нем при первоначально принятом сопротивлении $HЭ$:

$$I_1 = \dot{U} \frac{CZ_1 + D}{AZ_1 + B} = I_n (CZ + D) = 2,30 \angle -48^\circ 10'$$

и добавочного тока, получающегося при обратном коротком замыкании:

$$\Delta I_1 = -\frac{\Delta \dot{U}_n}{B} = 0,145 \angle 1^\circ 25'.$$

Величина результирующего тока может быть получена или в комплексном виде

$$I'_1 = I_1 + \Delta I_1 = 2,4 \angle -45^\circ 10'$$

или же по уравнению (14)

$$I'_1 = 2,30 + 0,145 \cos(-45^\circ 10' - 1^\circ 25') = 2,4 \text{ а}.$$

Конечно, это значение можно найти и не путем введения поправки, а непосредственно по окончательному значению сопротивления $HЭ$.

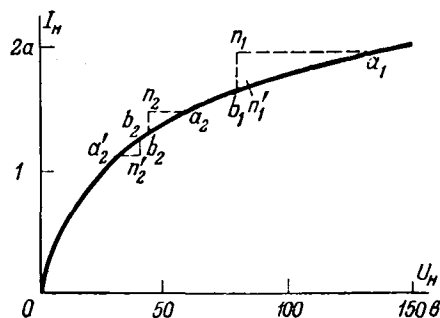


Рис. 7.

Приложение 2. В цепи рис. 5 активное сопротивление R заменено на активный нелинейный элемент $HЭ1$, имеющий такую же характеристику, как и второй нелинейный элемент $HЭ2$. Их характеристика приведена на рис. 7. Требуется найти токи в ветвях цепи.

Для удобства выразим токи обоих $HЭ$ через их сопротивления. Для $HЭ1$ имеем:

$$I_{n1} = 120 \frac{R_2 + 20 + j45}{R_1 R_2 + (R_1 + R_2)(20 + j45)}$$

и для $HЭ2$

$$I_{n2} = 120 \frac{20 + j45}{R_1 R_2 + (R_1 R_2)(20 + j45)}.$$

Полагаем первоначально значения их сопротивлений $R_1 = 40$ и $R_2 = 30$ $ом$ (в $HЭ1$ ток больше, чем в $HЭ2$, следовательно, у первого будет большее сопротивление). Находим ток в $HЭ2$:

$$I_{n2} = 1,44 \angle 15^\circ 30'$$

и напряжение на его зажимах

$$\dot{U}_{n2} = 43,2 \angle 15^\circ 30'.$$

Этим значениям соответствует точка n_2 и участок $a_2 b_2$ характеристики. По середине этого участка берем новое значение сопротивления для $HЭ2$:

$$R'_2 = \frac{48}{1,4} = 34,3 \text{ ом}.$$

По этому значению находим ток в $HЭ1$:

$$I_{n1} = 1,95 \angle -10^\circ 50'$$

и напряжение на его зажимах

$$\dot{U}_{n1} = 78,0 \angle -10^\circ 50'.$$

Эти значения определяют точку n_1 и участок $a_1 - b_1$ характеристики. Определив для остальной части цепи сопротивление обратного короткого замыкания

$$Z_{окз} = 23,9 \angle 29^\circ 20'$$

и беря по характеристике значения

$$U_{a_1} = 143 \text{ в}, \quad I_{b_1} = 1,64 \text{ а},$$

находим поправки для тока и напряжения

$$\Delta U_{n_1} = 6,8 \angle 13^\circ 15', \quad \Delta I_{n_1} = -0,28 \angle -13^\circ.$$

Исправленные значения тока и напряжения будут:

$$U'_{n_1} = 78,0 + 6,8 \cdot \cos 24^\circ 10' = 84,2 \text{ в},$$

$$I'_{n_1} = 1,95 - 0,28 \cdot \cos 2^\circ 10' = 1,67 \text{ а},$$

что соответствует сопротивлению

$$R'_2 = \frac{84,2}{1,67} = 50,4 \text{ ом}.$$

Принимая это значение сопротивления, находим ток и напряжение для $HЭ2$:

$$I_{n_2} = 1,16 \angle 18^\circ, \quad U_{n_2} = 39,8 \angle 18^\circ.$$

Эти значения определяют участок характеристики $a'_2 - b'_2$, имеющий

$$U_{a_2} = 35 \text{ в}, \quad I_{b_2} = 1,23 \text{ а}.$$

Вычислив сопротивление обратного короткого замыкания, можно легко определить поправки для напряжения и т.

$$\Delta U_{n_2} = -1,5 \angle 42^\circ 55'; \quad \Delta I_{n_2} = 0,05 \angle 7^\circ 30'.$$

Исправленные напряжения и ток будут:

$$U'_{n_2} = 39,8 - 1,5 \cos 24^\circ 55' = 38,4 \text{ в},$$

$$I'_{n_2} = 1,16 + 0,05 \cos 10^\circ 30' = 1,21 \text{ а},$$

что соответствует сопротивлению $HЭ2$

$$R''_2 = \frac{38,4}{1,21} = 31,8 \text{ ом}.$$

Если теперь по этому сопротивлению найти ток и напряжение для $HЭ1$, то они определяют точку n_1 , так близкую к характеристике, что дальнейшего внесения поправок не потребуется. Окончательно можно принять сопротивления нелинейных элементов 31,8 и 50,4 ом. На $HЭ1$ и $HЭ2$ будут напряжения 84,3 и 38,4 в, через них будут проходить токи 1,67 и 1,21 а.

Литература

1. Р. А. Воронов. Графоаналитический метод построения характеристик нелинейных цепей переменного и постоянного токов. Труды ТЭМИИТ. Выпуск XVI. Трансформаториздат, 1950.
2. Р. А. Воронов и Г. Ф. Пономарева. Применение круговых диаграмм для исследования нелинейных цепей. Электричество, № 12, 1951.

[28. 3. 19]



Объективный люксметр для измерения малых освещенностей

Доцент М. А. ОСТРОВСКИЙ

Московский инженерно-строительный институт имени Куйбышева

Как известно, для большинства наружных осветительных установок величина нормированной освещенности составляет

всего несколько люксов и даже десятых долей люкса. Например, согласно действующему ГОСТ 3825-47 минимальная освещенность в установках наружного освещения промышленных предприятий составляет в зависимости от точности выполняемых работ от 0,5 до 20 лк. «Руководящими указаниями по устройству и эксплуатации уличного освещения» регламентируются минимально допустимые значения освещенности проезжей части улиц различного класса от 0,2 до 6,0 лк.

Для правильной эксплуатации и контроля за состоянием указанных осветительных установок необходим прибор, позволяющий измерять освещенность в пределах от 0,1 до 50 лк, с достаточной для практики точностью.

За последние годы получили большое распространение объективные люксметры с селеновым фотоэлементом. Однако для измерения освещенности

Приводится описание нового типа объективного люксметра, предназначенного для измерения освещенности от 0,1 лк и выше в установках наружного освещения. Испытания опытного образца люксметра показали его пригодность для указанных целей.

в наружных осветительных установках эти люксметры малоприменимы в силу их недостаточной чувствительности. Для измерения освещенности порядка 0,1 лк необходимо,

чтобы при наибольшей практически применяемой площади фотоэлемента в 20 см² чувствительность гальванометра составляла 0,5 · 10⁻⁷ а. Изготовить простой переносный люксметр для работы в наружных условиях с гальванометром такой чувствительности практически невозможно. Следует заметить, что увеличение площади светочувствительной поверхности фотоэлемента не приводит к значительному увеличению чувствительности люксметра, так как одновременно уменьшается сопротивление запирающего слоя фотоэлемента, а следовательно, уменьшается его интегральная чувствительность.

Существует большое количество разнообразных конструкций люксметров, основанных на субъективном методе измерений. Наиболее пригодными для измерения низких значений освещенности

енности являются люксметр ГОИ и люксметр, разработанный Академией коммунального хозяйства имени Памфилова и предназначенный специально для измерения малых освещенностей наружных осветительных установках [Л. 1]. Однако этим приборам присущи все недостатки, являющиеся местом при субъективном методе измерений, наряду со сложностью их изготовления и эксплуатации.

Для установок наружного освещения нет необходимости в особо высокой степени точности измерения освещенности. Приходится учитывать едифичность условий измерений на улицах и роительных площадках, а также недостаточный выкв в фотометрировании обслуживающего персонала. Поэтому применение в этих условиях ожных в обращении и чувствительных к пересу приборов является нецелесообразным.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что в настоящее время мы не располагаем прибором, предназначенным для измерения освещенности в установках наружного освещения и удовлетворяющего следующим требованиям:

1. Прибор должен позволять измерять освещенность в пределах от 0,1 до 50 лк.
2. Прибор должен быть простым в обращении, удобным в эксплуатации и пригодным к переноске.
3. Ошибка измерений не должна превышать 10%.

В соответствии с этими требованиями Кадрой электротехники Московского инженерно-строительного института имени Куйбышева в 60—1951 гг. были проведены разработка и изготовление опытного образца люксметра, отвечающего указанным требованиям.

Наиболее пригодной для указанных целей оказалась схема с так называемым «конденсированием электрической энергии» [Л. 2]. Этот принцип был использован Д. А. Шкловер (ВЭИ) при разработке бактметра — прибора, предназначенного для измерения ультрафиолетовой радиации [3].

На рис. 1 изображена указанная схема. При освещении фотоэлемента 1 с внешним фотоэффектом в цепи возникает фототок i , заряжающий конденсатор 2. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на конденсаторе U_c не станет равным потенциалу зажигания U_3 неоновой лампочки 3. При этом неоновая лампочка вспыхивает и конденсатор разряжается через нее до потенциала погасания лампочки U_n . Затем конденсатор вновь заряжается, и весь процесс повторяется сначала. Если разность $U - U_3$ больше потенциала зажигания фотоэлемента, то фототок i не будет изменяться при постоянном значении освещенности фотоэлемента E . Следовательно,

$$i \Delta t = (U_3 - U_n) C,$$

где Δt — интервал времени между вспышками неоновой лампочки.

С другой стороны,

$$i = aES,$$

где a — чувствительность фотоэлемента;
 S — площадь фотоэлемента.

Отсюда

$$\Delta t = \frac{(U_3 - U_n) C}{aES}.$$

Таким образом, промежуток времени между вспышками неоновой лампочки обратно пропорционален освещенности поверхности фотоэлемента и по количеству вспышек за определенный промежуток времени можно при соответствующей градуировке прибора определить величину освещенности.

В силу того, что визуальный отсчет числа вспышек не всегда удобен, в схеме может быть предусмотрен телефон, включаемый последова-

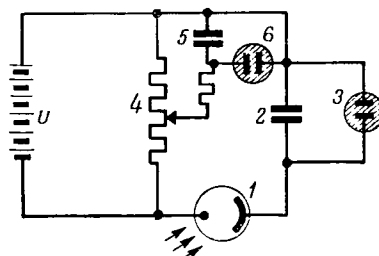


Рис. 1. Принципиальная схема прибора.

тельно в цепь лампы. Тогда число вспышек определяется по числу щелчков в телефонной трубке. При этом необходимо иметь в виду, что наличие большого сопротивления в цепи неоновой лампочки влияет на частоту вспышек и время разряда конденсатора. С увеличением сопротивления повышается частота, увеличивается время разряда конденсатора и уменьшается величина разрядного тока, а соответственно и интенсивность сигнала. Это объясняется тем обстоятельством, что при наличии добавочного сопротивления конденсатор разряжается до напряжения U'_n , превышающего потенциал потухания неоновой лампочки на величину падения напряжения на сопротивлении. Поэтому полученное выше выражение для Δt при наличии сопротивления в цепи неоновой лампочки запишется как

$$\Delta t = \frac{(U_3 - U'_n) C}{aES}.$$

На рис. 2 даны осциллограммы разрядного тока при различных сопротивлениях в цепи неоновой лампочки. Из рассмотрения этого рисунка видно, что при изменении сопротивления от 5 000 до 90 000 ом частота сигналов увеличивается в 1,5 раза. Следовательно, соответствующим подбором сопротивления телефона или включением добавочного сопротивления можно увеличить частоту сигналов при данной освещенности и, следовательно, повысить точность измерений.

Чувствительность рассматриваемой схемы определяется фототоком порядка 10^{-9} а. Дальней-

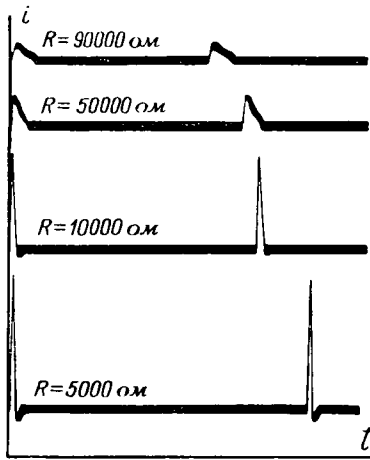


Рис. 2. Осциллограммы разрядного тока.

шее увеличение чувствительности требует повышенного качества изоляции. Для вакуумных сурьмяно-цезиевых фотоэлементов величина фототока 10^{-9} а соответствует освещенности порядка 0,05 лк. В этом случае при емкости конденсатора $C = 300$ мккф интервал между сигналами составляет 4...5 сек. Расширение пределов измерений в сторону больших значений освещенности достигается включением конденсаторов соответствующей емкости.

Проведенные исследования показали, что изменение температуры и влажности в практически возможных пределах не оказывают существенного влияния на чувствительность схемы. Однако необходимо иметь в виду, что при освещении неоновой лампочки наблюдается неустойчивый разряд вследствие появляющегося фототока с поверхности ее электродов. Поэтому для стабилизации работы схемы необходимо экранировать неоновую лампочку от прямых лучей источников света.

Для регистрации времени можно пользоваться часами или секундомером. Однако при измерении низких освещенностей в наружных условиях это представляется малоудобным. Поэтому нами предусмотрена специальная сигнальная цепь, состоящая из потенциометра 4 (рис. 1), конденсатора 5 и неоновой лампочки 6. При соответствующем подборе сопротивлений и положения движка потенциометра можно практически получить любой интервал вспышек сигнальной лампочки. Поскольку для сигнальной цепи изменение напряжения батареи влияет на время заряда конденсатора, ручка потенциометра должна быть выведена на панель прибора для того, чтобы имелась возможность периодического контроля и настройки этой цепи. Последовательно, с сигналь-

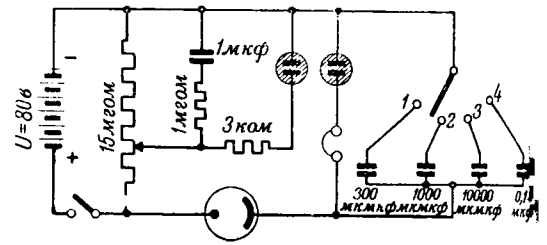


Рис. 3. Схема люксметра.

ной неоновой лампой можно включить телефон, отсчет времени производить, как и в рабочей цепи, по щелчкам в телефоне, используя один наушник для рабочей части схемы, а второй — для сигнальной. Наряду с этим для включения рабочей цепи на определенный промежуток времени можно использовать механизм автопуска фотоаппарата ФЭД. Однако это повышает стоимость прибора и несколько снижает точность измерений так как интервал времени между первой и последующими вспышками неоновой лампочки может быть различен.

На основании изложенных соображений был разработан и изготовлен опытный образец люксметра, схема которого показана на рис. 3. В приборе установлен вакуумный сурьмяно-цезиевый фотоэлемент со специально пониженным потенциалом насыщения $U_n = 12$ в. Чувствительность фотоэлемента составляла 41 ма/лм. Неоновая лампочка типа МН-3 имела потенциал зажигания 58 в. Таким образом, для питания схемы могла быть использована малогабаритная батарея тип ГБ-80, имеющая напряжение $U = 80$ в. Если применяются фотоэлементы с более высоким потенциалом зажигания, необходимо устанавливать две последовательно соединенные батареи этого типа.

Прибор имеет следующих четыре диапазона измерения освещенности: 0,06...0,6; 0,6...6,0; 2,0...20,0 и 10,0...100,0 лк.

Интервал между вспышками неоновой лампочки в сигнальной цепи составлял 10 сек.

Испытания опытного образца люксметра показали, что настоящий прибор вполне отвечает вышеуказанным требованиям.

Литература

1. Я. Б. Зильберблат и М. А. Островский. Освещение улиц городов. Изд. МКХ РСФСР, 1951.
2. В. А. Кизель и С. А. Друккер. Заводская лаборатория, т. IX, № 5—6, 1940.
3. Д. А. Шкловер. Ультрафиолетовые излучения и гигиена. АМН СССР, стр. 52, 1950.

Из опыта эксплуатации электропривода крупных прессов

Инж. С. И. ОГОРОДНОВ

Горький

В современном машиностроении широкое применение находят обработка и изготовление деталей путем штамповки на прессах.

Привод крупных прессов осуществляется чаще всего от короткозамкнутых электродвигателей, которые соединяются с рабочей частью пресса (звездочкой со штампом) при помощи ременной передачи, нескольких пар зубчатых колес и крилошатунного механизма.

Работа электродвигателей, установленных на этих прессах, отличается теми особенностями, потребляемая электродвигателем мощность различается в основном на приведение в движение частей пресса, обладающих большими маховыми моментами. Собственно же рабочая операция совершается почти исключительно за счет энергии, запасенной движущимися частями пресса главным образом маховиком.

Прессы указанной выше категории делают обычно 5...10 ходов в минуту (6...12 сек один ход), из них на рабочую операцию (резка металл-штамповка и т. д.) затрачивается 1...3 сек.

Из вышеизложенного следует, что выбор мощности электродвигателя в ориентировке на полезный статический момент (резания металла, штамповки и т. д.) не для всех прессов является правильным. В некоторых случаях нагрузка электродвигателя при холостом ходе не отличается практически от нагрузки при работе пресса по резанию или штамповке металла.

Указывается на необходимость выбора двигателя для крупных прессов с учетом условий пуска, являющихся в ряде случаев определяющими, а также на необходимость обеспечения в схеме пуска и управления возможности изменения рабочих характеристик.

При холостом ходе не отличается практически от нагрузки при работе пресса по резанию или штамповке металла.

Подтверждением этого могут служить диаграммы, приведенные на рис. 1, а и 1, б, снятые с работающего пресса на одном из автомобильных заводов.

На рис. 1, а дана диаграмма мощности, расходуемой при холостом ходе пресса. При подъеме тяжелого ползуна со штампом электродвигатель забирает из сети мощность $P=98,3$ квт, а при его опускании (и сжатии воздуха в цилиндре «противовеса») потребляемая мощность составляет $P''=65,5$ квт. На рис. 1, б приведена диаграмма одного рабочего хода этого же пресса. На диаграмме видны момент включения муфты сцепления (левый пик), затем опускания штампа и последующий подъем его (правый пик), после чего муфта сцепления отключается и нагрузка электродвигателя опять снижается до величины холостого хода. Максимально потребляемая мощность двигателя в этом случае не превышает указанных выше 98,3 квт.

В других случаях, как это следует из диаграммы рис. 2, а и 2, в, на работе электродвигателя не сказываются даже инерция поступательно движущихся частей пресса и усилия, затрачиваемые на рабочую операцию. Нагрузочная кривая для электродвигателя такого пресса представляет почти прямую, параллельную оси абсцисс.

Диаграммы рис. 2, а и б были получены при пуске через автотрансформатор для прессов 1 500 т. На рис. 2, а ясно видны моменты разгона двигателя на обеих ступенях автотрансформатора и последующее снижение тока до холостого хода. При включении пресса в работу (на диаграмме спустя 60 сек) рабочая операция не вызывает сколько-нибудь заметного увеличения тока.

Аналогичный график пуска в ход электродвигателя другого пресса приведен на рис. 2, б, только здесь процесс пуска через автотрансформатор менее растянут.

На рис. 2, в приведен график пуска электродвигателя пресса 1 200 т ($G_{max}=3380$ кг; $G_{полз}=7800$ кг) переключением со звезды на треугольник. Весь процесс пуска (разгон маховика) производился при соединении обмотки двигателя в звезду, и на треугольник двигатель переключен только перед работой пресса (после 100 сек).

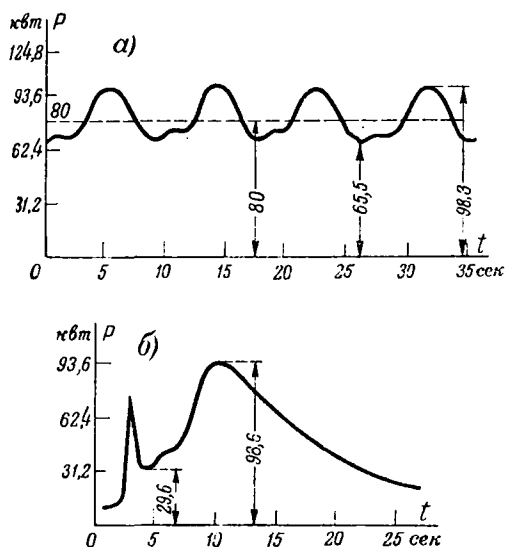


Рис. 1. Потребление мощности короткозамкнутым двигателем пресса при холостом а и рабочем б ходах.

Процесс пуска сильно растянут¹, однако двигатель его выдерживает без вреда. Никакого изменения нагрузки двигателя рабочий ход пресса не вызывает (рис. 2, в).

Приведенные диаграммы типичны для крупных прессов мощностью порядка 500...1500 т и выше.

Изложенные соображения указывают:

1) на целесообразность выбора электродвигателя по условиям пуска (при высокой форсировке электродвигателя) на динамический момент;

2) на необходимость иметь возможность изменять после пуска характеристики электродвигателя в соответствии с действительно потребными мощностью и моментом при полностью развернушемся маховике.

Практика эксплуатации крупных прессов на автомобильном заводе показала, что примененные электродвигатели с повышенным до 10% скольжением, вместо обычных короткозамкнутых с нормальным скольжением, позволяет значительно снизить мощность двигателей (на 25...35%) и в несколько раз дольше работать без аварий.

Короткозамкнутые двигатели, имея завышенную по пусковым условиям мощность, загружаются при работе пресса не более чем на 30...50%, что приводит к излишним потерям электроэнергии и значительному снижению коэффициента мощности и к. п. д. привода.

В связи с особенностями работы прессов существует известное разнообразие в используемых схемах.

Наиболее простой по выполнению и в то же время наиболее тяжелой и несовершенной является схема с непосредственным пуском короткозамкнутого электродвигателя при полном напряжении сети. Такой способ вызывает большие броски тока в сети и перегрузку двигателя пусковыми токами (при удлиненном времени пуска), вследствие чего пуск иногда приходится производить толчками, до полного разгона маховика.

Более удачной по условиям пуска является схема с применением пускового автотрансформатора, смягчающая условия пуска. В последнее время проявляется тенденция к пуску главного электродвигателя крупных прессов переключением со звезды на треугольник. В некоторых случаях, когда электродвигатель имеет завышенную мощность, почти весь процесс пуска протекает при соединении в звезду (рис. 2, в). В других случаях пуск приходится производить в несколько приемов: сначала дать толчок на звезде с тем,

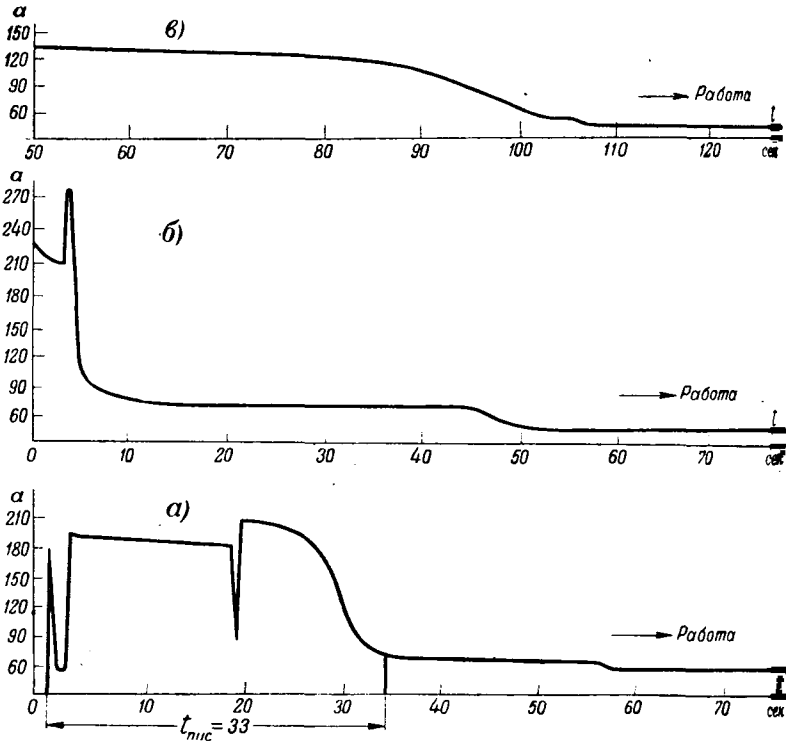


Рис. 2. Ток при пуске короткозамкнутых двигателей прессов.

чтобы стронуть маховик с места. Затем произвести разгон на треугольнике, после чего электродвигатель переключается на звезду, при котором и происходит работа пресса.

Некоторые заводы-изготовители прессового оборудования применяют для крупных прессов двигатели специального исполнения с двумя мотками, на разные скорости вращения. Пуск электродвигателя производится на меньшей скорости, затем осуществляется переключение на более высокую нормальную скорость.

О выборе электродвигателей. Как указывалось, для крупных прессов очень часто пусковые условия превалируют при выборе двигателя:

Момент, развиваемый двигателем:

$$M_d = M_c + J \frac{d\omega}{dt},$$

где M_c — статический момент механизма

$J \frac{d\omega}{dt} = M_j$ — динамический момент движущих масс.

Как видно из рис. 3, в условиях привода прессов полный момент требуется только на коротком промежутке времени t_1 производства рабочей операции. Двигатель может сравнительно легко его развить за счет живой силы маховых масс. В следующие более длительные интервалы времени t_2 и t_0 двигатель работает со значительно меньшей нагрузкой.

Работа будет затрачиваться главным образом на «зарядку» маховых масс, для чего двигатель должен обладать соответствующим скольжением

¹ На диаграмме показана только часть кривой пуска, начиная с 50 сек.

Пусковой момент электродвигателя

$$M_{\partial} = M_{\text{пуск}} \geq J \frac{d\omega}{dt} = a M_{\text{ном}} \geq \frac{(GD^2)_{\text{прив}} n}{375 t_{\text{пуск}}}, \quad (2)$$

$$t_{\text{пуск}} = \frac{(GD^2)_{\text{прив}} n}{375 a M_{\text{ном}}}. \quad (3)$$

Электродвигатель следует проверить не только по величине пускового момента, но и длительность пуска $t_{\text{пуск}}$, т. е. по нагреву в работе с пусковым моментом за время пуска, которое, как видно из рис. 2, достигает 30...100 сек.

Наилучшее использование маховых масс достигается при снижении скорости вращения не менее чем на 30%, следовательно, скольжение двигателя также не должно превышать 30%. Практически двигатели изготавливаются со скольжением 10...15%.

Живую силу $\frac{GD^2 n^2}{729000}$ маховые массы набирают время $t_{\text{пуск}}$ полного разгона электропривода пресса при выключенном ползуне. Средняя развиваемая двигателем мощность $P_{\text{ср}} = \frac{GD^2 n^2}{729000 t_{\text{пуск}}}$.

Живая сила маховых масс пресса при разгоне будет приблизительно изменяться по кривой А (рис. 3), а момент сопротивления, преодолеваемый двигателем при пуске, — по кривой M_j .

Желательно, чтобы момент двигателя изменялся, например, по кривой M_{∂}' или, еще лучше, кривой M_{∂}'' . При этом величина пускового момента $M_{\partial, \text{пуск}} \geq M_{j, \text{пуск}} = a M_{\text{ном}}$.

Для того чтобы двигатель имел хорошие технико-экономические показатели при работе пресса номинальный момент вращения должен удовлетворять условию

$$M_{\text{ном}} = M_c' + M_j,$$

для выполнения требований в части $M_{\partial, \text{пуск}}$ необходима соответствующая кратность пускового момента $a = \frac{M_{\partial}}{M_{\text{ном}}}$.

Во время работы пресса момент двигателя будет изменяться по кривой 1, 2, 3, 4, 5... (рис. 3), не превышая значения $M_{\partial, \text{ном}}$. Этот момент, как видно из изложенного, обусловлен только пусковыми условиями, а не рабочим моментом сопротивления M_c' . Поэтому для лучшего использования двигателя было бы целесо-

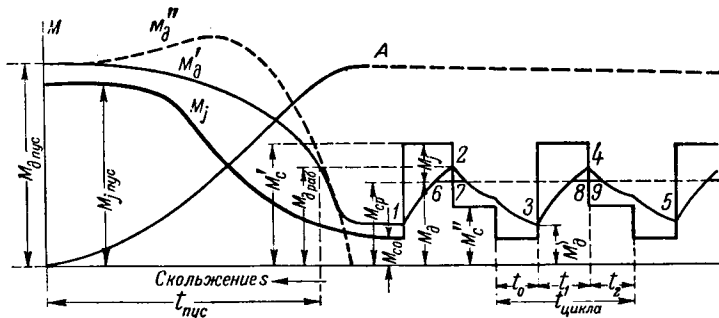


Рис. 3.

А — живая сила при пуске двигателя; M_j — динамический момент маховых масс; M_c' и M_c'' — статический момент пресса; M_{∂}' , M_{∂}'' — желаемый момент двигателя; $M_{\partial, \text{раб}}$ — момент двигателя при работе.

образно, чтобы его момент во время работы пресса не превышал значений, обусловленных кривыми 1, 6, 7, 3, 8, 9, 5, или близких к ним при тех же пусковых данных.

При работе крупных прессов живая сила маховых масс, как указывалось, используется не более чем на 30%. Отсюда следует, что для пресса желательно иметь такой двигатель, который после полного пуска в ход и разгона маховых масс позволял бы изменять свои характеристики для получения хороших или, по крайней мере, улучшенных показателей. Этого можно, например, достичь переключением обмоток статора с треугольника на звезду при том же напряжении сети и выполнении обмотки статора двигателя по схеме Δ/Δ — 380/500 в или Δ/Δ — 380/V $3 \cdot 380$ в, или другим путем.

Выводы. Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы в отношении электропривода крупных прессов:

1. Выбор двигателей для привода крупных прессов следует производить с учетом пусковых режимов, а не только по статическому моменту.

2. Двигатель пресса должен позволять хорошо использовать маховые массы и иметь хорошую теплостойкую изоляцию обмоток.

3. Во время работы электродвигатель должен позволять изменять рабочие характеристики, например путем переключения обмоток с треугольника на звезду.

4. Электродвигатель должен быть надежен и экономичен в работе, имея высокий пусковой момент и сравнительно небольшой пусковой ток.

5. Высокая стоимость и значительная мощность крупных прессов выдвигают требования о целесообразности применения и выпуска для них двигателей специального исполнения.

6. Схема управления прессом должна быть наглядна, проста и надежна в эксплуатации, безопасна для работающих на прессе, обеспечивая небольшие толчки пускового тока в питающей сети.

О приоритете В. В. Петрова в открытии электрической дуги¹

Казалось бы, приоритет Василия Владимировича Петрова неоспоримо установлен замечательной его книгой «Известие о гальвани-вольтовских опытах...», которая была напечатана в 1803 г. и вышла в свет в ноябре того же года. Однако приоритет Петрова оспаривался или замалчивался многими иностранными учеными. В качестве примера можно указать на книгу американского физика Л. Леба (L. Loeb) под названием «Основные процессы электрических разрядов в газах», глава XVIII. Эта книга вышла в 1938 г. и появилась в русском переводе под редакцией проф. Н. А. Капцова в 1950 г.

В статье проф. Л. Д. Белькинда² уже описан спор, который возник в 1896 г., когда в английском журнале «The Electrician» было опубликовано письмо W. P. Маускок (Мейкок), в котором он возражал против названия электрической дуги «вольтовой» на том основании, что (по его мнению) дуга была открыта Дэви. Мы не будем вновь повторять всех деталей этого спора. Подчеркнем лишь, что редактор «The Electrician» в своем ответе редактору журнала «Электричество» А. Смирнову ссылается на то, что работа Петрова опубликована в 1803 г. В письме А. Смирнова это обстоятельство не было указано. Отсюда необходимо заключить, что книга Петрова редактору «The Electrician» была известна; следовательно, известно и то, с какою ясностью и полностью было описано в этой книге явление электрической дуги.

Проверим заявления редактора «The Electrician».

Необходимо, прежде всего, отметить неточность его ссылки. «Философский журнал» (Philosophical Magazin) в 1801 г. еще не существовал. Он начал выходить с 1827 г. В действительности Дэви печатал свои труды в журнале «Философские протоколы Королевского общества» (Philosophical Transactions of the Royal Society). В 1801 г. он опубликовал в этом журнале ряд своих статей. Только в одной из них Дэви пишет о своих опытах с дугами, однако вовсе не электрическими. Эта статья называется: «Отчет о некоторых гальванических устройствах, образуемых посредством систем отдельных металлических пластин и жидкостей, подобной новому гальваническому прибору г. Вольта» (Phil. Trans. of R. Soc., 1801 г., part. II, p. 397). В ней Дэви пишет:

«Я нашел, что накопление гальванической силы, совершенно подобное накоплению в обыкно-

¹ Из доклада автора на собрании, посвященном 150-летию открытия электрической дуги В. В. Петровым.

² Электричество, № 6, 1952.

венном столбе, может быть получено посредством системы отдельных металлических пластин дуг, с различными прослойками жидкостей».

В дальнейшем Дэви описывает опыты с пластинами и дугами из различных материалов с прокладками из полотна, смоченной водой, слабыми кислотами или щелочами. Идет, таким образом, вовсе не об электрической дуге, а о металлических пластинах, имеющих форму дуги и применяемых в качестве электрической вольтова столба.

Редактор «The Electrician», следовательно, непрослительно спутал (чтобы не сказать больше) отрезки металла в форме дуги с электрической дугой. Таким образом, никакого отношения цитируемая статья Дэви к открытию электрической дуги не имеет.

Обратимся к статье Дэви в «Nicholson's Journal» (1801 г., v. IV, p. 326). В ней Дэви описывает опыты с хорошо обожженным древесным углем, который он испробовал в качестве проводника электричества: «Я нашел, что этот материал обладает теми же свойствами, как и металлическое тело, в произведении ударов и искр, если его применить как проводник (medium of communication) между концами гальванического элемента системы Вольта».

В этой статье Дэви пишет об искрах: «Искра — не дуга. Электрическую искру физики давно знали. Как известно, она отличается от дуги — длительно существующего электрического разряда — своей кратковременностью. Таким образом, и в этой статье, если бы ее прочитал редактор «The Electrician», он не мог бы найти ничего нового сообщения об открытии электрической дуги Дэви».

Рассмотрим заявление редактора «The Electrician» о том, что Дэви в 1802 г. демонстрировал свет дуги при помощи батареи из 150 пар пластин. Источник этого заявления не указан, но можно указать — в «Журнале королевского института» за 1802 г., т. I, стр. 209, имеется сообщение о лекции, прочитанной Дэви в этом институте. В этой лекции он говорил о зажигании светлого древесного угля в парах соляной кислоты, вылитой поверх ртути: «Уголь был накален до белого каления последовательными контактами, производившимися около двух часов».

Из этих слов совершенно очевидно, что искры электрической дуги в данном случае не получались, так как уголь накалился до белого каления мгновенно. Наоборот, искра, которая получалась при размыкании контакта между уголями, была слабой и для нас

глей необходимо было многократно повторять акт.

С помощью вольтова столба тех размеров, как располагал в то время Дэви, получить дугу еще было невозможно. В самом деле, вольтов столб состоявший, по словам редактора «The Electrician», из 150 пар пластин, мог дать самое большее 150 в (с учетом поляризации, наверно, еще). В 1802 г. вольтов столб, как правило, состоял из кружков, имевших диаметр не более 1"; следовательно, площадь кружка — не более 5 см². Внутреннее сопротивление элемента из кружков такого диаметра, разделенных ладкой из картона, пропитанного подкисленной водой, имеет величину порядка 8...10 ом. Следовательно, внутреннее сопротивление всей батареи будет равно 1 200...1 500 ом и максимальный ток который она может дать, в самом лучшем случае не превосходит величины

$$I = \frac{U}{R} = \frac{150}{1\,200} = 0,125 \text{ а.}$$

напряжения необходимое для поддержания дуги считая длину дуги близкой к нулю, может выражено равенством

$$u_a = 64 + \frac{27}{l},$$

где при токе $I = 0,125 \text{ а}$,

$$u_a = 64 + \frac{27}{0,125} = 280 \text{ в.}$$

Явственно, что напряжение столба недостаточное для поддержания дуги.

Если опустим, что экстраполируя уравнение дуги, сделаем ошибку при длине дуги, не меньшей, чем мы сделали ошибку. Пусть это напряжение будет в 2 раза меньше, т. е. будет равно 140 в. Тогда ток, даваемый батареей, станет равным

$$I = \frac{150 - 140}{1\,200} = 0,00833 \text{ а.}$$

При таком токе для поддержания дуги необходимо уже тысячи вольт! Таким образом, Дэви со своим вольтовым столбом из 150 пар пластин не мог получить электрической дуги. Даже искра, даваемая этим столбом, не могла быть сколько-нибудь мощной.

Если поставим эти соображения с сообщением Гальвани о том, что, пользуясь столбом, состоявшим из 100 пар пластин, ему удалось получить электрическую искру, которую он мог использовать в темноте, что свидетельствует о слабости искры. Точно также столб из 150 пар пластин не мог дать ни мощной искры, ни, тем более, электрической дуги.

Вторая ссылка редактора «The Electrician» является совершенно несостоятельной. Тем

не менее эта ссылка нередко повторяется в книгах, вышедших много позже например в книге М. Леблана (M. Leblanc, *L'arc électrique*), вышедшей в 1922 г.

Когда же все-таки Дэви получил дугу? Как показал Л. Д. Белькинд в цитированной выше его статье, это могло иметь место не ранее конца 1808 или 1809 г. Впервые Дэви опубликовал описание дуг в 1812 г. в своей книге «*Elements of Chemical Philosophy*».

Можно поставить еще вопрос, знал ли Дэви об открытии Петрова? Этот вопрос не является праздным, потому что Петербургская академия наук во времена Петрова посылала иностранным академиям аннотации о выполненных в ней или представленных ей работах. Известно, что аннотация о книге Петрова была послана за границу в 1804 г. и, несомненно, имелась в Королевском институте.

Таким образом, Дэви как член этого института должен был бы знать о работе Петрова. Не исключена возможность того, что именно под влиянием этой аннотации Дэви и предпринял сооружение батареи из 2 000 пар пластин. Если же Дэви знал об открытии Петрова, то это означает, что в своих работах Дэви только повторил опыты Петрова спустя несколько лет.

Приоритет В. В. Петрова в открытии дуги первоначально замалчивался не только за границей, но и в России. В восьмидесятих годах прошлого века приоритет Петрова в открытии дуги был подтвержден профессором Военно-медицинской академии Н. Г. Егоровым. Как сообщает А. А. Елисеев (Василий Владимирович Петров. Госэнергоиздат, 1949 г.), конференция Военно-медицинской академии на своем заседании 28 сентября 1892 г. по предложению Н. Г. Егорова решила отметить «...память покойного профессора Петрова, как первого наблюдателя вольтовой дуги, постановкою во вновь открытой при академии электрической станции мраморной доски с соответствующей надписью».

Заслуги выдающегося русского ученого академика Василия Владимировича Петрова в полной мере признаны и оценены только в советское время. В 1934 г. было широко отмечено столетие со дня его смерти, а в 1935 г. правительством СССР было принято решение об увековечении памяти В. В. Петрова рядом мероприятий. Постановление об увековечении памяти В. В. Петрова было принято и на его родине — в г. Обояни Курской области. В 1949 г. по постановлению Президиума Академии наук СССР была установлена мемориальная доска на доме, в котором жил Петров (№ 2 по 7-й линии Васильевского острова в Ленинграде).

Доктор техн. наук, проф.

А. М. ЗАЛЕСКИЙ

Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетиков

Роль М. О. Доливо-Добровольского в создании схем компаундирования синхронных машин¹

Как известно, фирма АЕG, в которой служил эмигрировавший из царской России М. О. Доливо-Добровольский, запатентовала от своего имени ряд его изобретений, оставшихся скрытыми в технических архивах фирмы. Это имело место, например, в отношении изобретения выключателей с искрогасительной решеткой (Электричество, № 9, 1949, стр. 71).

В 1902 г. фирмой АЕG были получены два патента (DRP № 145446, 148074) на схемы компаундирования синхронных машин, изобретенные М. О. Доливо-Добровольским. На это авторство в то время несколько раз указывалось в немецкой технической печати (например, статья М. Seidner'a в ETZ за 1908 г., стр. 452 и за 1909 г., стр. 1236).

Так как компаундные генераторы постоянного тока, у которых возбуждение автоматически зависит от тока нагрузки, уже широко применялись в электротехнике, то совершенно естественно, что мысль о подобном же компаундировании генераторов переменного тока возникла неоднократно, еще до предложения М. О. Доливо-Добровольского. С принципиальной стороны было очевидно, что компаундирование синхронного генератора можно осуществить, преобразовав ток якоря из переменного в постоянный (выпрямленный) и введя его тем или иным способом в цепь возбуждения генератора (или в цепь возбуждения возбuditеля). Предварительно, до выпрямления, можно преобразовать ток якоря также по величине.

В конце XIX и в начале XX века было предложено большое количество различных схем и устройств для решения этой задачи, но на практике, однако, компаундирование получило распространение лишь в последнее десятилетие, причем, по существу, в таком виде, в каком было предложено в 1902 г. М. О. Доливо-Добровольским.

Чем же объяснить почти полувековой разрыв между появлением первых предложений о компаундировании синхронных генераторов и практическим осуществлением этих предложений?

¹ Статья является сокращенным изложением доклада автора на сессии Отделения технических наук Академии наук УССР 18 декабря 1951 г.

Это объясняется прежде всего тем, что еще даже недавнего времени компаундирование рассматривалось лишь как средство поддержания в установившихся режимах постоянства напряжения генераторов при изменении нагрузки. Но давно уже применяющиеся автоматические регуляторы напряжения давали возможность поддерживать постоянство напряжения генераторов с гораздо большей точностью, чем это могло быть обеспечено компаундированием. Кроме того, компаундирование предлагалось в весьма не совершенном конструктивном выполнении. Разработанные схемы, связанные со специальным и достаточно сложным устройством обмоток статора и ротора синхронных генераторов: при этом требовались специальные трансформаторы и необходимо было применение выпрямляющих устройств, что в конструктивном отношении являлось еще 15-20 лет тому назад наиболее затруднительным. Предлагаемые механические, затем ионные, выпрямители не удовлетворяли требованиям эксплуатации.

М. О. Доливо-Добровольский, с присущей ему дальновидностью, пошел по пути, обеспечивающему наибольшую простоту и надежность схем компаундирования, между тем как другие изобретатели (среди которых были весьма известные электротехники того времени: Леблан, Блондель, Шеро, Гейланд, Даниэльсон и др.) все еще предлагали весьма сложные специальные конструкции компаундирования синхронных машин, их возбuditелей и механических устройств.

М. О. Доливо-Добровольский разработал ряд модифицированных схем компаундирования (фотокопии схем из указанных выше патентов см. на рис. 1 и 2), среди которых трудно увидеть схемы, аналогичные применяемым в наше время для мощных синхронных машин. На рис. 1 показаны схемы компаундирования однофазных (Fig. 1-3) и трехфазных (Fig. 4-8) машин. Показана возможность введения компаундирующего тока как непосредственно в цепь возбуждения генератора, так и в цепь возбуждения возбuditеля (Fig. 6, 7 и 8), что значительно уменьшает необходимую мощность компаундирования.

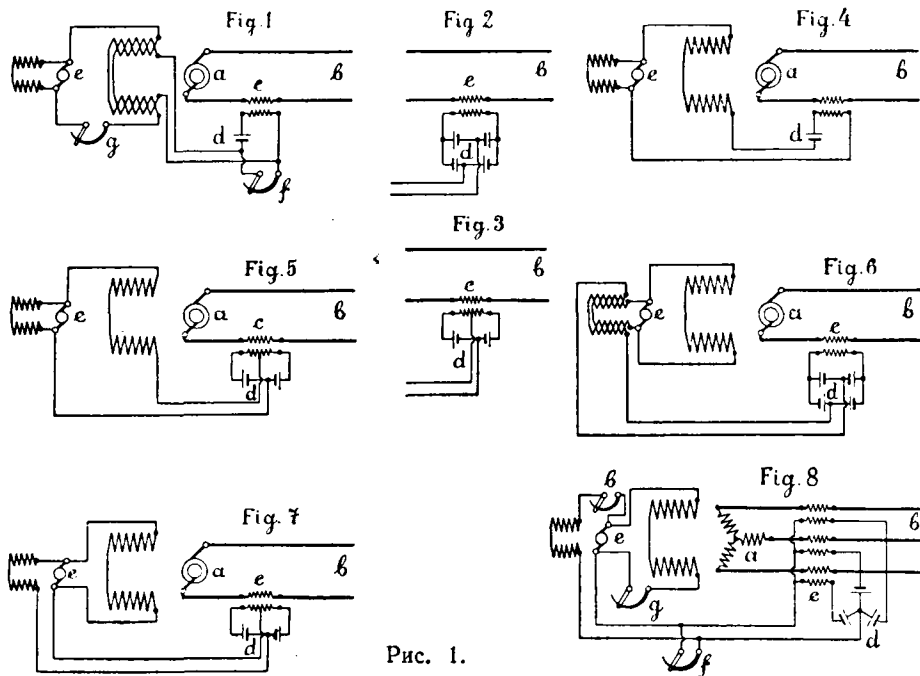


Рис. 1.

М. О. Доливо-Добровольским списаны схемы с дополнительной обмоткой для компаундирования (Fig. 1 и 6) и включены компаундирования последовательно с обмоткой возбуждения генератора или возбудителя (4, 5, 7 и 8). Патентная заявка сформулирована следующим образом.

1. Устройство для компаундирования (уменьшения пая напряжения) одно- и многофазных динамомашии переменного тока, характеризуемое тем, что оно дает возможность получить часть тока возбуждения из любого источника постоянного тока, в то время как другая часть тока возбуждения, заимствуемая с помощью последовательно соединенных трансформаторов из линии переменного тока, выпрямляется униполярными элементами.

2. Форма осуществления схемы устройства, описанного в 1 настоящей заявки, характеризуемая тем, что обе части тока возбуждения поступают либо каждая по отдельности, либо — по общей обмотке возбуждения.

3. Форма осуществления схемы по п. 1, характеризуемая тем, что выпрямленный униполярными элементами ток используется для усиления магнитного потока возбудителя. Fig. 6 из рис. 1 приведена в указанной выше статье патента с указанием авторства М. О. Доливо-Добровольского.

На рис. 2 из германского патента № 145446, выданного 11 1902 г., показаны принципиальные схемы самовозбуждения синхронных генераторов переменного тока на основе называемой «фазовой» схемы компаундирования. При напряжении во вторичных обмотках трансформатора напряжения и трансформатора тока складываются геометрически, с учетом угла сдвига фазы между напряжением и током, чем достигается поддержание постоянства напряжения генератора независимо от коэффициента мощности нагрузки. М. О. Доливо-Добровольским предложено включение конденсатора, компенсирующего самоиндукцию вторичной обмотки трансформатора тока, чем улучшается регулирование при малых нагрузках генератора.

Какое значение придавал М. О. Доливо-Добровольский структурной простоте и надежности схемы компаундирования, хорошо видно из того, что в качестве выпрямителей предложил использовать алюминиевые униполярные элементы, вентильные свойства которых в то время уже были известны. Такие маломощные электролитические выпрямители хотя и не получили распространения, но были правильно выбраны М. О. Доливо-Добровольским как статические (без движущихся частей) аппараты. Принципиальная правильность предложения М. О. Доливо-Добровольского подтверждена тем, что только появление более совершенных статических выпрямителей (купроксных и селеновых) способствовало после длительного промежутка времени возвращению к идее компаундирования синхронных машин.

К 1940 г. в печати появилось уже несколько сообщений о применении схем компаундирования с полупроводниковыми выпрямителями для автоматического регулирования напряжения генераторов малой мощности (Н. А. Богданов, Б. Юдицкий). Разработка подобных устройств с 1940 г. также развернута под руководством В. М. Хрущева в Институте энергетики Академии наук Украинской ССР.

Новые задачи, возникшие в дальнейшем перед электротехникой, в особенности проблема повышения устойчиво-

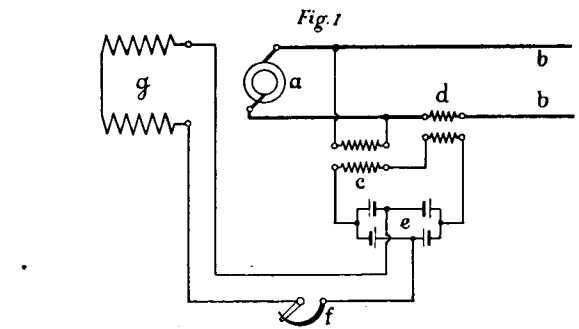


Fig. 1

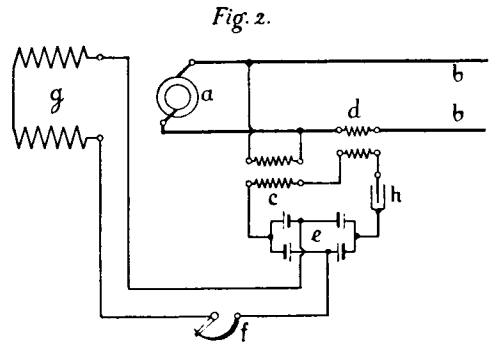


Fig. 2.

Рис. 2.

сти мощных энергетических систем и успешная разработка в СССР теории искусственной устойчивости энергосистем дали возможность по-новому поставить вопрос о компаундировании синхронных машин. Проведенные Институтом электротехники Академии наук Украинской ССР теоретические и экспериментальные исследования (1941—1943 гг.) показали, что компаундирование синхронных генераторов и компенсаторов является надежным и эффективным средством повышения устойчивости энергосистем.

За разработку и внедрение устройств компаундирования синхронных генераторов для повышения устойчивости энергосистем и улучшения работы электроустановок работникам Института электротехники АН УССР в 1950 г. была присуждена Сталинская премия.

Почти забытые на протяжении полувека идеи выдающегося русского инженера и изобретателя М. О. Доливо-Добровольского оказались воскрешенными на новой расширенной основе, содействуя успехам социалистической энергетики великой Родины нашего талантливого соотечественника.

Кандидат техн. наук Л. В. ЦУКЕРНИК
Институт электротехники АН УССР



НЕОБХОДИМОЕ УТОЧНЕНИЕ ТЕРМИНОЛОГИИ В ВОПРОСЕ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В электрических установках и цепях переменного тока, как известно, широко проводится измерение электрической мощности и электрической энергии, причем весьма часто измерению подлежит не только активная, но и реактивная мощность. Поэтому должно быть признано особенно важным, чтобы в вопросах терминологии, связанной с электрическими измерениями, соблюдалась надлежащая строгость и четкость и не допускалась какая-либо засоренность неправильными терминами и названиями приборов, могущими вызвать неправильное представление как о сущности тех электрических величин, которые подлежат измерению, так и о назначении того или иного измерительного прибора.

К сожалению, приходится отметить, что отсутствует четкость терминологии в таком важном вопросе, как измерение реактивной мощности в установках и цепях переменного тока. В последнее время в ряде учебников и учебных пособий, а также монографий по электрическим измерениям и в журнальных статьях получили широкое распространение такие термины, как «измерение реактивной энергии», «счетчики реактивной энергии», «потребление реактивной энергии» и «тариф на реактивную энергию». В отдельных случаях термин «измерение реактивной энергии» противопоставляется термину «измерение активной энергии».

Совершенно очевидно, что термины, включающие в себя понятие «реактивная энергия», являются совершенно недопустимыми, так как такая терминология может вызвать представление о том, что в электрических цепях переменного тока различаются два вида электрической энергии — «активная» и «реактивная», чего на самом деле нет и быть не может. В электрических цепях переменного тока при соответствующих характеристиках цепи могут, как известно, сосуществовать два процесса, а именно: процесс необратимого перехода электрической энергии в другие виды энергии, оцениваемый понятием «активной мощности», и обратимый процесс обмена энергии между переменными электрическими и магнитными полями, поддерживаемыми в отдельных элементах цепи, и источниками электрической энергии, который оценивается понятием «реактивной мощности». Из этих двух процессов лишь первый связан с поглощением энергии в электрической цепи переменного тока, в то время как баланс энергии, связанный с поддержанием реактивной мощности в цепи, равен за каждый период (и даже полупериод) переменного тока нулю. На основании изложенного неправомерным должен быть также признан термин «активная энергия» и оставлен, как единственно правильный, только термин «электрическая энергия».

В связи со сказанным остановимся кратко на принципах количественной оценки мощности и энергии в цепях переменного тока.

Активная мощность в цепи переменного тока, пульсирующая по закону квадратичного синуса с амплитудой

$2UI \cos \varphi$, оценивается, как известно, по своему среднему значению за период, определяемому как

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T 2UI \cos \varphi \sin^2 \omega t dt = UI \cos \varphi = P.$$

На диаграмме мощности это среднее значение откается прямой линией, параллельной оси абсцисс, как и показано на рис. 1, а. Поэтому произведение PT имеет физический смысл, так как это есть количественное выражение электрической энергии, поглощаемой в цепи переменного тока за период. Этому произведению соответствует на диаграмме площадь прямоугольника, построенного на основании, равном продолжительности периода T , и равновеликого площади, очерченной квадратичным синусом, как это отмечено на рис. 1, а. Это положение может

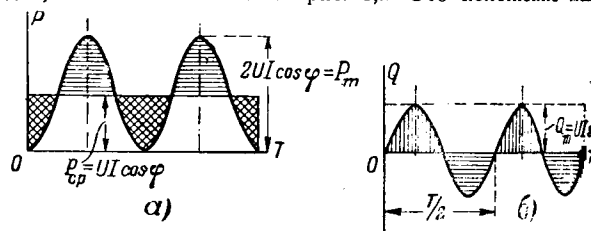


Рис. 1.

быть распространено и на любой отрезок времени. Действительно, если активная мощность, поддерживаемая в цепи, остается в течение какого-то времени t постоянной по величине, то энергия, поглощенная в цепи за это время выразится как $A_t = Pt$.

Если же активная мощность, поддерживаемая в цепи, меняется во времени, то выражение для энергии, поглощаемой в цепи, примет вид:

$$A_t = \int_0^t P dt.$$

Из этого выражения может быть определено среднее значение активной мощности за любой отрезок времени t , а именно

$$P_{cp} = \frac{A_t}{t}.$$

Это осредненное значение активной мощности за какой-то отрезок времени t показано на рис. 2 пунктирной линией.

Прямоугольники $P_1 t_1$ и $P_2 t_2$, равновеликие по площади, очерчиваемым квадратичными синусоидами, выражают в каком-то масштабе энергию, поглощаемую в цепи за каждый из отрезков времени t_1 и t_2 , в течение которых активная мощность остается постоянной, а прямоугольник $P_{cp} t = P_1 t_1 + P_2 t_2$ выражает энергию, поглощаемую в цепи за весь отрезок времени t . Так обстоит дело с активной мощностью.

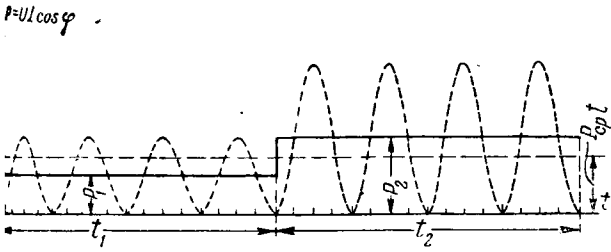


Рис. 2.

Реактивная мощность в цепи переменного тока, которая пульсирует с двойной частотой и амплитудой $UI \sin \varphi$, оценивается, как известно, по своему максимальному значению, так как среднее ее значение за период равно нулю (к. 1,6).

Отсюда вытекает, что произведение $UI \sin \varphi T$ или QT , соответствующее площади прямоугольника, показанного той же диаграмме пунктирной линией, не имеет физического смысла, как это имело место в случае активной мощности, так же как не имеет физического смысла аналогичное выражение и для любого отрезка времени, а именно:

Qt — при постоянном значении реактивной мощности;

Qdt — при изменении реактивной мощности во времени.

Благодаря отсутствию строгой терминологии в вопросе реактивной мощности оба приведенных выше выражения трактуются, однако, в книге „Общая электротехника“ 1 ред. проф. Пресс (стр. 249), как выражения реактивной энергии, что является совершенно неправильным.

В то же время при правильном подходе к вопросу, одно из этих выражений может быть вполне обоснованно использовано и фактически используется для определения среднего значения реактивной мощности Q_{cp} за любой отрезок времени t по формуле

$$Q_{cp}t = \frac{\int_0^t Q dt}{t}$$

Получаемое таким путем осредненное значение реактивной мощности показано на рис. 3 пунктирной линией.

Из сказанного вытекает, что численное определение с помощью соответствующего измерительного прибора

величины $\int_0^t P dt$ открывает возможность как измерения

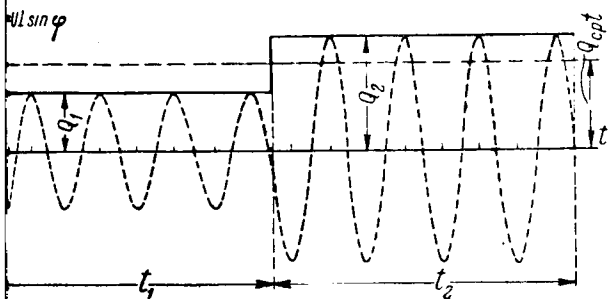


Рис. 3.

электрической энергии, поглощаемой в цепи переменного тока, так и определения среднего значения активной мощности за любой отрезок времени. В то же время численное определение величины $\int_0^t Q dt$ дает возможность только

определять среднее значение реактивной мощности за тот или иной отрезок времени.

Обратимся теперь к технике измерения мощности и электрической энергии в цепях переменного тока. Для простоты рассуждений все рассмотрение вопроса проведем применительно к однофазной цепи или, что то же самое, применительно к одной из фаз трехфазной системы, что, однако, никак не может влиять на сделанные выводы.

Как известно, для измерения активной и реактивной мощностей и электрической энергии в цепях переменного тока применяются следующие измерительные приборы: ваттметр активной мощности, ваттметр реактивной мощности, счетчик электрической энергии, реактивный счетчик (называемый неправильно счетчиком реактивной энергии). Терминология, применяемая в вопросе измерения активной и реактивной мощностей и используемых для этой цели приборов, является исчерпывающе строгой и не нуждается ни в каких поправках и уточнениях.

Из теории электрических измерений известно, что электрические счетчики в связи с положенной в основу их действия кинематической схемой являются приборами интегрирующего типа, в которых число их оборотов за какой-то отрезок времени пропорционально величине $\int_0^t M_t dt$, где M_t — значение (среднее за период) для каждого отдельного момента времени момента вращения, действующего на подвижную часть прибора.

Если момент вращения, действующий на подвижную часть счетчика, остается постоянным в течение всего отрезка времени t , то число оборотов счетчика, а тем самым и показания его счетного механизма за это время будут пропорциональны величине Mt . Если же этот момент вращения будет меняться в течение времени t , то число оборотов счетчика и его показания будут определяться величиной $\sum M_n t_n$.

Известно, что счетчик электрической энергии включается аналогично ваттметру активной мощности по так называемой „косинусной схеме“, при которой вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, оказывается пропорциональным величине $UI \cos \varphi = P$, т. е. величине активной мощности в цепи (выше было оговорено, что рассмотрение вопроса ведется применительно к однофазной цепи). Поэтому число оборотов, а тем самым и показания счетчика, включенного по такой схеме за время t будут определяться величиной $\sum P_n t_n$.

Входящие в выражение этой суммы величины $P_n t_n$, в которых P_n выражает активную мощность, имеют, как это было показано, физический смысл и соответствуют количеству электрической энергии, поглощаемой в цепи за время t_n , в течение которого мощность P_n остается постоянной. Эти произведения, как указывалось, соответствуют в то же время на диаграмме мощности (рис. 2) площадям прямоугольников, равновеликих площадям, ограниченным квадратичными синусоидами, и потому отражающим в каком-то масштабе электрическую энергию.

Вот поэтому счетчик, включаемый по схеме активного ваттметра, показания которого оказываются пропорциональными величине $\Sigma P_{n^t_n}$, и являются, действительно, счетчиком электрической энергии. Путем соответствующего подбора „постоянной“ счетчика можно получать при помощи счетного механизма показания количества прошедшей через такой счетчик и поглощенной в цепи электрической энергии. Этот же счетчик позволяет определять и среднее значение активной мощности для любого заданного отрезка времени t путем деления показания счетчика за это время на численное значение этого отрезка времени

$$P_{cp,t} = \frac{A_t}{t} = \frac{\Sigma P_{n^t_n}}{t}.$$

Если обратиться теперь к реактивному счетчику, то такой счетчик, как известно, включается аналогично ваттметру реактивной мощности по так называемой „синусной схеме“, при которой вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, оказывается пропорциональным величине $UI \sin \varphi = Q$. Поэтому число оборотов этого счетчика и показания его счетного механизма за время t будут определяться величиной $\Sigma Q_{n^t_n}$.

Величины $Q_{n^t_n}$ и здесь будут соответствовать площадям прямоугольников на диаграмме мощности (рис. 3). Однако, как уже указывалось выше, произведение вида $Q_{n^t_n}$ не имеет физического смысла и применять к измерению величины этих произведений термин „измерение реактивной энергии“ является совершенно неправильным и недопустимым. Отсюда вытекает, что реактивный счетчик никакой энергии не измеряет, а измеряет условную величину $\Sigma Q_{n^t_n}$, однако показания его позволяют определять практически очень важное и нужное в ряде случаев среднее значение реактивной мощности за любой заданный отрезок времени по формуле

$$Q_{cp,t} = \frac{\Sigma Q_{n^t_n}}{t}.$$

Как известно, реактивные счетчики широко применяются на электрических станциях и в потребительских установках для контроля за величиной коэффициента мощности. Действительно, если располагать суточными пока-

заниями реактивного счетчика и счетчика электрической энергии и взять отношение этих показаний, то мы получим:

$$\frac{Q_{cp,сут} 24}{P_{cp,сут} 24} = \frac{\sin \varphi_{cp,сут}}{\cos \varphi_{cp,сут}} = \operatorname{tg} \varphi_{cp,сут}.$$

По полученной величине среднего суточного значения $\operatorname{tg} \varphi$ может быть определено среднее суточное значение коэффициента мощности, который и кладется в основу применения поощрительного и штрафного тарифа, стимулирующего поддержание потребителями коэффициента мощности своих установок на надлежащем уровне. Реактивные счетчики, устанавливаемые на генераторах электрических станций, позволяют определять среднее значение реактивной нагрузки, с которой данный генератор работает в течение суток или другого отрезка времени, а тем самым и среднее значение его коэффициента мощности.

Таким образом, нет и не может быть „счетчика реактивной энергии“, ибо нет и не существует понятия „реактивной энергии“. Есть «реактивный счетчик», служащий для определения среднего значения реактивной мощности за любой отрезок времени. Есть также счетчик электрической энергии, предназначенный для измерения количества электрической энергии, поступившей и поглощенной в цепи переменного тока. Этот же счетчик позволяет определять также среднее значение активной мощности за любой отрезок времени, но вряд ли целесообразно в связи с этим пользоваться для него вторым термином «активный счетчик». Поэтому необходимо исключить из применяемой терминологии такие неправильные термины, как «измерение реактивной энергии», «потребление реактивной энергии», «счетчик реактивной энергии». Первые два из этих терминов должны быть отброшены, как совершенно неправильные с научной точки зрения, а третий должен быть заменен термином «реактивный счетчик», который обеспечивает только строгость научно-технической терминологии, но соответствие между названием прибора и фактическим назначением и практическим применением.

Профессор Б. А. ТЕЛЕШ

Московский инженерно-экономический институт
имени Орджоникидзе



Об условных обозначениях и правилах начертания схем релейной защиты и автоматики

Вопросы релейной защиты и автоматики энергетических систем часто требуют совместного решения. Однако до настоящего времени не согласованы методы изображения и правила начертания схем защиты и автоматики.

В начертании схем защиты и автоматики наблюдаются различия: 1) в условных символах контактов и обмоток; 2) в определении нормально открытых (нормально разомкнутых) и нормально закрытых (нормально замкнутых) контактов; 3) в способах буквенно-цифровых обозначений обмоток и контактов.

Наиболее существенно расхождение в определении состояния контактов, с чем в значительной мере связан вопрос об условных начертаниях контактов.

Существуют два метода изображения схем.

Первый метод. Некоторый режим (состояние) схемы принимается как исходный, и вычерчиваемая схема «изображает» этот режим. При этом все контакты графически ставятся в то положение, какое они должны занимать в данном режиме. Например, замкнутые в изображаемом режиме контакты двух реле, из которых одно возбуждено, а другое не возбуждено, получают одинаковое начертание, хотя по взаимоположению подвижных систем и якорей эти реле находятся в неодинаковом состоянии. Этот метод используется в схемах релейной защиты.

Второй метод. Вычерчиваемая схема не изображает какой-либо конкретный, исходный режим. Начертание контактов в ней показывает со-

стояние контактов при невозбужденном или возбужденном реле или аппарате. Таким образом, все обозначения имеют строгую смысловую однозначность. Чтение схемы может быть начато с одинаковым успехом от любого исходного режима. Такой метод используется в схемах автоматики.

В соответствии с этими методами изображения возникают два взаимно друг друга исключают определения «нормально открытых» (разомкнутых) и «нормально закрытых» (замкнутых) контактов. В первом случае за нормальное состояние контактов принимается их состояние в изображенном режиме; во втором случае — состояние контактов при невозбужденном (складском) состоянии реле.

В качестве примера на рис. 1 даны два возможных начертания элементов схемы защиты максимального тока с пуском минимального напряжения, из которых очевидно, что метод вычерчивания изображения некоторого режима логически менее строен и требует дополнительных разъяснений к схеме.

Принятый в релейной защите метод начертания контактов, приспособленный к изображению исходного состояния схемы, указывает непосредственно замкнут или разомкнут контакт реле в данном изображении схемы, ничего не говоря о состоянии в этот момент самого реле. Более того, как это видно и из рис. 1, а и рис. 2, начертания не позволяют решить, возбуждено ли реле или нет. На рис. 2 можно с успехом поменять местами а и б и согласно принятым обозначениям все останется правильным.

Не нарушая принятого способа обозначений в схемах защиты, можно было применить более целесообразное обозначение контактов (в, г, рис. 3).

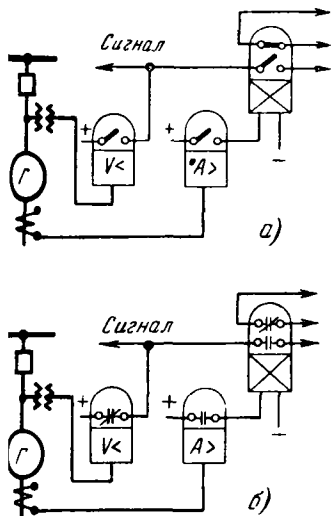


Рис. 1. Схема защиты максимального тока с пуском минимального напряжения в условных начертаниях схем релейной защиты а и автоматики б. Граница возбужденного и невозбужденного состояния реле — параметр трогания.

В схеме а контакты V< и A> изображены одинаково, в то время когда одни замыкаются при переходе реле в возбужденное состояние, а другие, наоборот, при переходе реле в возбужденное состояние. Для правильного прочтения схемы а нужно знать идею, заложенную в схему, и режим, который схема изображает.

В схеме б все контакты, ведущие себя по-разному при возбужденном и невозбужденном реле, изображены различно. Для прочтения схемы не надо знать заложенной в ней идеи или исходного режима.

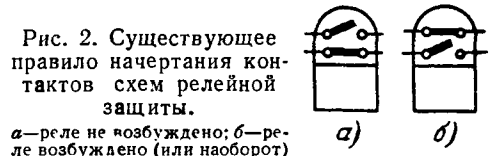


Рис. 2. Существующее правило начертания контактов схем релейной защиты. а—реле не возбуждено; б—реле возбуждено (или наоборот)

ХЭМЗ	Прочие	Состояние при невозбужденном аппарате
а)	в)	Разомкнут
б)	г)	Замкнут

Рис. 3. Примеры начертаний мгновенных контактов в схемах автоматики, принятые ХЭМЗ-а и б) и другими организациями (в и г).

—○— «Нормально» открыт (разомкнут при невозбужденном реле)
—/— «Нормально» закрыт (замкнут при невозбужденном реле)

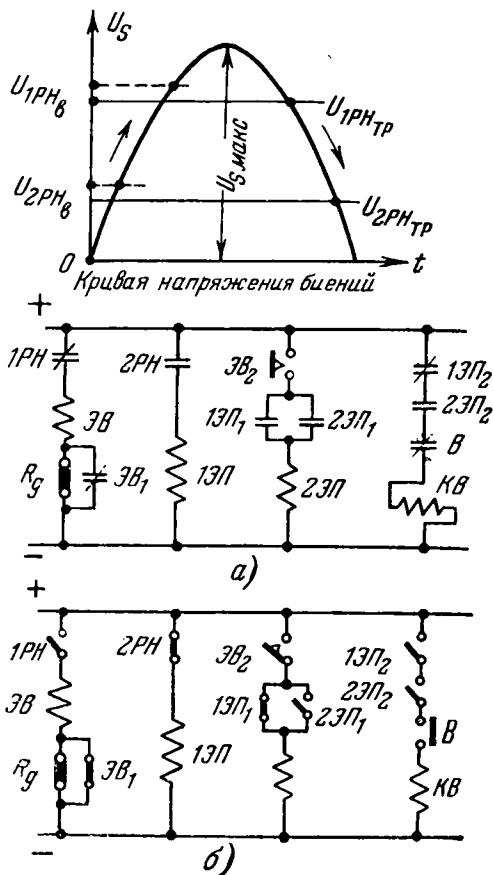


Рис. 4. Схемы оперативных цепей синхронизатора КА-13 в начертаниях схем автоматики (а) и релейной защиты (б).

Схема а не изображает исходного режима. Чтение схемы возможно, начиная с любого значения U_s .

Схема б изображает частный случай: $U_s = U_{s \text{ макс}}$.

Если рассматривать, например, случай $U_s < U_{1PH \text{ тр}}$, то контакт 1PH должен быть показан замкнутым, и неясно, в каком положении показывать ЭВ₂, а значит и ЭП₁, ЭП₂ (индекс в — возврат, тр — трогание).

Недостатки способа изображения схем защиты в применении к этим схемам не столь заметны потому, что однозначность функционального назначения релейной защиты позволяет, как правило, рассматривать всего один переход схемы из изображенного состояния покоя в состояние действия.

Иначе обстоит дело со схемами автоматики. В сложной схеме автоматического управления невозможно однозначно указать, какой из ее режимов является нормальным или исходным, и, следовательно, каждый раз пришлось бы делать на этот счет оговорки или для каждого нового исходного режима заново перечерчивать схему. Далее, в таких схемах на протяжении всего процесса, сопровождающегося действием схемы, отдельные реле или аппараты могут переходить от невозбужденного состояния в возбужденное, а затем вновь в невозбужденное (или наоборот) и иногда не один раз. В этих случаях, как только начинается рассмотрение работы схемы, мы немедленно лишаемся удобств, достигнутых за счет «подготовленного» исходного изображения режима схемы.

Упомянутая неоднозначность начертания контактов реле, возбужденных и невозбужденных в изображенном режиме, вносит дополнительные затруднения в расшифровку поведения схемы в других ее режимах. Если же изображение контактов однозначно связывается только с состоянием данного аппарата, то ряд трудностей отпадает. Логическая нить, утерянная в какой-либо точке при прослеживании режима схемы, вновь восстанавливается без обращения к исходным условиям, как только будет выяснен режим того реле, на контактах которого произошел логический «сбой».

Знание идеи, заложенной в схему, делается также необязательным. Схема в начертании автоматики может быть совершенно правильно понята и расшифрована без всяких словесных пояснений, чего нельзя никак сказать о схеме в начертаниях релейной защиты.

В качестве еще одного примера на рис. 4 показана известная схема синхронизатора с постоянным углом опережения типа КА-13. На протяжении одного периода биения эта схема имеет 5 режимов:

а) на восходящей части кривой напряжения биения U_s :

1) $0 \leq U_s < U_{срн_в}$, 1PH и 2PH не возбуждены

2) $U_{срн_в} \leq U_s < U_{1PH_в}$, 1PH не возбуждено, 2PH возбуждено;

3) $U_{1PH_в} \leq U_s$, 1PH и 2PH возбуждены;

б) на нисходящей части кривой напряжения биения U_s :

4) $U_s \leq U_{1PH_в}$, 1PH не возбуждено; 2PH возбуждено;

5) $U_s \leq U_{2PH_тр}$, 1PH и 2PH не возбуждены!

На эти режимы накладывается еще различные режимы (очередности работы отдельных элементов схемы) в зависимости от величины скольжения.

Очевидно, что если дать «изображение» схемы для условного момента, например для $U_s = U_{s \text{ макс}}$, как это сделано на рис. 4, то анализ всех режимов не только не облегчается, а, наоборот, усложняется.

Из сказанного следует, что попытка перенесения на схемы автоматики существующих методов начертания схем релейной защиты приведет к весьма существенным затруднениям. Вместе с тем, перенесение на схемы защиты методов изображения автоматики таких неудобств не вызывает.

Основным и практически единственным методом в автоматике является развернутая схема. В релейной защите развернутые схемы служат скорее дополнением к принципиальной схеме. Отсюда ясно большее значение строгой и стройной системы условных обозначений и принципов начертания для автоматики.

Для схем автоматики целесообразно принять такие начертания контактов, которые по своему внешнему виду не давали бы повода считать, что они изображают одно какое-то состояние контак-

	ХЭМЗ	ГИДЭП	Состояние при невозбужденном реле Поведение
а)			Разомкнут, замыкается замедленно
б)			Разомкнут; размыкается замедленно
в)			Замкнут; размыкается замедленно
г)			Замкнут; замыкается замедленно

Рис. 5. Примеры изображения замедленных контактов.

а в данный момент. С этой точки зрения принятые символы контактов релейной защиты оказываются совершенно не подходящими.

Из существующих других символов, как на пригодные, можно указать символы мгновенных контактов по рис. 3 и символы замедленных контактов по рис. 5.

Символы в и г рис. 3 и символы ХЭМЗ по рис. 5 требуют дополнительного условия однонаправленного движения контактов — слева направо или сверху вниз при возбужденном реле.

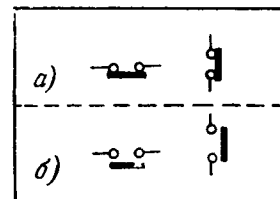
При наличии такого условия символ г рис. 3 можно изобразить двойкой, как показано на рис. 6. Второе начертание желательно, так как не вызывает ассоциации с положением «в данный момент». Такое же замечание относится, очевидно, и к символам в и г ХЭМЗ на рис. 5.

Детальное обсуждение сравнительных качеств того или иного изображения выходит за рамки данной статьи, тем более, что приведенные примеры не охватывают всех возможных типов контактов (двусторонние, проскальзывающие, неэлектрических аппаратов и др.). Однако совершенно очевидно, что коль скоро будет устранено основное принципиальное различие в подходе к определению понятия нормального состояния контактов и вытекающего отсюда метода начертания всей схемы, целесообразные и приемлемые для любых схем единые символы контактов могут быть без труда установлены и узаконены. Изумеется, символы обмоток и контактов должны быть едиными как для развернутых, так и для принципиальных схем защиты и автоматики.

В заключение необходимо упомянуть о буквенно-цифровых наименованиях обмоток, контактов и целых аппаратов в развернутых и принципиальных схемах.

Повидимому, именно этот метод окажется наиболее подходящим с производственной, литературной и педагогической точек зрения, поскольку он обладает элементами мнемоники. Во

Рис. 6. Два возможных правила начертания контактов, замкнутых при невозбужденном аппарате.



всяком случае сейчас в СССР этот метод, повидимому, наиболее общепризнан. Однако и здесь существует значительная пестрота, не оправдываемая никакими разумными доводами. Не редкость даже на страницах одного и того же журнала увидеть такие обозначения второго промежуточного реле: 2РП; РП-2; РП₂, или, например, первый выключатель в схеме обозначен как 1В, а его соленоид отключения как СО₁ вместо 1СО и т. д.

В развернутых схемах весьма полезно присваивать контактам одного и того же реле порядковые цифровые индексы, что позволяет делать описание действия схемы значительно более кратким. Необходимо только четко условиться, какая цифра и на каком месте обозначает порядковый номер аппарата и какая — порядковый номер его контакта.

Выводы. 1. Основным принципиальным вопросом, требующим согласования и решения, является определение нормального состояния контакта. Если нормальное состояние контакта всегда будет соответствовать невозбужденному состоянию контакта, то будет исключена возможность разночтения схем. Для сложных схем автоматического управления это определение является единственно целесообразным.

2. Правила начертания контактов и условные символы должны быть едиными и для развернутых и для принципиальных схем. Символы контактов должны, по возможности, исключать самую мысль их истолкования применительно к изображенному состоянию схемы.

3. Методы составления буквенно-цифровых наименований обмоток и контактов в схемах должны быть стандартизованы. Если параллельно с развернутой схемой дается принципиальная схема, то в ней должны повторяться буквенно-цифровые наименования, присвоенные отдельным аппаратам в развернутой схеме.

4. Как для развернутых, так и для принципиальных схем должно быть принято единое однозначное направление движения всех контактов при возбуждении аппаратов.

Кандидат техн. наук
Е. Л. СИРОТИНСКИЙ
Москва



К статье Г. И. Штурмана „Разомкнутые беличьи клетки в короткозамкнутых асинхронных двигателях“

(Электричество, № 9 и 12, 1951 и № 2, 1952)

Л. М. ЛУБОЦКИЙ

В связи с дискуссией по поводу статьи проф. Г. И. Штурмана представляет известный интерес практический опыт применения разомкнутой беличьей клетки на Рижской табачной фабрике № 2. В ноябре 1950 г. на фабрике надо было пустить в эксплуатацию грузовой подъемник грузоподъемностью 0,9 т. Имевшийся в наличии электродвигатель мощностью 5,5 квт, 960 об/мин полузакрытого типа с короткозамкнутым ротором не удовлетворял по пусковому моменту. Установка более мощного электродвигателя была бы связана с перестройкой всего машинного отделения. Решили применить рекомендованный братьями Г. И. и Л. И. Штурман метод размыкания клетки.

На одном из колец ротора двигателя было сделано 9 разрезов. Измерения в пусковом и рабочем режимах

были произведены до и после разрезания кольца ротора. Оказалось, что пусковые токи после разрезания уменьшились на 5%, а пусковой момент возрос на 30%. Таким

образом, отношение $\frac{M_{пуск}}{I_{пуск}}$ увеличилось на 37%. Благодаря

быстрому затуханию пусковых токов уставка автомата могла быть сделана на отметке рабочего тока (12,2 а). До разрезания кольца автомат с максимальной уставкой (21 а) срабатывал даже при пуске недогруженного подъемника. Коэффициент мощности после разрезания кольца при работе с полным грузом уменьшился с 0,82 до 0,81.

Подъемник пустили в эксплуатацию 14 ноября 1950 г. и он безукоризненно работает по сей день. Режим работы — 8 час. в сутки

Правила устройства электротехнических установок¹

Инж. М. М. ФЕЕРМАРК

Южэлектромонтаж МСПИ

Согласно § 34 раздела Правил устройства, посвященного релейной защите, требование постоянного контроля исправности цепи выключения не распространяется на выключатели напряжением ниже 35 кв, установленные на обслуживаемых подстанциях. Такое ограничение нельзя признать целесообразным, так как осуществление контроля исправности цепи выключения не связано с дополнительным расходом оборудования, материалов или усложнением цепей управления. Контроль исправности оперативных цепей достигается с помощью простейшей схемы управления выключателями, и отказ от такого контроля приведет к увеличению количества контрольных проводов и вспомогательных контактов на силовом выключателе.

Требование контроля исправности цепи выключения должно распространяться на все без исключения выключатели с дистанционным управлением. При ручном управлении осуществление контроля исправности цепей выключения связано с усложнением и удорожанием установки и отказ от него можно считать оправданным. Но и в этом случае он должен быть сохранен для выключателей, установленных на линиях, питающих нагрузки первой категории.

В Правилах должно быть включено указание о том, что при напряжении оперативного тока 24 и 48 в, получившем в настоящее время широкое распространение в промышленных установках, и при ручном управлении выключателями устанавливать предохранители в оперативных цепях каждого выключателя не требуется. Предохранители с постоянным контролем их целостности должны устанавливаться лишь на питающих магистральных линиях этих напряжений.

Изложенное в § 37 требование, согласно которому отдельные предохранители в цепи оперативного тока защиты и управления должны устанавливаться только на

присоединениях напряжением 6 кв и выше, должно быть распространено и на присоединения напряжением 3 кв, выполняющие часто такие же функции и имеющие такое же значение, как и присоединения 6 кв.

В § 56 должна быть сделана оговорка о том, что отказ от газовой защиты силовых трансформаторов мощностью 1000 кв и напряжением 3...10/0,2...0,5 кв допускается в тех случаях, когда выключатель устанавливается на значительном расстоянии от трансформатора (0,4...0,5 км).

В § 59 содержится указание о необходимости отстройки дифференциальной защиты трансформаторов от бросков тока намагничивания только в тех случаях, когда в зоне защиты входит также питающая линия (схема блок трансформатор — линия без выключателя со стороны линии). Это указание следует распространить на все случаи применения дифференциальной защиты трансформатора независимо от того, входит в зону защиты питающая линия или нет.

По смыслу указаний, приведенных в § 57, 58 и 61 силовые трансформаторы мощностью 1000 кв с низким вторичным напряжением должны иметь два комплекта защиты от сверхтоков, обусловленных внутренними и внешними повреждениями: токовая отсечка без выдержки времени и резервная защита с выдержкой времени. По нашему мнению, для таких трансформаторов целесообразно и допустимо выполнять защиту по одному из следующих вариантов:

а) с помощью реле с ограниченно-зависимой характеристикой и встроенной отсечкой, которые позволяют применить оперативный переменный ток;

б) с помощью одного комплекта защиты, имеющей независимую характеристику и действующей на отключение с выдержкой времени 0,25...0,3 сек; выдержка времени должна быть достаточна для отстройки от плавких предохранителей, установленных на присоединениях низкого напряжения, а ток трогания должен позволять резервировать эти предохранители;

в) с помощью реле прямого действия (без механизма времени), ток трогания которых выбирается из условия

¹ См. Электричество, № 11 и 12, 1949; № 3, 4, 6, 8, 9 и 10, 1950; № 7 и 12, 1951; № 1, 2, 5, 1952.

веривирования плавких предохранителей, установленных в присоединениях низкого напряжения.

Приведенные в различных разделах указания относительно защиты от замыканий на землю не систематизированы и не согласованы между собой. Например, на генераторах и двигателях предлагается применять защиту при коротких замыканиях на землю 5 а и выше, на статических конденсаторах — 20 а. Относительно же защиты трансформаторов, присоединенных к сетям с малым током замыкания на землю, нет никаких указаний. Также нет указаний о чувствительности защиты кабельных линий 2...кв, выполняемой согласно § 71. Необходимо разработать и сформулировать общие положения, на основе которых можно было бы дать указания в частных случаях применения защиты от замыканий на землю.

Согласно § 112 на двигателях мощностью до 2 000 квт и на двигателях 2 000 квт и больше, имеющих только три фазы, для защиты от многофазных замыканий должна предусматриваться однорелейная токовая отсечка. Однако в выполнении защиты таких двигателей одним реле, включенном на разность токов двух фаз, ток трогания токовых отсечек часто не удовлетворяет требованию § 20, согласно которому коэффициент чувствительности должен быть не менее 2. Поэтому целесообразно при отсутствии дифференциальной защиты во всех случаях защиту отсечкой на двигателях мощностью более 1 000 квт выполнять двухрелейной.

Необходимо уточнить способ выполнения дифференциальной защиты двигателей. На двигателях мощностью до 4 000 квт нам представляется допустимым применять двухфазную дифференциальную защиту.

Защита двигателей от однофазных замыканий на землю согласно § 113 должна выполняться при токах замыкания на землю больше 5 а. Насколько нам известно, вводы Министерства электропромышленности не изготовляют аппаратуру, позволяющую выполнять защиту с такой чувствительностью. Только Киевский ремонтный завод Министерства коммунального хозяйства выпускает трансформаторы тока с подмагничиванием, обеспечивающие чувствительность защиты от 5 а. При таких условиях требование, содержащееся в § 113 Правил, трудно выполнить. До выпуска электропромышленностью трансформаторов тока с подмагничиванием следует допустить применение для защиты двигателей от замыкания на землю статических трансформаторов тока типа ТЗ, обеспечивающих чувствительность от 10 а.

В § 132 желательно внести уточнение, из которого бы

следовало, что автомат обратного действия выключает не внешний ток, а ток, притекающий из внешней сети.

В § 133 сказано, что защита трансформаторов, питающих ртутные выпрямители, должна выполняться в соответствии с требованиями для обычных трансформаторов за исключением дифференциальной защиты. Но согласно этим требованиям (§ 56) газовая защита предусматривается на трансформаторах мощностью 1 000 квт и выше. Учитывая специальное назначение трансформаторов, питающих ртутные выпрямители, мы считаем, что газовая защита на них должна предусматриваться при типовой мощности 1 800 квт и выше, т. е. при номинальной мощности по паспорту 960 квт и выше. Следует учесть, что завод выпускает указанные трансформаторы комплектно с газовыми реле.

В п. «г» § 137 указано, что при больших токах замыкания на землю на трансформаторах, питающих дуговые печи, должна быть предусмотрена защита от однофазных замыканий на землю. Содержание этого пункта остается непонятным, так как дуговые печи присоединяются к высоковольтным сетям с малым током замыкания на землю. Нам неизвестны случаи питания таких установок от сетей с большим током замыкания на землю.

Для высоковольтных конденсаторов согласно § 138 требуется защита от замыкания на землю при токах однофазного замыкания на землю более 20 а. Не затрагивая вопроса об обоснованности указанной величины тока, остается неясным, с какой чувствительностью должна в этом случае работать защита от замыкания на землю.

Согласно § 3 раздела Правил устройства, посвященного автоматике электрических систем, АПВ должны предусматриваться на линиях всех типов напряжением 2...20 кв при наличии технической и экономической целесообразности применения таких устройств. Таким образом, это указание относится и к кабельным линиям. Однако до настоящего времени на кабельных линиях АПВ, как правило, не применялись или применялись очень ограниченно. Опыт эксплуатации этих устройств, насколько нам известно, не публиковался. Поэтому следовало бы указание о применении АПВ на кабельных линиях сформулировать таким образом, чтобы эта мысль была выражена более ясно и чтобы было указано, в каких именно случаях и при каких условиях следует применять устройства АПВ на кабельных линиях.

Из п. 1 § 26 должны быть исключены слова «в целях обеспечения надежности», так как они не соответствуют действительной причине раздельного присоединения вводов к несвязанным секциям шин.

К статье Е. Л. Сиротинского „Об условных обозначениях в правилах начертания схем релейной защиты и автоматики“

(см. стр. 75)

Профессор И. И. СОЛОВЬЕВ

*Московский энергетический институт
имени М. Г. Волкова*

Затронутые в статье Е. Л. Сиротинского вопросы, начиная с 1937 г., периодически обсуждались, но общим взглядом, к сожалению, еще не достигнуто.

Исторически сложилось, что службы защиты в энергосистемах и соответствующие отделы в проектных организациях создавались самостоятельно и отдельно от групп отделов, занимающихся другими отраслями автоматики, именно технологической автоматики. Естественно, это ввело к тому, что у отдельных групп инженеров выработались свои навыки, от которых они не желают отказываться. Отсутствие узаконенных, обязательных для всех правил способствовало углублению этих различий.

Следует отметить, что релейная защита получила развитие значительно раньше, чем другие виды устройств автоматики, и инженеры релейной защиты в СССР значительно раньше пришли к необходимости установления

единой системы условных обозначений и способов начертания схем. Достаточно указать, что система единых условных обозначений и способов начертания схем по релейной защите для всех энергосистем СССР была опубликована еще в 1933 г.¹, в то время как по другим разделам автоматики энергосистем это не сделано до сих пор.

Е. Л. Сиротинский ставит вопросы однозначно как для проектно-производственной документации, так и для учебной литературы (подготовка кадров). Нам же представляется, что здесь необходимо учесть некоторые специфические различия.

Проектно-производственная документация составляется в предположении, что конструктивные особенности и принципы действия отдельных элементов устройств автоматики соответствующему персоналу уже известны, и требуется составить полные схемы этих устройств в комплексной связи с учетом удобства чтения при монтаже, обеспече-

¹ См. составленные Терлевым проектом „Руководящие указания по релейной защите“, Главэнерго НКТП СССР, Энергоиздат, 1933.

ния разумных размеров чертежей и экономии времени на вычерчивание знаков и т. п.

Учебная литература в первую очередь преследует цели облегчения понимания учащимися физических свойств и принципов действия устройств автоматики и должна быть свободна от излишних монтажных подробностей, затемняющих основную идею.

С этой точки зрения требования к выполнению начертания схем в первом и втором случаях могут быть различными.

Переходя к существу затронутых Е. Л. Сиротинским вопросов, нам представляется, что он неправильно связывает вместе три различных вопроса: 1) выбор символов для условных обозначений контактов; 2) выбор положения, для которого должны быть показаны контакты на схеме; 3) о способах начертания схем электрических соединений устройств автоматики в целом. Все эти вопросы следует рассматривать независимо. Например, второй и третий из них могут иметь различные решения при любой системе условных обозначений контактов и т. п. Остановимся кратко на каждом из вопросов.

Условное обозначение контактов. К условным обозначениям контактов, как и любых других устройств, можно подходить с двух принципиально различных позиций:

1) применять любые символы независимо от физических или конструктивных особенностей обозначаемых элементов (так как все равно они условны);

2) выбирать символы, хотя бы косвенно отражающие физические или конструктивные особенности обозначаемых элементов.

С нашей точки зрения первый способ неприемлем, так как он уводил бы нас на путь формализма и затруднял бы восприятие изучаемых устройств автоматики. Второй способ, наоборот, отражая в какой-то мере физические и конструктивные особенности изображаемых элементов, облегчает их понимание и запоминание при изучении устройств автоматики. Конечно, в определенной разумной мере должны также учитываться требования простоты вычерчивания символов.

Подходя с этой точки зрения к выбору символов для условных обозначений контактов следует отдать предпочтение обозначениям, приближенно напоминающим конструктивное выполнение и кинематическую схему контактов. Схема рис. 1,а статьи Е. Л. Сиротинского соответствует случаю, когда один конец контакта свободно вращается относительно точки укрепления второго конца; схема рис. 6—случаю, когда проводящая пластинка перекрывает два неподвижно закрепленных контакта. Учитывая сказанное, любая из систем рис. 1,а и 5 принципиально может считаться приемлемой. Другие же системы, показанные, например, на рис. 1,б и 5 (система ГИДЭП), неприемлемы, как лишенные всякого физического смысла.

Исходя из сказанного, нельзя также согласиться с тем положением Е. Л. Сиротинского, что «целесообразно принять такие начертания контактов, которые по своему внешнему виду не давали бы повода считать, что они изображают одно какое-то состояние контакта в данный момент» (стр. 76—77).

Физически каждый из контактов может занимать одно из двух конечных положений: замкнутое или разомкнутое. Графически условный знак контакта в пределах одной схемы может быть изображен только для одного из этих двух положений.

Нужно ли изыскивать символы, которые не показывали бы ни одного из названных положений? Нам кажется, что безусловно нет.

Учитывая, что система, показанная на рис. 1,а, отвечает поставленным выше требованиям, принятым «Руководящими указаниями по релейной защите» в изданиях 1933, 1937 и 1948 гг., и однозначно используется во многих литературных источниках, отступать от нее, нам кажется, нет оснований. Она позволяет легко вычерчивать и читать как свернутые, так и развернутые схемы и в одинаковой мере — как для устройств защиты, так и для устройств автоматики.

Применять различные символы для условных обозначений контактов одних и тех же элементов в схемах защиты и автоматики нет никаких оснований. Более того, системы, не отвечающие требованиям возможности одина-

кового изображения элементов для любых устройств, должны быть признаны вообще непригодными.

Понятия нормально замкнутого и нормально разомкнутого состояния контактов; выбор положения контакта на схеме. Е. Л. Сиротинский неправильно смешивает различные положения, а именно: что понимается под нормально замкнутым и нормально разомкнутым положением контактов и в каком положении целесообразно показывать эти контакты на схеме.

Понятия о нормально замкнутых и нормально разомкнутых контактах однозначны и вряд ли кто-нибудь сомневается. Утверждение о том, что в релейной защите и матике эти термины соответствуют различным и исключающим друг друга понятиям, является недоразумением Е. Л. Сиротинского.

Совсем другое дело, в каком положении целесообразно показывать контакты на схеме. Это совсем самостоятельный вопрос, который в определенных условиях может иметь различное решение для проектной (иной производственно-технической) документации и учебной литературы.

О том, что является более удобным для проектной и другой производственно-технической документации, представим судить соответствующим авторитетным специалистам. Что же касается учебной литературы и изображений схем на доске во время педагогического процесса, то не может согласиться с рекомендациями Е. Л. Сиротинского применять такой способ вычерчивания схем, в котором: «Знание идеи, заложенной в схему, делается также не обязательным» (стр. 76). Спрашивается, для чего же вычерчиваются схемы в учебном процессе, как не для уяснения учащимися в первую очередь идеи, заложенной в схему.

Мы не можем согласиться с тем, что в учебном процессе можно рекомендовать такие схемы, которые «изображают какой либо конкретный исходный режим» (стр. 75). Утверждение Е. Л. Сиротинского о том, что схема, вычерченная для определенных исходных условий, якобы затрудняет ее понимание, безусловно субъективное и спорное. Наоборот, для преподавания нельзя допускать такие схемы, которые не изображают в какой-либо идее и не отражают никаких существенных особенностей физического состояния устройств, изображаемых схемой.

В качестве примера рассмотрим с точки зрения педагогического процесса ту же схему, которую Е. Л. Сиротинский привел для пояснения принципа действия хронизатора с постоянным углом опережения (рис. 4).

В чем заключается основная идея устройства, называемого синхронизатором с постоянным углом опережения, которую необходимо уяснить учащимся в процессе изучения схемы в первую очередь? Очевидно, в том, что она обеспечивает устойчивость, при которых замыкание цепи на включение выключателя происходит с постоянным углом опережения момента оптимума при наличии определенного значения угловой скорости скольжения.

Эти условия обеспечивают соответствующим сочетанием моментов времени — замыкания контактов реле $1PH$ и $ЭВ$ и размыкания контактов реле $2PH$. Срабатывание перечисленных реле в процессе выполнения поставленной задачи происходит на спадающей часовой кривой периода напряжения биений.

Спрашивается, в каком же положении удобнее показывать контакты реле для облегчения понимания выполнения устройством поставленной задачи: в положении, в котором они действительно находятся перед моментом исполнения этой задачи, или в каком-то «безидейном» положении, т. е. в положении, в котором в действительности они в данный момент не находятся, и учащийся мысленно должен представить себе, что в действительности контакты находятся как раз не в том положении, в котором они показаны на схеме.

Нам представляется, что первое является, безусловно, более правильным, так как оно не требует от учащегося дополнительного напряжения для представления действительного положения контактов, отличающегося от показанного на схеме.

Как видим, однозначная рекомендация изображать контакты реле в схемах без исходного режима не мож-

Следует также отметить, что упорядочение в изображении схемы требуется в первую очередь в пределах каждой области. Даже в релейной защите, несмотря на наличие совершенно определенных и общеизвестных рекомендаций («Руководящие указания по релейной защите»), имеется недопустимый разбой в изображении схем различными организациями и службами РЗАИ энергосистем. Этот разбой проникает и в периодическую печать. Принципиально различающиеся по изображению схемы часто встречаются и на страницах журнала «Электрические станции».

Это не только результат недостаточной требовательности к соблюдению установленного порядка и непрерывного, если так можно выразиться, «засорения» схем релейной защиты обозначениями элементов, взятыми из других областей техники. Имеет место обоснованное стремление отразить возможно лучше, точнее и более понятно конструктивное исполнение применяемых реле, положение и поведение контактов в рассматриваемых режимах.

Чем лучше показана на схеме идея действия устройства, тем легче читать схему и удобнее ею пользоваться. Схем же, которые можно разобрать и понять, не зная или не вскрыв заложенные в эти схемы идеи их действия, конечно нет и быть не может.

Следует сделать вывод, что предложение Е. Л. Сиротинского ценно по своей инициативе в постановке наиболее важного вопроса о необходимости приведения в известный порядок и по возможности сближения условных обозначений и правил начертания схем. Но существо предложения, связанное с очень большой, коренной и тяжелой ломкой установившихся принципов, в данное время принять нельзя. Уместно вспомнить, что речь идет о средстве общения большого числа специалистов и следует предостеречь от внезапной и искусственной ломки путем «взрыва» установившейся в течение многих лет практики. Вопрос должен решаться постепенно, с тщательной проработкой и проверкой на основе опыта. Первой задачей следует поставить не сведение всего к единой системе, а уменьшение числа систем, исключение худших, опорочивших себя на практике.

Целесообразно Министерством электростанций и электропромышленности совместно подготовить и утвердить ведомственные правила начертания схем и условные обозначения, охватывающие релейную защиту, релейное, автоматическое управление в энергетике, автоматику электропривода и телемеханику в энергетике. При разработке правил следует учесть все лучшее, что имеется, но допустить сохранение отдельных различий в той мере, в какой это оправдывается существующей практикой. Можно ввести отдельные дополнительные обозначения, например индексы, показывающие, что реле изображено в возбужденном состоянии. Можно установить порядок обязательного указания на схеме (в виде знака или надписи) принятого способа изображения (наподобие того, как указываются масштабы в чертежах машиностроения).

Это не будет полной унификацией, но улучшит дело и облегчит как пользование схемами, так и переход от одних схем к другим. Опубликование таких правил в журналах позволит проверить и внедрить их довольно скоро. Что же касается общесоюзного стандарта, охватывающего все области техники, то это значительно более трудное и длительное дело, которое следовало бы отложить до накопления опыта по употреблению указанных выше, а также и других ведомственных правил.

Инж. А. Б. КРИКУНЧИК

Теплоэлектротропроект

Поднятый Е. Л. Сиротинским вопрос о необходимости установления единой методики вычерчивания схем релейной защиты и автоматики является давно назревшим. Только исторически сложившимися условиями работы в области релейной защиты и в области автоматики и консерватизмом отдельных работников той и другой области объясняется то, что до настоящего времени такая единая методика не установлена.

Следует отметить, что проект стандарта на единые графические символы в элементных (развернутых) схемах

электропривода был разработан Центральным бюро дартизации и нормализации Министерства электростанций СССР еще в 1946 г.¹

В заключении по этому проекту Теплоэлектротропроект предлагал с учетом некоторых замечаний и изменений распространить предлагаемые единые графические символы также и на электрические установки электрических станций и подстанций, включая и релейную защиту.

Предложение Е. Л. Сиротинского изображать в различных состояниях контактов при невозбужденном состоянии аппаратов правильно. Однако это определение не является в достаточной мере исчерпывающим, так как существуют аппараты, которые могут занимать в невозбужденном состоянии различное положение (включенное, отключенное). К таким аппаратам относятся все выключатели высокого напряжения, автоматы, контакторы (щелкой). Поэтому следует оговорить, что аппараты, которые могут в невозбужденном состоянии занимать разное положение, при изображении схем принимаются в ключенном состоянии.

Следует признать правильным предложение принять одинаковые символы обмоток и контактов для возвратных и принципиальных схем. Практика показала, что применение одинаковых символов для тех или иных схем вполне возможно и целесообразно.

Вопрос о введении единых условных обозначений правил начертания электрических схем следует поставить значительно шире, чем это сделано автором. Необходимо разработать и утвердить стандарт на единые графические символы для развернутых и принципиальных схем, в который охватывал бы как схемы электропривода, так и схемы электрических установок электрических станций и подстанций. Эти графические символы должны охватывать схемы управления, измерения, сигнализации, регулирования, релейной защиты и автоматики.

Более того, следует считать совершенно необходимым в связи с тем, что развитие техники привело к очень быстрому внедрению электрических аппаратов в схемы тепловых измерений, регулирования тепловых процессов тепловой автоматики, включая в новый стандарт также и графические символы, относящиеся к тепловому управлению и тепловой автоматике.

Все более широкое внедрение телеуправления, телезащиты и телеизмерений, а также широкое применение релейной защиты с высокочастотными блоками и электроники в схемах регулирования, сигнализации и автоматики делают своевременным разработку и включение в стандарт единых графических символов для электрических схем также и элементов схем проволочной связи и сигнализации и схем радиотехники.

Необходимость создания такого стандарта единых графических символов для развернутых (элементных) принципиальных электрических схем, охватывающих схемы электропривода, электрооборудования станций, подстанций, теплового контроля, проволочной связи радиотехники, как областей, очень тесно соприкасающихся, несомненно, вполне назрела. Только таким путем можно будет добиться для всех организаций Советского Союза единообразного изображения электрических схем, что даст существенную пользу и экономию времени при подготовке специалистов и при использовании чертежей, выпускаемых нашими предприятиями.

Инж. Б. А. ХОМУТОВ

Молотовэнерго

Е. Л. Сиротинский своевременно поставил вопрос о необходимости устранения имеющейся несогласованности в методах изображения и правилах начертания схем защиты и автоматики и о необходимости стандартизации обозначений.

В качестве характерного примера такой несогласованности можно привести схемы фильтровой высоковольтной защиты, получаемые энергосистемами вместе с аппаратами типа ПЗ-161. В соответствии с принципами, при-

¹ Электричество, стр. 71, № 12, 1946.

ыми в схемах релейной защиты, положение контактов показано соответствующим включенному положению защиты, а изображение самих контактов в развернутой схеме дано в символике, типичной для схем автоматики. В результате чтение довольно простой схемы стало затрудненным для инженеров, не знакомых в деталях с принципом действия защиты.

Вопрос настолько ясен, что представляется целесообразным перейти к конкретным предложениям.

1. Следует отметить, что система обозначений контактов, принятая в технике связи и телемеханике, еще удачнее и более mnemonicна, чем изображения, принятые для схем автоматики.

Относительно работы контактов *a—в*, показанных на рис. 1, не может быть двух мнений, если знать, что *a—* «верхний», т. е. замкнутый при невозбужденной обмотке

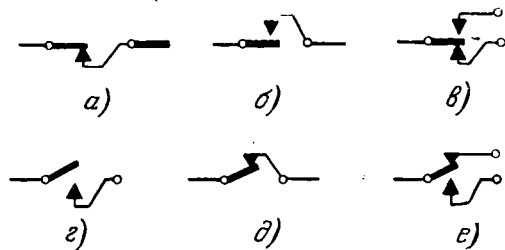


Рис. 1.

контакт, *б* — верхний, замкнутый при возбужденной обмотке контакт, и даже такие положения этих контактов, как *г, д, е*, несколько не затрудняют понимания существа. Схема может изображаться в любом промежуточном положении и все же будет читаться совершенно однозначно благодаря исключительно четкой mnemonicческой связи изображения «верхних» и «нижних» контактов с положением якоря реле. По сравнению с этими изображениями, для чтения схем ХЭМЗ требуется помнить условные принятых понятий «нормально замкнутый» и «нормально разомкнутый» контакты.

2. В силу относительности понятия «нормальное состояние реле» и во избежание путаницы с имеющим в релейной технике большое значение понятием «нормальный режим» целесообразнее вообще отказаться от приставки «нормально» в определении контактов и заменить его более простыми и точными, хотя и чисто условными терминами, подобно принятым в телемеханике «верхний» и «нижний» или «рабочий контакт», «нерабочий контакт», причем обязательно необходимо установить mnemonicческую связь между изображением контакта и положением подвижного органа реле с условно принятым направлением усилия «вверх» или «вниз» (рис. 2).

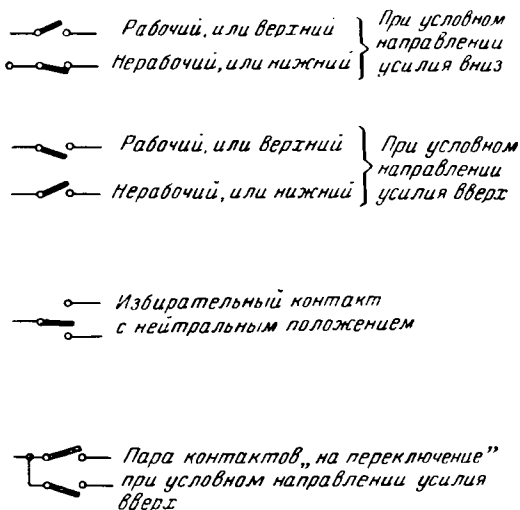


Рис. 2.

3. Изображения ХЭМЗ целесообразно сохранить для «силовых» контактов — линейные контакторы, мощные промежуточные реле и т. д.

4. Изображать схемы более целесообразно по принятому в автоматике способу, хотя при наличии отмеченной выше mnemonicческой связи любое промежуточное положение не должно вызывать недоразумений.

5. Соответствие индексов в принципиальных неразвернутых и развернутых схемах, безусловно, обязательно и достигнуто во многих энергосистемах.

6. Стандартизация методов составления буквенных и цифровых наименований (индексов) весьма желательна, при этом целесообразно учесть опыт крупных проектных организаций (ТЭП, ГИДЭП) и энергосистем, занимавшихся этими вопросами.

Кандидат техн. наук А. Г. МОСКАЛЕВ
кандидат техн. наук И. Н. ПОПОВ
и кандидат техн. наук М. И. ЦАРЕВ

ЦНИЭЛ МЭС

Вопрос, затронутый в статье Е. Л. Сиротинского, является, безусловно, важным и требующим известных уточнений, которые стали совершенно необходимыми в условиях быстрого развития автоматизации энергосистем.

Для схем релейной защиты представляют интерес только два положения контактов реле: *а*) в режиме нормальной работы защищаемого элемента и *б*) в режиме короткого замыкания, происходящего в защищаемом элементе или в энергосистеме. Естественно, что в этих условиях наиболее целесообразно (проще) рассматривать только два положения контактов реле, заведомо зная так называемое «складское» их положение. Схема релейной защиты, изображающая частный режим, при нормальной работе защищаемого элемента имеет определенный физический смысл. Она проще для понимания и требует сравнительно со схемами автоматики небольших пояснений, так как положение контактов дополнительно указывает на границы уставок реле.

Наряду с этим уяснение схемы с изображением контактов реле в «складском» положении требует большого времени, а также умственного напряжения для представления о «положении» контактов реле в нормальном рабочем режиме и затем при коротком замыкании. Схема с изображением контактов реле в «складском» положении сама по себе лишена всякого физического смысла без пояснений, характеризующих исходные условия.

Рассмотрим эти вопросы на конкретных схемах, приведенных в статье Е. Л. Сиротинского.

Для понимания схемы на рис. 1, *а* статьи Е. Л. Сиротинского требуется знать только исходный режим, который она изображает, и «складское» положение контактов реле, причем исходный режим, как указывалось выше, заранее обусловлен — это режим нормальной работы защищаемого элемента.

Из схемы следует, что при понижении напряжения до некоторого уровня сработает реле *V* и при увеличении тока сверх установленного сработает реле *A*. Эти два условия характеризуют, как известно, режим короткого замыкания, для которого и нужно рассмотреть действие схемы.

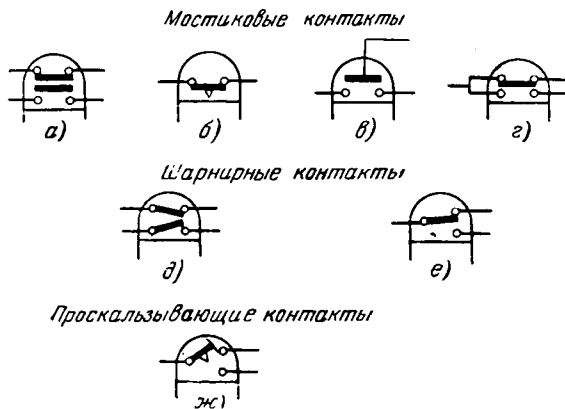
В то же время для понимания схемы рис. 1, *б*, где показано «складское» положение контактов реле, нужно рассматривать два режима работы защищаемого элемента. Необходимо также знать границы уставок реле, в противном случае схема является неопределенной.

Нельзя согласиться с мнением Е. Л. Сиротинского, что при изображении схемы по рис. 1, *б* не требуется знания заложенной в нее идеи. Это неверно, так как без знания заложенной идеи исключается возможность анализа схемы.

Наряду со схемами релейной защиты, которые изображаются в настоящее время для режима нормальной работы защищаемого элемента, схемы устройств автоматики, применяемой в энергосистемах, по нашему глубокому убеждению, могут и должны изображаться также

для определенного режима, например для исходного режима при поданном питании к устройству. Такое изображение схем автоматики приблизит их к схемам релейной защиты, наполнит физическим содержанием и облегчит их понимание, особенно для эксплуатационного персонала, привыкшего рассматривать схему, как непосредственное изображение физического аппарата в его рабочем состоянии. При этом необходимо все условные обозначения в схемах максимально приблизить к действительному конструктивному исполнению входящих в схему элементов.

На прилагаемом рисунке приведены примеры желательного изображения контактов реле некоторых существ-



Желательные условные обозначения контактов.

a и *д* — один нормально замкнутый контакт и один нормально разомкнутый; *б* — контакт с замедлением на размыкание; *в* — нормально разомкнутый контакт с подводом к мостику; *г* и *е* — переключающиеся контакты; *ж* — проскальзывающие контакты с замедлением на замыкание.

вующих конструкций. Такое изображение контактов максимально облегчает понимание схемы и приближает к физически существующим элементам, отображая принцип их конструкции. В то же время приведенный способ изобра-

жения контактов заключает в себе широкие возможности его можно применять как в развернутых, так и неразвернутых принципиальных схемах устройств релейной защиты и автоматики, используемых в энергосистемах. В противоположность ему способ изображения контактов, показанный в статье Е. Л. Сиротинского на рис. 1, б, формально область его применения ограничена и он, безусловно, может быть рекомендован при начертании схем релейной защиты.

Например, этот способ не позволяет просто и понятно изобразить переключающиеся или проскальзывающие контакты, а также мостиковые контакты с подводом питания через мостик. Кроме того, схемы с изображением контактов в складском положении весьма неудобны для пользования в условиях эксплуатации.

Нельзя согласиться с тем, что можно правильно понять схему без соответствующих пояснений, хотя бы в виде указаний, на что реагируют реле и какие уставки они имеют. Е. Л. Сиротинский заблуждается, полагая, что можно понять действие схемы, приведенной на рис. 4, а его статьи без пояснений о том, что схема должна обеспечить срабатывание катушки включения КВ при определенном периоде изменения напряжения, закон которого выражается определенной кривой. Не зная этого закона, невозможно понять смысл схемы.

Странно, что Е. Л. Сиротинский в своей критике схем начертания релейной защиты обращается к такому режиму схемы, когда запущено реле времени, но еще неизвестно будет ли его действие заблокировано или нет. Никто никогда не предлагал методику начертания схем для неустановившегося состояния. Все схемы рисуются для одного, вполне определенного установившегося состояния подвижной системы реле.

Методика начертания схем, предлагаемая Е. Л. Сиротинским, ведет к символам, к отходу от того, что схема должна отображать какую-то реальную систему. По нашему мнению, схема должна, по возможности, соответствовать конструктивным выполнением реле с тем, чтобы обеспечивалось органическое единство между схемой и аппаратом (устройством), которое она изображает. Схема должна облегчать понимание конструкции и особенностей устройства.

Положение Е. Л. Сиротинского, что «символы контактов должны... исключать самую мысль их истолкования применительно к изображенному состоянию схемы» нам кажется явно ошибочным.



О некоторых вопросах методики изложения курса электрических машин

Существенным недостатком методики изложения курса электрических машин является то, что машины различных видов рассматриваются изолированно. В результате у учащегося не создается представления об единстве принципов работы всех электрических машин. Ниже перечисляются некоторые вопросы, при рассмотрении которых учащимся следует показывать взаимосвязи между принципами работы электрических машин различных видов.

1. Электродвижущую силу машин переменного тока принято определять уравнением $E = 4,44 k\omega f\Phi$, а машин постоянного тока — уравнением $E = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi$. По внешнему виду эти уравнения сильно различаются. Следует, однако, иметь в виду, что ω выражает число витков лишь в одной параллельной ветви, а N — число активных проводников во всех $2a$ параллельных ветвях. Таким образом, во второе уравнение можно вместо N подставить $4\omega a$, тогда $E = 4\omega \frac{pn}{60} \Phi$. В таком виде и следует приводить учащимся уравнение э. д. с. машины постоянного тока. При этом необходимо обращать внимание, на то, что в машине переменного тока нас интересует действующее значение э. д. с., превышающее в каждом витке соответствующее среднее (при синусоидальном потоке) в 1,11 раз. Если указать, что $\frac{p}{\pi} = f$, то учащемуся станет ясно, что уравнения э. д. с. машин переменного и постоянного токов отличаются лишь тем, что первое дает действующее значение э. д. с., а не среднее.

2. При изложении двигателей постоянного тока роторный ток I определяют в зависимости от роторной э. д. с. E , пользуясь законом Ома: $I = \frac{U + E}{r}$ (где E имеет знак, противоположный U). Подчеркивается, что при возрастании момента нагрузки снижается скорость ротора n , его э. д. с. E , пропорциональная n , и в результате возрастает I .

В то же время при рассмотрении, например, асинхронных двигателей статорный ток I_1 определяют, исходя из условия постоянства н. с., помощью уравнения $I_1 = I_0 - I_2$ и роль статорной э. д. с. E_1 , единственной причины изменений I_1 (при $\dot{U}_1 = \text{const}$), остается для учащихся со-

вершенно невыявленной. Необходимо и для двигателей переменного тока рассматривать процессы в статорной цепи на основе закона Ома $I_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{E}}{Z_1}$, показывая, что, например, у асинхронного двигателя при возрастании момента нагрузки увеличивается s , а поэтому и I_2 ; возрастание н. с. ротора вызывает поворот векторов потока, а значит и \dot{E}_1 , по часовой стрелке, а также уменьшение длин этих векторов; в результате возрастает числитель приведенного выше закона Ома для статорной цепи и увеличивается I_1 . Аналогичные рассуждения следует проводить и при рассмотрении трансформаторов.

Таким образом, учащимся должна быть показана одинаковая роль э. д. с. у всех двигателей постоянного и переменного токов, а также у трансформаторов.

3. Вращающий момент асинхронного двигателя нередко выражают уравнением

$$M = \frac{4,44 k_2 f_1 \omega_2 m_2}{\Omega_1} \Phi I_2 \cos \phi_2,$$

а двигателя постоянного тока

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I.$$

Если учесть, что

$$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}, \quad f_1 = \frac{pn_1}{60} \quad \text{и} \quad N = 4\omega a,$$

то уравнения примут вид: $M = 0,707 p k_2 \omega_2 m_2 \Phi I_2 \cos \phi_2$ и $M = 0,637 p \omega \Phi I$. В таком виде и следует их приводить учащимся, отмечая, что первое уравнение отличается от второго лишь коэффициентом 1,11, множителями k_2 и m_2 , а также $\cos \phi_2$, учитывающим отклонение положения ротора асинхронного двигателя по отношению к результирующему вращающемуся магнитному потоку от оптимального.

Кандидат техн. наук, доц. Л. И. СТОЛОВ

¹ Если считать, что магнитная индукция и роторный ток асинхронного двигателя меняются по окружности ротора синусоидально.



Об экономическом критерии для городских кабельных сетей

И. С. Бессмертный в работе, опубликованной в № 10 журнала «Электричество» за 1951 г., привел убедительные доказательства целесообразности расчета электрических сетей по экономической плотности тока. Однако эти доказательства относятся только к воздушным коммунальным сетям, выполняемым алюминиевыми проводами. Совершенно иначе обстоит дело в отношении городских электросетей, выполняемых кабелями.

Прежде всего следует заметить, что до настоящего времени нет указаний о величинах экономической плотности тока для кабельных сетей низкого напряжения. Техническое управление МЭС должно в самое ближайшее время дополнить этот пробел.

Экономические плотности тока, рекомендованные Техническим управлением МЭС для кабелей 3, 6 и 10 кВ, несколько ниже плотностей тока по нагреву, допускаемых при прокладке кабелей в земле без учета коэффициентов прокладки. Но, как известно, городские кабельные сети выполняются по схемам с двусторонним питанием. Поэтому выбор сечений кабелей по экономической плотности может производиться лишь в том случае, если величины последней не превышают 0,5 максимально допустимых величин плотности тока по нагреву. При этом имеется в виду наиболее благоприятный случай, когда нагрузка принимается сосредоточенной в середине магистрали. Таким образом, при двустороннем питании и сосредоточенной нагрузке расчет по экономической плотности тока применим только к кабелям мелких сечений до 35 мм² при числе часов использования максимальной нагрузки до 3000.

В случае же двустороннего питания и распределенной нагрузки экономические плотности следует увеличивать в 1,73 раза против рекомендованных. Это означает, что ни один кабель не может быть рассчитан по экономической плотности и сечение магистралей будет всегда определяться допустимой нагрузкой по нагреву кабелей. К этому следует добавить, что согласно рекомендациям Технического управления МЭС применять для городских распределительных сетей кабели сечением менее 3 × 50 мм² не рекомендуется.

В городской электросети любой кабель обязательно будет пересекать улицы, т. е. на каких-то участках трасс он будет прокладываться в трубах. В связи с этим допустимая по нагреву нагрузка проложенных в земле кабелей снижается и допустимая по нагреву плотность тока становится ниже рекомендуемой экономической плотности тока, начиная с сечения 3 × 50 мм² и выше.

Из сказанного вытекает, что экономические плотности тока, рекомендованные Техническим управлением МЭС не могут служить в качестве экономического критерия при проектировании городских кабельных сетей. Необходимо или пересмотреть их или выработать какие-то иные показатели для оценки экономической целесообразности тех или иных проектов городских кабельных сетей. В противном случае по одному и тому же объекту могут приниматься самые разнообразные решения в зависимости точки зрения того или иного проектировщика.

*Инж. В. А. КОЗЛС
Кабельная сеть Ленэлектр.*



Хроника

Профессор П. А. Азбукин

К 70-летию со дня рождения

22 июня 1952 г. исполнилось 70 лет со дня рождения одного из крупнейших специалистов в области проводной связи заслуженного деятеля науки и техники, профессора Павла Андреевича Азбукина.

Окончив Орловское реальное училище, П. А. Азбукин поступил в Петербургский электротехнический институт на электрофизический факультет по специальности техника слабых токов. После окончания в 1908 г. института он был назначен механиком на службу в Главную телеграфную контору в Петербурге. В следующем году П. А. Азбукин начал преподавать телеграфию в Петербургском электротехническом институте. Тогда же в «Протоколах Телеграфно-телефонного технического общества» была опубликована первая научная работа П. А. Азбукина «Термоэлемент в применении к исследованию обстоятельств работы скоростействующих телеграфных аппаратов».

Помимо основной работы в Главной телеграфной конторе по обслуживанию телеграфных аппаратов и связей, П. А. Азбукин выполнял крупные работы по прокладке подземных телеграфных кабелей в Петербурге и подводных кабелей в Финском заливе, между Ораниенбаумом и Кронштадтом. В 1910 г. им была спроектирована и осуществлена первая в Европе машинная установка для непосредственного питания телеграфных аппаратов, которая позволила значительно облегчить работу аккумуляторных батарей в Главной телеграфной конторе. Доклад об этой установке был сделан в 1912 г. на VII электротехни-

ческом съезде в Москве и напечатан в трудах указанного съезда.

В 1911 г. П. А. Азбукин был назначен главным механиком Петербургского телеграфа, где им была создана первая в России телеграфная измерительная лаборатория. На спроектированной лабораторией искусственной телеграфной линии производились исследования с помощью осциллографа, исследовались новые телеграфные аппараты и проводились курсы по повышению квалификации транзакционных механиков. В связи с выполнявшимися линейно-кабельными работами П. А. Азбукиным были разработаны первые в то время приборы для отыскания трассы подземных и подводных кабелей связи. Они были применены при ремонте кабелей в Финском заливе и в Онежском озере.

В 1912 г. П. А. Азбукиным была спроектирована телеграфная магистраль в Петербурге, для которой впервые в Европе были применены кабели с воздушно-бумажной изоляцией. Кабели были проложены в чугунной канализации, благодаря чему они полностью были защищены от действия блуждающих токов электрических трамваев. Канализация эта существует до сих пор.

После Великой Октябрьской социалистической революции лаборатория П. А. Азбукина стала самостоятельным учреждением — Научно-исследовательской станцией НКПиТ, преобразованной позже в ЛОНИИС, в которой

течение ряда лет под руководством П. А. Азбукина выполнялись важные исследовательские работы, в частности: организации подтонального телеграфирования по телеграфным цепям Москва—Ленинград и Хабаровск—Владивосток, по введению в СССР зонного времени, по передаче Пулковской обсерватории международных сигналов времени и многие другие работы.

В 1926 г. Павел Андреевич Азбукин был утвержден профессором по кафедре электрических телеграфов в Электротехническом институте им. Ульянова. В 1929 г. Павел Андреевич был переведен в Москву в Центральную лабораторию связи на должность заведующего телеграфной секцией. В дальнейшем эта лаборатория была преобразована в Научно-исследовательский институт связи (НИИС), в котором под руководством П. А. Азбукина были произведены имеющие крупное значение работы, в частности, по разработке мер защиты телеграфных линий связи от помех магнитных бурь и от блуждающих токов электрических железных дорог и др.

В 1930 г. П. А. Азбукин преподавал курс защиты ли-

ний связи в МВТУ и в Институте связи им. Подбельского (МЭИС).

В 1937 г. П. А. Азбукин был утвержден доктором технических наук.

В 1941 г. Павел Андреевич был переведен в Томский электротехнический институт, где одновременно с педагогической работой он вел и научно-исследовательские работы. В 1942 г. Указом Верховного Совета СССР он был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Павлом Андреевичем написано и отредактировано около 40 литературных работ, в том числе первый в СССР трехтомный учебник «Воздушные и кабельные линии связи и их защита» (1940 г.), которым пользуются вузы связи до сих пор.

Отмечая выдающиеся работы П. А. Азбукина в день его семидесятилетия, электротехническая общественность уверена в дальнейшей успешной работе профессора П. А. Азбукина на благо Родины.

*Член - корр. АН СССР В. И. КОВАЛЕНКОВ
Ст. научный сотрудник ЦНИИС В. Н. КУЛЕШОВ*



Профессор И. Л. Каганов

К 50-летию со дня рождения

И. Л. Каганов родился 1 мая 1902 г. В 1925 г. он окончил электротехнический факультет Московского высшего технического училища. В том же году началась инженерная деятельность И. Л. Каганова сначала на Харьковском электромеханическом заводе, а затем в Электротягострое, где он участвовал в проектировании и монтаже тяговых подстанций Москвы и других городов.

Работая главным инженером по эксплуатации подстанции и электрооборудованию кинофабрики «Союзкино», И. Л. Каганов впервые применил для питания осветительных киноочных приборов металлические лампы выпрямители.

С 1933 г. научно-исследовательская деятельность И. Л. Каганова прошла в ВЭИ им. Ленина; с 1937 г. по 1940 г. он руководил лабораторией новых приборов ВЭИ. Первые работы И. Л. Каганова, выполненные в ВЭИ, посвящены исследованию схем образования тока; они были опубликованы в 1935—1936 гг. В течение 1935—1940 гг. им были выполнены важные теоретические и экспериментальные исследования процессов инвертирования постоянного тока в трехфазной цепи. Эти работы легли в основу докторской диссертации И. Л. Каганова. В 1940 г. была присуждена ученая степень доктора технических наук; в том же году он был утвержден в звании профессора.

В военные годы И. Л. Каганову с бригадой ВЭИ было поручено обеспечить безаварийную эксплуатацию ртутно-выпрямительных подстанций.

Под его руководством для этих станций был создан и применен в эксплуатацию оригинальный быстродействующий контактный регулятор тока. Там же были разработаны новые опытные образцы мощных одноанодных ртутных выпрямителей типа РМНВ-500/6.

В 1928—1929 гг. И. Л. Каганов опубликовал в журнале «Известия государственного электротехнического университета» результаты своих первых исследовательских работ, посвященных теории ртутных выпрямителей. С этого времени его деятельность неразрывно связана с новой, тогда



еще совсем молодой, областью техники — ионными приборами и преобразователями тока.

Педагогическая деятельность И. Л. Каганова началась в 1929 г. на кафедре электротехники Института им. Баумана. В 1930 г. И. Л. Каганов начал работать на кафедре Основ электротехники МЭИ им. Молотова; с 1931 г. по 1940 г. он был заместителем заведующего этой кафедрой. В 1943 г. на него возложено руководство в МЭИ кафедрой ионных приборов и преобразователей тока (кафедрой промышленной электроники).

И. Л. Кагановым создан ряд новых курсов: электронные и ионные приборы, теория работы преобразовательных систем, применение электроники в промышленности, импульсная техника, физические основы расчета ионных приборов. Большое значение для подготовки инженерных кадров имеет написанный им учебник «Электронные и ионные преобразователи». Первое издание этой широко известной ныне книги вышло в 1937 г., в 1940 г. вышло второе издание, а в 1950 г. вышел первый том третьего издания книги.

В последние годы И. Л. Каганов руководит разработкой новых типов полупроводниковых и диэлектрических зажигающих для инвертирования, новых систем инвертирования тока с высоким коэффициентом мощности для передачи электроэнергии на большое расстояние, новых систем инвертирования с высоким коэффициентом мощности и ионных преобразователей частоты.

И. Л. Каганову принадлежит 25 печатных работ по вопросам электроники, в том числе 5 книг.

И. Л. Каганов награжден орденами «Трудового Красного Знамени», «Красной Звезды», «Знак Почета» и медалями.

*В. В. Мешков, А. П. Иванов, В. А. Кириллин,
А. А. Глазунов, В. С. Пантюшин, Т. Л. Золотарев,
М. А. Бабиков, В. А. Фабрикант,
Г. М. Жданов, М. А. Перекалин, В. Г. Комар,
А. В. Талицкий.*



О ВЫБОРЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Электрификация тяги поездов наиболее действенно разрешает важнейшую народнохозяйственную задачу по освоению возрастающего из года в год размера перевозок и одновременно повышает технико-экономические показатели работы железнодорожного транспорта, в частности веса поездов и скорости их движения.

В настоящее время для электрической тяги на железных дорогах СССР применяется система постоянного тока при напряжении 3 300 в. Тяга на постоянном токе этого напряжения при всей своей эффективности по сравнению с паровой связана с рядом трудностей при эксплуатации мощных электровозов. Поэтому в последние годы Секция по научной разработке проблем транспорта Академии наук СССР совместно с другими научно-исследовательскими учреждениями, учебными заведениями, промышленностью и работниками железнодорожного транспорта провела как теоретические, так и экспериментальные работы по проблеме выбора перспективной системы электрической тяги на железных дорогах.

Установлено, что новая система тяги должна удовлетворять следующим требованиям: увеличению мощности электровоза в 2...3 раза, уменьшению затрат материалов (особенно цветных металлов) и денежных средств при проведении электрификации, обеспечению питания районных потребителей от устройств энергоснабжения электрической железной дороги, высокой эксплуатационной надежности работы железной дороги.

Анализ технико-экономических характеристик системы постоянного тока 3 300 в в свете этих требований показывает, что она не является перспективной, хотя и может после некоторого усовершенствования найти применение на отдельных железнодорожных участках.

Наиболее прогрессивной, как показали расчеты и исследования, является система однофазного тока нормальной частоты (50 гц).

К преимуществам ее относятся:

- 1) простота и надежность работы тяговых подстанций, являющихся только трансформаторными;
- 2) большие расстояния между тяговыми подстанциями (примерно в 2 раза больше, чем при постоянном токе 3 300 в);
- 3) объединение трансформаторов для питания тяговой и районной нагрузки, т. е. простое решение вопроса о снабжении энергией сельского хозяйства, местной промышленности и т. д.;
- 4) уменьшение потерь в контактной сети (при увеличении расстояния между подстанциями вдвое потери в сети уменьшаются в 3...4 раза по сравнению с постоянным током);
- 5) уменьшение сечения проводов и облегчение опор и фундаментов контактной сети;
- 6) возможность повысить мощность электровоза без увеличения капитальных затрат на 1 км линии при заданной ее грузонапряженности.

Система однофазного тока промышленной частоты требует защиты линий связи от влияния тяговых токов. Требуется откос линий связи и возможно их каблирование. Однако затраты на каблирование окупаются общим экономическим эффектом от применения мощных электровозов; само по себе каблирование является прогрессивным перевооружением линий связи и переводом их на более высокую ступень технического развития.

При однофазном токе нормальной частоты возможно применение электровозов различных систем. Исследование показывает, что наибольшего внимания заслуживают три варианта их выполнения:

- 1) электровоз с тяговыми двигателями постоянного тока с применением ионных преобразователей или двигатель-генераторов; последнее решение является более

сложным, но обеспечивает высокий коэффициент полезности;

- 2) электровоз с асинхронными многофазными двигателями с установкой на нем преобразователя числа и частоты тока;

- 3) электровоз с коллекторными однофазными двигателями нормальной частоты.

Мотор-вагонную тягу при токе промышленной частоты можно обеспечить или установкой ионных преобразователей и тяговых двигателей постоянного тока, или применением тяговых однофазных коллекторных двигателей 50 гц.

Для систем постоянного и однофазного токов в нормальной частоте расчеты привели к следующим технико-экономическим показателям:

	Постоянный ток 3 300 в	Однофазный ток 50 гц, 2
1. Расстояния между подстанциями, км	30...20	60...4
2. Сечение контактной сети в медном эквиваленте, мм ²	400...550	140
3. Результирующий к. п. д. от колес локомотива до шин высшего напряжения тяговой подстанции, %	71	75
4. Капитальные затраты (энергоснабжение, электровозы, тяговое хозяйство), %	130...190	100
5. Эксплуатационные расходы, %	106...112	100

В результате строительства крупнейших гидротехнических станций на Волге и на других реках и при стоящей широкой электрификации железных дорог преодоление технических трудностей и получение наиболее экономичного решения могут быть обеспечены только применением для электрической тяги системы однофазного тока нормальной частоты.

Для широкого внедрения этой системы следует провести еще ряд научно-исследовательских работ: проверить влияние однофазного тягового тока на линии проводов и беспроводной связи, исследовать асимметрию напряжений трехфазной системы и влияние асимметрии напряжений на электроснабжение районных потребителей и т.

(Известия Академии наук СССР, Отделение технических наук, стр. 334, № 3, 1952. П. К. Денисов и М. З. Ромашин)

ЭЛЕКТРОДОЛБЕЖНИК

Завод «Красный маяк» Министерства строительства дорожного машиностроения начал серийный выпуск легкого электродолбежника по дереву типа И-104, предназначенного для выборки пазов под петли в дверных и оконных блоках, а также для выборки гнезд и пазов малого размера в различных изделиях. Размеры пазов по площади 6×40 и 8×40 мм, а длина не ограничена и зависит от величины передвижения электродолбежника. Намечено производство приспособлений для возможности использования электродолбежника на других операциях, как, например, выемка гнезд под дверные замки и т. д. Электродолбежник может быть использован как ручной инструмент так как имеет вес всего 7 кг (без приспособлений) и имеет баритные размеры $241 \times 243 \times 419$ мм, и как полустационарный станок, будучи закреплен на верстаке для обработки мелких деталей.

Электродолбежник снабжен коллекторным универсальным электродвигателем мощностью 0,450 квт, работающим от сети переменного или постоянного тока напряжением

27 или 220 в. Пуск и остановка электродвигателя производится двухполюсным выключателем куркового типа с вилкой, фиксирующей включенное положение. Скорость вращения электродвигателя 8 500 об/мин, шпинделя 770 об/мин. Скорость резания 5,8 м/сек. Скорость подачи при долблении дуба поперек волокон 0,5 см/сек, вдоль волокон 0,28 см/сек. Для сосны цифры будут соответственно 0 и 0,85 см/сек. Скорость подачи по приспособлению вдоль оловок сосны 0,75 см/сек.

Использование электродолбежника увеличивает производительность труда и улучшает качество работы.

Механизация строительства, стр. 30, № 3, 1952. В. Н. Бармаш)

ЭЛЕКТРОТРАМБОВКА

Государственный опытный завод Министерства строительного и дорожного машиностроения изготовил по проекту конструкторов ГСКБ А. Ф. Разгуляева и Н. В. Юраш образцы электротрамбовок марки Д-253. Испытания в производственных условиях дали хорошие результаты, и механизм принят в серийное производство.

Электротрамбовка Д-253 назначается для механизации работ по уплотнению грунта в стесненных условиях, как, например, при установке опор линий высоковольтных передач, при дорожных, водопроводных, канализационных и других работах.

Питание электрической энергией может осуществляться как от местных сетей, так и от подвижных электрических станций при напряжении 220 в. Мощность электродвигателя трамбовки — 1 квт. Число ударов рабочего органа 9...530 в минуту, размах колебаний 28...33 мм, площадь сменного рабочего органа 0,07...0,09 м². Электротрамбовка представляет собой компактную машину весом 1 т и габаритными размерами 625 × 450 × 924 мм. Для удобства эксплуатации передвижение на небольшие расстояния в пределах рабочей зоны может осуществляться и помощи специального двухколесного лафета, которым абжается электротрамбовка.

Производительность электротрамбовки 8...10 м³/час, максимальная глубина уплотнения 40 см. Хотя при нормальной работе электротрамбовка должна находиться в вертикальном положении, но в отдельных случаях, связанных с характером рабочего процесса, допускается наклон в любую сторону от вертикальной оси на 10...15°.

В статье приводится подробное описание механической части аппарата.

(Механизация строительства, стр. 29, № 3, 1952. В. Н. Денисов и П. Т. Трубников)

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА АВТОМОБИЛЕ

Научно-исследовательский институт автоприборостроения установил зависимость срока службы аккумуляторных батарей, применяемых на автомобилях, от следующих условий: 1) соответствия температур, при которых работает батарея на автомобиле, температурам, наиболее благоприятным для аккумулятора, как химического источника тока; 2) соответствия регулируемого напряжения, поддерживаемого реле-регулятором, температурам аккумулятора, постоянства напряжения реле-регулятора; 3) тщательности наблюдения и ухода за аккумуляторной батареей и реле-регулятором в процессе эксплуатации автомобиля.

Произведя оценку существующих способов установки аккумуляторных батарей на автомобилях и исходя из анализа условий нормальной работы их, в статье указаны следующие требования, которые необходимо предъявить к установке и работе аккумуляторных батарей и реле-регулятора, чтобы максимально повысить срок службы и надежность их работы.

1. Аккумуляторные батареи должны устанавливаться в таком месте и таким образом, чтобы температура электролита изменялась в возможно более узких пределах (от -15 до +30° при изменении температуры окружающего воздуха от -40 до +30°).

2. При стоянке автомобиля в течение 6...8 час в условиях температур окружающего воздуха от -10 до -20° температура электролита не должна снижаться ниже +5°.

3. Во время длительных стоянок автомобиля при низких температурах температура аккумулятора может достигнуть температуры окружающей среды. В этом случае при движении автомобиля должна быть обеспечена возможность прогрева аккумулятора до его рабочих температур.

4. Аккумулятор следует устанавливать таким образом, чтобы иметь возможность удобного и быстрого его обслуживания и контроля. Доливка электролита и проверка его плотности, очистка зажимов и пробок должны отнимать минимум времени и производиться без снятия аккумуляторной батареи или освобождения ее креплений.

5. Крепление аккумулятора должно обеспечивать амортизацию и быть надежным. Крепящие элементы должны равномерно давить на корпус аккумулятора, не создавая местных напряжений.

6. Регулятор напряжения должен обеспечивать работу без разрегулировки за пробег автомобиля 10 000 км, что соответствует примерно 250...300 час его работы. Допустимая разрегулировка за этот период может быть не более ±0,15 в от номинального регулируемого напряжения.

7. Пределы регулировки регулятора напряжения должны соответствовать температурным условиям работы аккумулятора на автомобиле.

8. Регулятор напряжения должен иметь температурную компенсацию по температуре окружающей среды. Изменение регулируемого напряжения на 1° изменения температуры окружающей среды должно составлять 0,044...0,046 в для систем электрооборудования на 12 в, что соответствует температурной характеристике конечного зарядного напряжения аккумулятора.

9. Реле-регулятор следует устанавливать на автомобиле таким образом, чтобы температурные условия для него и аккумулятора были максимально близки.

10. Чтобы иметь возможность контролировать процесс заряда — разряда аккумулятора, амперметр щитка должен иметь достаточную точность и четкую шкалу, обеспечивающую возможность контроля токов 1...2 а.

В НИИ Автоприборов было разработано несколько опытных конструкций установки аккумуляторов на автомобиле с учетом этих требований, которые и указываются в статье с приведением результатов испытаний.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 2, 1952. Ю. И. Боровских)

ЗА РУБЕЖОМ

ИНВЕРТОРНАЯ УСТАНОВКА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

На центральной железной дороге Бразилии электрифицирована по системе постоянного тока 3 000 в линия Рио-де-Жанейро — Вольта-Редонда (140 км), включающая участок длиной 25 км с уклоном в среднем 16,5%. Примерно в середине этого участка сооружена тяговая подстанция с инверторной установкой. Подстанция оборудована тремя шестианодными откачиваемыми ртутными выпрямителями с сетками длительной мощностью при 3 000 в, 2 000 квт каждый и одним инвертором длительной мощностью 1 800 квт при 3 000 в.

Каждый выпрямитель питается от отдельного трансформатора мощностью 2 360 квт. Мощность трансформатора инвертора 3 660 квт. Такая величина обусловлена низким коэффициентом мощности инвертора при перегрузках и пониженном напряжении в трехфазной сети.

Перегрузочная способность каждого агрегата составляет: 150% в течение 2 час и 300% в течение 5 мин.

Схема подстанции представлена на рис. 1. Сглаживающее устройство устраняет 6, 12 и 18-ю гармоники.

Для более надежной работы подвижного состава в режиме рекуперации напряжение на подстанции должно регулироваться в узких пределах. Сеточное регулирование лучше всего обеспечивается пик-трансформаторами.

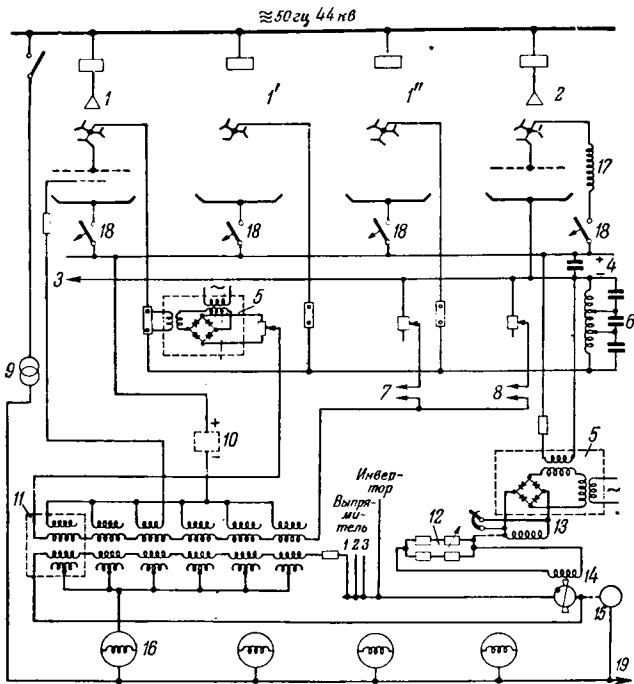


Рис. 1. Схема подстанции.

1, 1' и 1''—выпрямители; 2—инвертор; 3—к ходовым рельсам; 4—шины выпрямленного тока; 5—магнитный усилитель; 6—сглаживающее устройство; 7—к фазорегулятору № 2; 8—к фазорегулятору № 3; 9—трансформатор собственных нужд 75 кВа; 10—источник постоянного смещения; 11—пик-трансформатор; 12—источник постоянного тока; 13—специальный регулятор; 14—электромашинный усилитель; 15—двигатель электромашинного усилителя; 16—фазорегулятор; 17—реактор без стали; 18—быстродействующие выключатели; 19—к собственным нуждам выпрямителей.

применение которых устраняет влияние искажения напряжения на момент зажигания сетки. Кроме того, добавлением на сердечнике пик-трансформатора обмотки постоянного тока (подмагничиванием) и регулированием тока в этой обмотке можно изменять смещение на сетке.

Для каждого выпрямителя применен отдельный комплект пик-трансформаторов. Отрицательное смещение на сетку подается от полупроводникового выпрямителя. Пик-трансформатор выпрямителя имеет две подмагничивающие обмотки: одна используется для регулирования напряжения подстанции, вторая—для выравнивания нагрузки между выпрямителями.

Первая обмотка возбуждается от электромашинного усилителя, поле которого управляется специальным регулятором, реагирующим на напряжение выпрямленного тока. Цепь последнего связана с регулятором через магнитный усилитель, одновременно изолирующий регулирующее устройство от шин 3 000 в выпрямленного тока.

Сетка инвертора возбуждается от комплекта пик-трансформаторов; каждый из них имеет одну подмагничивающую обмотку, которая также питается от электромашинного усилителя. Сеточные трансформаторы выпрямителей и инверторы подсоединены к сети питания через четыре фазорегулятора, что позволяет независимо регулировать смещение на сетке при отсутствии нагрузки.

На рис. 2 представлены кривые регулирования выпрямителей и инвертора. Углом запаса на этой диаграмме назван угол $\delta = \beta - \gamma$ (β — угол опережения, γ — угол коммутации).

Неравномерность распределения нагрузки между выпрямителями компенсируется уравнительным проводом.

В цепи каждого выпрямителя включен шунт 100 мв, к которому присоединен магнитный усилитель, подающий в уравнительный провод потенциал, пропорциональный нагрузке выпрямителя.

Характер изменений напряжения на шинах подстанции показан на рис. 3. В пределах номинальных нагрузок напряжение достаточно постоянно, при перегрузках оно падает. В выпрямительном режиме оно также падает при большом понижении напряжения трехфазного тока.

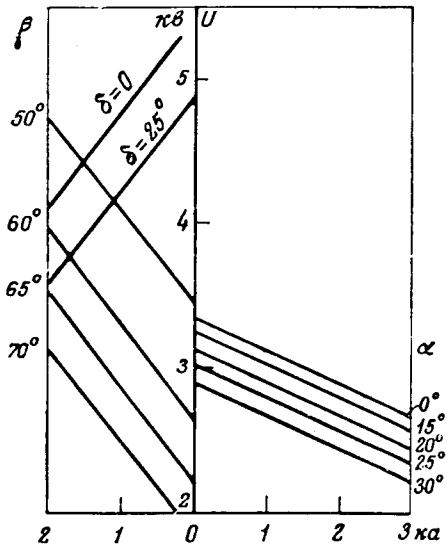
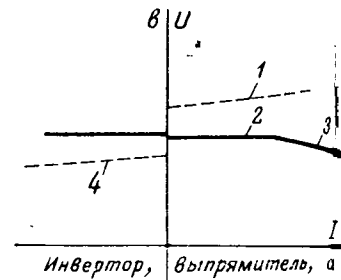


Рис. 2. Регулировочные кривые инвертора и выпрямителей.

β —угол опережения инвертора; δ —угол запаса; α —угол запаздывания выпрямителя; U —напряжение выпрямленного тока.

Рис. 3. Нагрузочная характеристика подстанции.

1—напряжение инвертора при работе выпрямителей; 2—напряжение в пределах регулирования; 3—напряжение выпрямленного тока за пределами регулирования; 4—напряжение выпрямителей при работе инвертора.



При отсутствии нагрузки разность напряжений меж выпрямителем и инвертором велика. Уравнительный т в этом случае снижается введением в цепь инвертq реактора. При отсутствии нагрузки уравнильный т может быть снижен повышением напряжения инвертq.

При наличии нагрузки разность напряжений в оц деленном небольшом интервале поддерживается автомa чески регулятором, коэффициент усиления которого ф лее 50.

Применение рекуперативного торможения на эц участке согласно расчетным данным даст около 60% э номии электроэнергии.

(A. Schmidt, Transactions AIEE, стр. 1092, т. 70, ч. 1, 1948)

Инж. Л. А. ВИСЛОУ

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКИХ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИИ ПУТЕМ ЗАРЯДКИ КАПЕЛЕК РТУТИ

Получение высоких постоянных напряжений осуществимо на основе следующего принципа. Мелкие капелл ртуту электрически заряжаются. При объединении нескa ких капелек поверхность уменьшается и, таким обраz, напряжение образовавшейся ртутной капли большего дe метра возрастает.

На рисунке изображено принципиальное устройств установки. Ртуть подается насосом 1 в верхний резервуар 2, расположенный в вакуумированном сосуде 3. Резервуар 2 имеет сетчатое дно, через которое протекал ртуть, падая в виде мелких капелек на сетку 4, где ртутные капельки заряжаются. Заряженные капельки 5 падаю

зеркало ртути 6 в железном электроде 7, где они объединяются. Благодаря уменьшению поверхности при объединении капелек ртути возрастает напряжение. Из внутреннего пространства электрода 7 незаряженная ртуть из стекляннй трубки 8 снова поступает в насос 1. В основе описанной установки лежат следующие соображения. Если шарик с радиусом ρ , емкость которого равна $\epsilon_r \cdot 4\pi \cdot 1,11 \cdot 10^{-12} \phi$, зарядить напряжением e_p в, то заряд шарика будет $q_p = e_p \rho \cdot 4\pi \cdot 1,11 \cdot 10^{-12} \kappa$. При объединении n шариков с радиусом ρ в один шар радиус последнего лет $r = \rho \sqrt[3]{n}$, причем заряд его составит $q_r = n \cdot q_p$. Емкость большого шара будет $C_r = \rho \cdot \sqrt[3]{n} \cdot 4\pi \cdot 1,11 \cdot 10^{-12} \kappa$, а напряжение на нем $e_r = \frac{q_r}{C_r} = \left(\frac{r}{\rho}\right)^2 e_p$ в. Количество электричества на шаре с радиусом r будет:

$$q_r = \frac{r^3}{\rho^2} \cdot 1,11 \cdot 10^{-12} \kappa.$$

Таким образом, кратность возрастания напряжения получается:

$$S = \frac{e_r}{e_p} = \left(\frac{r}{\rho}\right)^2.$$

Если, например, 1 см^3 ртути разбить на $2,4 \cdot 10^5$ шариков с радиусом $\rho = 0,01 \text{ см}$ и зарядить их напряжением 1 в, то заряд всех этих шариков составит $5,8 \cdot 10^{-7} \kappa$. При объединении этих капелек в одну каплю объемом 1 см^3 и радиусом 0,62 см напряжение на ней будет:

$$E = 220 \left(\frac{0,62}{0,01}\right)^2 = 8,5 \cdot 10^5 \text{ в.}$$

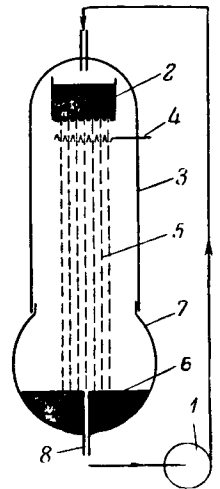
Высота, с которой заряженные капельки ртути падают на зеркало ртути, в нижнем электроде должна быть не менее определенной величины с тем, чтобы капельки могли достигнуть зеркала, несмотря на испытываемое ими отталкивающее усилие. Для уменьшения необходимой высоты падения капелек целесообразно рассчитывать не на свое их падение из верхнего резервуара, а подавать

ртуть сверху вниз через мелкие отверстия под большим давлением. Помимо перечисленных необходимо учитывать еще ряд дополнительных условий, как то: расширение по мере приближения к зеркалу площади дождя ртутных капелек в результате их взаимного отталкивания, уменьшение изоляционного расстояния между верхним и нижним электродами вследствие того, что часть промежутка между ними заполнена ртутными капельками, и др. С учетом всех обстоятельств получаются следующие данные, которые могут быть положены в основу практической установки мощностью 3 квт с объемом ртути, ежесекундно проходящим через поперечное сечение $V = 585 \text{ см}^3/\text{сек}$, или весом $G = 8000 \text{ г/сек}$.

Ртуть разбрызгивается под давлением 95 ат через 10^4 отверстий с расстоянием между ними 0,53 см. При этом ежесекундно образуется $7,9 \cdot 10^7$ капелек ртути радиусом $\rho = 1,21 \times 10^{-2} \text{ см}$, заряжаемых напряжением 220 в и несущих каждая заряд $q_p = 3,8 \cdot 10^{-11} \kappa$. Высота падения капелек $h = 400 \text{ см}$, соответственно изоляционное расстояние между верхним и нижним электродами составит 360 см. Начальная скорость капелек 3760 см/сек, конечная скорость в момент падения на зеркало 2650 см/сек, время падения 0,125 сек. Расстояние между капельками вблизи выходных отверстий 0,48 см. С учетом расширения площади ртутного дождя зеркало ртути в нижнем электроде должно быть не менее $94 \times 94 \text{ см}$, к. п. д. установки $\eta = 0,5$.

(А. Dobrowsky. Е. и. М., т. 68, № 24, стр. 577, 1951)

Инж. А. Г. КРАЙЗ



Принципиальное устройство установки для получения высоких постоянных напряжений путем зарядки капелек ртути.



Библиография

Е. ЕФРОЙМОВИЧ и В. И. ФЕЙГИН. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДУГОВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ. 236 стр., ц. 12 руб. 80 коп. Металлургиздат, 1951.

В аннотации, помещенной в книге, указано, что она предназначена для инженеров и техников-электриков, для конструкторов-наладчиков и инженеров заводских лабораторий, занимающихся электрическими режимами и автоматизацией дуговых печей, а также для инженеров-технологов и студентов высших учебных заведений, специализирующихся по электротермическому оборудованию и электротехнологии.

В книге освещены: 1) основы теории регулирования дуговых печей; 2) описание существующих схем и конструкций регуляторов и их параметров; 3) анализ схем, сравнение, выбор оптимальных регуляторов; 4) вопросы наладки и эксплуатации регуляторов. Кроме того, подробно разобраны электрические характеристики дуговых печей.

В главе I дана краткая характеристика печи как объекта регулирования и охарактеризован механизм перемещения электродов в сталеплавильных и руднотермических печах. В главе II собраны основные современные данные о мощном дуговом разряде переменного тока.

Глава III посвящена электрическим характеристикам дуговых печей. Эта глава недостаточно связана с остальным содержанием книги и представляет собой выдержку из работ одного из авторов по расчету электрических

характеристик и режима печей с учетом вызываемой дугой несинусоидальности. Кроме того, в ней даны рекомендации по определению оптимального электрического режима работы сталеплавильной печи для периода расплавления.

В главе IV дана классификация регуляторов мощности дуговых печей и сформулированы современные требования к ним. В главе V, названной авторами «Характеристика регулируемого объекта», даны принятые основные допущения, определения таких понятий, как зона нечувствительности, коэффициент нечувствительности, коэффициент усиления, выведены характеризующие их выражения и проведен их анализ, а также показано влияние колебаний напряжения сети на режим регулирования. В главах VI и VII дано описание элементов различных типов регуляторов — релейно-контакторных и с электромашиными усилителями, статические и динамические их характеристики, анализ влияния обратной связи и регулирования по производной от тока печи. В главах VIII, IX и XI описаны схемы и работа основных типов релейно-контакторных и релейно-машинных регуляторов, регуляторов с электромашиными усилителями и электронного регулятора. Кроме того, в главе IX рассмотрены показатели работы различных типов регуляторов и дано их срав-

нение. В главе X даны некоторые краткие соображения по регуляторам для руднотермических печей и одна из схем таких регуляторов.

Глава XII посвящена наладке и эксплуатации регуляторов. В ней даны инструкции по наладке релейно-контакторного регулятора ЦЛА и регулятора Центропром-электропечи с электромашинным усилителем, а также правила их эксплуатации и выбор и настройка максимальной токовой защиты.

В целом можно признать, что авторы удовлетворительно справились с поставленной перед собой задачей. Являясь специалистами в области регулирования режима дуговых электропечей, они сумели насытить книгу богатым фактическим материалом, накопленным ими в течение многолетних испытаний работающих печей и регуляторов. Наиболее удачными следует признать главы VI, VII, VIII и IX.

Широкое использование графического изображения проходящих в регуляторах процессов позволило авторам наглядно и доходчиво изложить такой материал, как статические характеристики реле, действие обратной связи, принцип действия, статические и динамические характеристики регуляторов с электромашинными усилителями и работа релейно-электромашинных регуляторов. Весьма полезным является § 7 главы IX «Показатели работы регуляторов различных типов», где дана сводная таблица работы различных регуляторов, наглядно характеризующая их преимущества и недостатки.

Глава X «Регуляторы для руднотермических печей непрерывного действия» не может быть признана достаточно полной. В ней дано описание лишь одного типа регулятора, не рассмотрен вопрос о целесообразности применения на этих печах дифференциальных регуляторов, рекомендации по выбору типа регулятора для этих печей недостаточно четки и не обоснованы рациональными доводами.

Главы IV и V чрезмерно сжаты, ряд довольно сложных выражений приведен без вывода [например, выражения (65), (66), (73), (87) и др.]: изложение ненаглядно и трудно доступно. Эти главы при переиздании книги необходимо переработать, расширив их и обратив особое внимание на освещение физической сущности рассматриваемых явлений и на упрощение трактовки.

Глава III также характерна крайней сжатостью, в результате которой страдает ее доходчивость. В этой главе также есть формулы [(45) и (47)—(49)], данные без вывода.

Недостатком книги является полное отсутствие в ней описания и анализа работы автоматических регуляторов мощности печей с гидравлическим приводом. Кроме того, в главе о регуляторах для руднотермических печей следовало бы привести применявшиеся у нас на действующих печах старые регуляторы на переменном токе.

В главе XII «Наладка и эксплуатация регуляторов» следовало бы дать также соответствующие указания по еще весьма распространенным в СССР регуляторам ХЭМЗ и релейно-машинным регуляторам.

Некоторые принятые в книге обозначения и нумерация громоздки и ненаглядны: $U_{грп}$, $U_{грс}$ — напряжение питания в сторону подъема или спуска; $W_{ми}$ — полезная тепло на расплавление и перегрев 1 т стали и шлака разующих и т. д. В книге имеются неоговоренные опечатки.

Из мелких дефектов можно назвать следующие:

1. Неоднократное применение терминов, не полученных всеобщего признания, стр. 11, рис. 2, стр. 152 и др. «регенеративный электромашинный регулятор», стр. 10 «реактивный усилитель»; стр. 37 термин «нагрузочные характеристики печи»; термин «регуляторы с двумя ступенями усиления» на стр. 156 не точен, так как упомянутый «регенеративный регулятор» и регулятор, предложенный Лукашенко, также имеют 2 ступени усиления.

2. На рис. 16, стр. 38 нижняя часть диаграммы имеет отношения к содержанию данного раздела. Часть диаграммы следовало перенести на стр. 58, где рассматриваются эти характеристики.

3. На стр. 26 в формуле (5) \dot{H} и \dot{i} следует дать векторное обозначение.

4. На стр. 74 и 75 в разделе «Современные требования к автоматическим регуляторам» некоторые требования выдвигаются без обоснования. Например, такие: г) при переходного процесса... не должно превышать 0,5 с д) ... допускается только одно перерегулирование.

5. На стр. 84 непонятна оговорка «Если регулятор правильно спроектирован, то он будет поддерживать номинальный ток печи». Здесь же, в следующем абзаце встречается некорректное выражение:

«... на входе обмотки В должно быть приложено напряжение E_n »; следовало написать: «... должно быть приложено напряжение постоянного тока пропорциональное напряжению на дуге».

6. На стр. 89 в § 7 не оговаривается, что требование поддержания постоянной мощности при колебаниях напряжения сети может повлечь ухудшение работы всей системы, так как падение напряжения в сети обычно является следствием перегрузки системы, а поддержание мощности печи при падении напряжения потребует большего тока, т. е. приведет к еще большему падению напряжения в сети.

Рецензируемая книга восполняет в значительной степени недостаток литературы по автоматическому регулированию дуговых печей и, несомненно, принесет значительную пользу работникам нашей промышленности. Ограниченный тираж книги заставляет высказывать пожелание, чтобы уже в ближайшее время издательство позаботилось о ее переиздании.

В случае переиздания книги следует пожелать, чтобы авторы учли сделанные замечания — дополнили свой труд в соответствии с высказанными пожеланиями и сделали более наглядными и доступными теоретические главы книги.

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. СВЕЧАНСКИЙ
Кандидат техн. наук А. М. ВАЙНБЕРГ

М. А. ШИЛОСОВ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. РЕМОНТ И ИСПЫТАНИЕ. 296 стр., ц. 13 руб. 40 коп. Машгиз, 1951.

Участки электрических измерений и ремонта приборов являются основными ячейками в каждой электролаборатории. В некоторых отраслях промышленности (электролизные установки) широко использование методов электрических измерений непосредственно в цехах, массовое применение электроизмерительных приборов (вольтметров, счетчиков вольтчасов), контролирующих технологический процесс, вызвали к жизни новые, повышенные требования к качеству ремонта и организации ремонтной службы в заводских лабораториях.

Несмотря на сравнительное обилие литературы по электротехнике и конструкциям электроизмерительных приборов, изданной за последние 10—15 лет, вопросам ремонта аппаратуры не уделялось достаточного внимания. Огромный опыт, накопившийся в наших отраслевых и заводских ла-

бораториях в области ремонта и восстановления электроизмерительных приборов, еще не нашел соответствующего обобщения и отражения в специальной литературе. Вопросы организации заводских электролабораторий пока слабо освещены в литературе. Рецензируемая книга, рассчитанная в основном на квалифицированного мастера и лаборанта, призвана в известной степени восполнить указанные пробелы и, как отмечает автор в своем предисловии, «должна послужить работникам лабораторий практическим руководством по ремонту широко распространенных приборов по созданию проверочных и испытательных установок».

Книга содержит тринадцать глав, разбитых на неравных по объему, раздела: Ремонт электроизмерительных приборов (9 глав) и Испытательные установки (4

). Предметом изложения являются преимущественно сборки магнитоэлектрической, электромагнитной и индукционной систем.

Серьезный недостаток книги заключается в том, что автор не сумел выдержать до конца единства замысла. Ни еще можно согласиться с целесообразностью приведения в книге, посвященной ремонту приборов, описания неизвестных схем и установок для их проверки и регулировки, то главы, в которых излагаются некоторые испытательные установки высокого напряжения, выпадают рамки книги. Неоправданным вкраплением является же вся IX глава, где весьма поверхностно рассматривается такой важный и специальный вопрос, как релейная защита. При таком построении книги читателю не дано вчетвертое представление об обширной области критических испытаний (машин, кабелей, релейной защиты и т. п.). Объем книги использован автором, по сути, в ущерб основной теме.

В первых двух главах книги автор приводит соображения об организации ремонтной службы в электростанционном хозяйстве, излагает общие понятия об основных типах приборов и их неисправностях. В следующих главах с достаточной полнотой описываются характерные неисправности приборов и приведены содержательные практические сведения о методике определения неисправностей их ликвидации. Ценным является рекомендация проведения навыков при выполнении большинства операций по ремонту. Много места уделено столь часто встречающимся в практике лабораторий переделкам приборов. В помощь читателю приводятся образцы расчетных формул и чистые примеры. Попутно автор описывает ряд мелких, рекомендовавших себя приспособлений и устройств, а же рецептов, облегчающих труд мастера, лаборанта.

В ущерб автору можно поставить ненужные повторения некоторых общих понятий. Так, например, о порядке пуска лаборанта для проверки прибора в схеме на месте авторки говорится на стр. 66, 128, 143 и 169, причем не подчеркивается необходимость особой предосторожности при производстве работ в находящихся под нагрузкой токовых цепях вторичной коммутации; о сущности

градуировки упоминается на стр. 48 и 88 и т. д. Было бы гораздо целесообразнее дать более систематический свод общих понятий во вступительных главах и не возвращаться к ним в дальнейшем изложении.

Грубой ошибкой является смешение понятий «поверка» и «проверка». Известно, что под поверкой измерительного прибора подразумевается сличение его показаний с показаниями образцового прибора и определение погрешностей. Проверка же прибора объемлет все виды контроля и осмотра прибора. Во время проверки убеждаются в целостности измерительного механизма, в правильной установке стрелки на нуль, контролируют балансировку и т. д. Между тем автор на протяжении всей книги наравне с указанным применением слова «проверка» употребляет его и для обозначения процесса поверки, что, конечно, недопустимо.

Второй раздел книги целиком посвящен описанию и методам работы с получившими наибольшее распространение в заводских лабораториях высоковольтными испытательными установками. Здесь читатель найдет много полезных советов и указаний по пользованию кенотронным аппаратом в различных схемах его, по работе с маслопробойником, установкой для испытания защитных средств и т. п. Но, как уже отмечалось выше, материал этого раздела, кроме стр. 290—292, касающихся устройства для испытания прочности изоляции приборов, не имеет отношения к ремонту электроизмерительных приборов.

В литературном отношении рецензируемая книга оставляет желать много лучшего, что в значительной степени надо приписать неудовлетворительной редакционной подготовке данной книги.

Изложение страдает шероховатостью и неточностью. В виде примера можно привести следующие, отнюдь не единичные, выражения: «при токе токовой цепи» (стр. 141); «замеряют напряжение» (стр. 128). Не совсем правильно ось счетчика называть валом (стр. 147) или утверждать, что алюминий ржавеет (стр. 32), и т. д.

Резюмируя, можно сказать, что книга недоработана.

Инж. Г. К. ЦВЕРАВА
Бокситогорск

О ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЕ ПО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОМУ ОСВЕЩЕНИЮ

Существующая информация и техническая литература люминесцентному освещению недостаточны. Если не брать довольно многочисленных статей в журналах, посвященных главным образом вопросам физики ламп и методам расчета светильников, техническая литература в этой области весьма ограничена. Рассмотрим две книги: Б. И. Оганского «Люминесцентное освещение зданий», Гостехиздат, 1950 и С. Н. Оранского «Люминесцентное освещение производственных помещений», Гостехиздат Уфы, 1951.

Обе книги, одинаковые по объему и характеру, содержат почти один и тот же материал и, к сожалению, обладают существенными и также сходными недостатками. По сути эти книги служат одним из главных источников информации по устройству люминесцентного освещения, представляет интерес рассмотреть, как изложены в них основные вопросы этой темы.

Физические основы устройства люминесцентной лампы в книге Луговского не рассмотрены, а в книге Оранского рассмотрены хотя и пространно (16 страниц), но недостаточно и точно. Так, говоря о люминофорах, автор утверждает, что с их помощью удается в значительной степени достичь экономичность ламп (стр. 11). Главная же сущность люминофора как светового трансформатора и люминесцентной лампы, как принципиально нового источника света четко не изложена. Прекрасный пример популярного, сжатого и строго научного изложения физики люминесцентных ламп, показанный С. И. Вавиловым в его популярных работах, не нашел ни продолжения, ни использования ни в той, ни в другой из рассматриваемых книг. Нельзя признать удачным и описание Оранским устройства люминесцентной лампы. Исходное определение, что люминесцентная лампа является газосветной ртутной

лампой низкого давления» (стр. 12), неточно, а утверждение, что «чем больше площадь люминесцентной лампы, тем больше ее световой поток», также слишком схематично решает вопрос об экономичности лампы как функции ее размеров. Большинство формулировок этой главы весьма неточно, а некоторые фразы искажают мысль, в них заложенную. Например: «малая яркость люминесцентных ламп тем и опасна, что ее обычно не замечают».

Аналогичный раздел у Б. И. Луговского также изложен не вполне удовлетворительно. Начнем с того, что приведенное изображение люминесцентной лампы относится к какому-то кустарному образцу и только отдаленно напоминает внешний вид современной лампы (рис. 1-3). В определении «Люминесцентные лампы низкого напряжения с подогревными (следует писать «подогревными»).— Н. В.) электродами являются электроразрядными ртутными лампами дугового разряда, использующими свечение положительного столба» (стр. 16) есть все, кроме упоминания об основной особенности люминесцентной лампы, — преобразования невидимого излучения в свет. Неверно даны и цветовые характеристики люминесцентных ламп (стр. 27—28). Лампы БС вопреки утверждению автора далеки по спектральному составу от ламп накаливания, а лампы ТБ не могут характеризоваться цветовой температурой, так как их излучение по своему спектру слишком отлично от излучения абсолютно черного тела. На стр. 28 имеется указание, что излучение ламп ДС приближается к естественному свету от северной части небосвода, а на стр. 32 утверждается, что спектр лампы ДС близок к спектру солнца. Между тем разница в цветовых температурах неба и солнца составляет порядка 10 000° К. Оранский (стр. 33) также пишет: «Лампы ДС дают свет, по цветности близкий к свету полуденного солнца, однако с не-

сколько меньшим количеством красных лучей и значительно большим количеством синих. Свет этих ламп придает человеческим лицам неестественную окраску». Оба утверждения, содержащиеся в этой фразе, конечно, неверны.

Читатель неправильно ориентируется на массовое применение ламп ТБ (Луговской, стр. 33) для освещения общественных зданий. В действительности вопрос о применении ламп ТБ весьма дискусионен, что следовало бы указать, отметив, что их следует применять в основном тогда, когда нужно подчеркнуть пурпурные тона или нейтрализовать зеленые.

Оба автора недостаточно освещают явления стробоскопии и связанное с ним утомление зрения и не приводят наглядного графического пояснения уменьшения этого явления при различных способах борьбы с ним. Этот вопрос очень существенен, так как опыт показал, что в практической работе ему уделяется мало внимания и многие установки являются неудовлетворительными именно по этому признаку.

Главы о светильниках изложены неудачно у обоих авторов. Так, стр. 57 у Луговского и рис. 23, 24 и 25 у Оранского отведены изображению светильников, у нас не применяемых. Рисунок люстры, приводимой Луговским, как пример, на стр. 59, противоречит художественным соображениям, а комбинация шара с лампой накаливания и люминесцентных ламп противоречит светотехническим требованиям. Ни один из авторов не приводит данных об отечественных весьма удачных конструкциях светильников Текстильпроекта, применяемых в легкой промышленности; также незаслуженно забыты и светильники с рассеивающей решеткой.

Методика расчета, приводимая в обеих книгах В. В. Мешкову, в настоящее время не может считаться достаточно простой и наиболее удобной. Опыт пока что способ расчета, изложенный в статье Г. М. Кисор (Электричество, № 4, 1951), имеет существенные преимущества. В книге Оранского, вышедшей в 1951 г., не было бы привести дополнительно хотя бы подстроку ссылку на этот метод.

Таким образом, следует сделать вывод, что рассмотренные две книги, хотя и дают общее представление о просе, которому они посвящены, не могут считаться удовлетворительными по качеству изложенного в них материала. В особенности это относится к книге Оранского вышедшей позднее. Автор имел полную возможность учесть недостатки книги Луговского и привести ряд новых материалов, не попавших в книгу последнего, изданную ранее. Это обстоятельство свидетельствует о том, что данию литературы по люминесцентному освещению уделяется недостаточно внимания, а она совершенно недолго сейчас как специалистам, так и работникам промышленности, архитекторам и другим лицам, которые, не имея специальных знаний в этой области, используют люминесцентные лампы для тех или иных целей. Было бы весьма целесообразно организовать публикацию статей по люминесцентному освещению в отраслевых промышленных архитектурных журналах, а Госэнергоиздату следовало осуществить издание серии книг, посвященных ряду специальных вопросов из этой области.

Кандидат техн. наук Н. В. ВОЛОЦ

Ленпроец

Я. А. ШНЕЙБЕРГ. МИХАИЛ МАТВЕЕВИЧ БОРЕСКОВ.

147 стр., ц. 3 руб. 15 коп. Госэнергоиздат, 1951.

Широкие круги электриков мало осведомлены о трудах М. М. Борескова. Секция энергетики и электросвязи Комиссии по истории техники Отделения технических наук Академии наук СССР, ознакомившись со всеми архивными и литературными документами, характеризующими жизнь и деятельность М. М. Борескова, признала, что русская техника имеет в его лице «безусловно видного деятеля в области минно-подрывного дела — одного из основоположников минной электротехники в нашей стране» и что «его работы имеют важное значение и продолжают широко использоваться в народном хозяйстве нашей страны». Тем отраднее появление рецензируемой работы, предназначенной для широких кругов читателей — инженерных и технических работников, студентов вузов и техникумов.

С любовью и уважением относится энергетическая общественность нашей страны к памяти пионеров в области электротехники, в числе которых был и М. М. Боресков. Выход книг о замечательных людях нашей Родины, патриотах своего Отечества следует горячо приветствовать. Огромное воспитательное значение их трудно переоценить.

Содержание труда Я. А. Шнейберга доказывает, что Михаил Матвеевич Боресков был одним из пионеров в области использования электрической энергии для целей взрыва, а также и некоторых специальных применений ее в общей технике, чему и посвятил он 50 лет своей жизни. Мало изучена его деятельность в области воздухоплавания, которому он также уделял внимание; эта сторона его творчества не нашла отражения и в рецензируемой книге.

Предложения М. М. Борескова в области применения электрического способа взрыва в гидротехнических работах и, в частности, по углублению фарватеров рек и лиманов, а также для прочистки металлических труб до сих пор имеют большое народнохозяйственное значение. Формула Борескова для расчета величин зарядов применяется и в настоящее время подрывниками всего мира. Своими работами М. М. Боресков внес крупный вклад в теорию и практику минно-подрывного дела. Его труды «Опыт руководства по минному делу» и «Руководство по минному

искусству в применении его к подводным оборонительным работам и гидротехническим работам» были настольными книгами русских военных электротехников. Эти книги характеризуют Михаила Матвеевича как талантливого деятеля в области науки и техники. Новаторство, связь теории и практики были характерными особенностями инженерной деятельности М. М. Борескова.

Он много работал над усовершенствованием источников электрической энергии, создал и применил несколько оригинальных конструкций гальванических мин и замкнутых цепей. При помощи пловучей гальванической мины им произведен первый в мире взрыв корабля. Он успешно применял в больших масштабах электрические мины заграждения и, в частности, подводные фугасы с порывым зарядом большой силы, разработав все электротехническое оборудование, необходимое для их взрыва. Он вел большие испытания по определению сферы действия пороховых подводных зарядов и разрушительной силы личных взрывчатых веществ. М. М. Боресков был участником Крымской кампании 1853—1855 гг. и Русско-турецкой войны 1877—1878 гг., во время которых энергично и успешно руководил минными работами, проявляя техническую находчивость и храбрость. Даже враги вынуждены были признать отличную работу русских минеров, руководимых М. М. Боресковым.

Следует отметить его организационную, научную и педагогическую деятельность в Техническом гальваническом заведении, в Минном офицерском классе и в Военной электротехнической школе, а также литературную работу в журналах и выполненное им редактирование инженерного отдела «Энциклопедии военных и морских наук».

М. М. Боресков был одним из инициаторов основания Электротехнического (VI) отдела Русского технического общества, членом которого он состоял около 20 лет. Он являлся одним из учредителей Электротехнического общества, а также был почетным членом Русского физико-математического и Русского минералогического обществ.

При чтении книги мы видим в М. М. Борескове образного электрика, неутомимого деятеля в области минного искусства, внесшего в это дело новые прогрессивные методы и средства, горячо отстаивавшего приоритет России, не преклонявшегося перед иностранцами и смело пропагандировавшего достижения русских электротехников.

Остановимся на некоторых недостатках книги и допущенных в ней неясностях. Прежде всего следует отметить, что автор не раскрыл полностью все стороны деятельности М. М. Борескова, ограничившись лишь описанием его работы, в основном в области подводно-минного дела, в то время как еще в 1898 г. было написано, что по своему служебному положению Боресков работал по военному, телеграфному и электротехническому отделам наших войск, и в этой области Михаилом Матвеевичем сделано много улучшений и усовершенствований». Далее, М. М. Боресков показан изолированно от среды знаменитых русских электротехников 19 в. (А. С. Попова, В. Н. Чиколева, П. Н. Яблочкова, Ф. А. Пироцкого и др.). Автор, видимо, должен был дать описание той среды, в которой трудился М. М. Боресков и которая, несомненно, являлась влиянием на его деятельность.

Замечание на стр. 14, что опыт взрыва в присутствии Николая I в 1832 г. якобы способствовал делу, вряд ли обосновано, поскольку известно прямо противоположное — именно, что из-за Николая I гальванический способ взрыва был задержан в своем развитии, и генералу Витовтову потребовалось много времени и энергии, чтобы добиться разрешения на возобновление занятий по гальваническому способу взрыва и на организацию специальной учебной гальванической команды, о которой говорится дальше в книге.

О деятельности Витовтова, контр-адмирала Чистякова (предложившего способ управления подводными минами) и о пионер в области применения электричества для военных нужд, талантливого ученике акад. В. В. Петрова, Семене Прокофьевиче Власове (который еще в 1812—1815 гг. производил опыты «о полезном употреблении электричества противу врагов отечества» — см. Б. Н. Ржонсницкий, Ф. А. Пироцкий) в историческом очерке книги (гл. 1) нет упоминания. Не говорится в нем и о применении минной войны в период деятельности великого русского полководца А. В. Суворова; это тем более досадно, что существовало ошибочное мнение будто Суворов исключал минно-подрывное дело из военного искусства. Факты говорят о другом (см. А. И. Иволгин. Минно-подрывные средства, их развитие и применение, 1949, стр. 50).

Генерал Константин Александрович Шильдер впервые в мире применил гальванический способ взрыва в боевых условиях еще во время Русско-турецкой войны 1827—1829 гг. и, видимо, обратил внимание на работы Шиллинга еще в 30-х годах 19 в., как пишет автор (стр. 13), а значительно ранее.

Говоря о том, что Б. С. Якоби предложил оригинальный «соединительный» прибор, обеспечивающий мгновенное взрывание мины при соприкосновении ее с вражеским удном (стр. 15), автор должен был, во-первых, объяснить, что «соединительным» прибором называли в то время запал, который при ударе мины о поражаемый предмет замыкал гальваническую цепь, и, во-вторых, показать устройство оригинального «соединительного» прибора Б. С. Якоби. Иначе вся эта фраза остается непонятной для большинства читателей.

Неточно замечание, что «к концу 40-х годов были закончены многочисленные опыты по воспламенению подводных мин с помощью гальванического тока, произведенные под руководством акад. Якоби» (стр. 7). Усовершенствованная мина Якоби испытывалась в 1852 г., а с 1839 по 1866 г. акад. Якоби стоял во главе всего дела, связанного

с развитием и усовершенствованием подводных гальванических мин. Не говорится и о том, что в России для подрывания зарядов еще в 1845 г. использовались магнито-электрические машинки (см. Кочмержевский, «Подрывное дело», СПб, 1898 г.).

Отмечая удивительные успехи русских минеров в период Крымской войны (стр. 8), необходимо было указать, что они были достигнуты, не взирая на взгляды главнокомандующего, князя Меншикова, который был противником применения гальванических мин (см. Белькинд, П. Н. Яблочков, стр. 73). На стр. 24 следовало бы отметить, что в этом же 1853 г. подпоручик Бельцов предложил пловучую гальваническую мину другой конструкции, а на стр. 27, где говорится о взрыве корабля, можно было бы упомянуть, что в 1844 г. был взорван для опыта старый трехпалубный корабль «Андрей», причем взрыв происходил при прикосновении судна к погруженному в воду заряду, и батарея находилась на берегу на расстоянии 200 сажен от судна (см. Инженерный журнал, № 4, 1869).

На стр. 56 надо было указать, что в 1851 г. гальванизм с успехом употреблялся для разрывания подводных скал и камней при устройстве пристани в г. Дербенте (см. Краткий исторический очерк Технического гальванического заведения).

В историческом очерке не указано, что первая учебная гальваническая команда Морского ведомства была организована в 1847 г. и обучалась вместе с командой л.-гв. саперного батальона под руководством акад. Якоби (см. Инженерный журнал, № 12, 1869).

В гл. 5 «М. М. Боресков — руководитель минного дела в Русско-турецкой войне» надо добавить один из главных выводов, а именно, что русские саперы применяли определенную систему заграждений, причем большое внимание уделялось взаимодействию заграждений с расположением боевых порядков и поддержке заграждений ружейным и артиллерийским огнем.

В гл. 6 «М. М. Боресков — руководитель Электротехнической части Инженерного ведомства» на стр. 134 неточно указано, что в 1886 г. М. М. Боресков сменил зав. Техническим гальваническим заведением, так как еще в 1884 г. последнее было переименовано в Управление гальванической частью Инженерного корпуса с Офицерским гальваническим классом, который затем в 1891 г. был переименован в Электротехнический класс, и уже на базе его в 1894 г. была организована Военная электротехническая школа. Неточно изложена на стр. 132 дальнейшая реорганизация этой школы. В действительности, в 1912 г. она была реорганизована в Офицерскую электротехническую школу, которая в 1919 г. была реформирована в Высшую Советскую электротехническую школу комсостава РККА, и уже в 1921 г. на базе этой школы была организована Военная электротехническая академия.

В заключение нельзя не пожалеть о том, что книга не дает прямого ответа на законный вопрос: почему же был забыт М. М. Боресков, как и многие другие деятели в области техники? Следовало хотя бы кратко коснуться вопроса об отношении царского правительства к роли отечественной науки, о пренебрежении правящих классов царской России к русским ученым и к достижениям отечественной науки. Открытия и изобретения русских людей долгие годы не претворялись в жизнь, одни забывались, другие присваивались иностранцами дельцами, часто при попустительстве и даже при помощи царских чиновников. Советская историческая наука, восстанавливая правду, раскрывает героическое и величественное прошлое Советского народа, утверждает вклад национальной русской науки и техники в сокровищницу мировой культуры.

Инж. В. К. БАЛУЕВ



АРХИПОВ Н. К. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ УЛИЧНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ГОРОДОВ И ПОСЕЛКОВ. 31 стр., ц. 70 коп. Изд. МКХ РСФСР.

БЛАНТЕР С. Г. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ (одно-двухагрегатные). 212 стр.+6 черт., ц. 10 руб. 80 коп. Изд. МКХ РСФСР.

ВАЛЬДГАРД С. Л. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ. 144 стр., ц. 3 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

ВКЛЮЧЕНИЕ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И КОМПЕНСАТОРОВ СПОСОБОМ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ. 59 стр., ц. 1 руб. 95 коп. ЦНИЭЛ. Госэнергоиздат.

ГАЛКИН Ю. М. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОМОБИЛЕЙ. Изд. 2-е, испр. 260 стр., ц. 7 руб. 45 коп. Воениздат.

ДОБРЕЦОВ Л. Н. ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ. 312 стр., ц. 9 руб. 20 коп. Гостехиздат.

* **ЕФРЕМОВ И. С.** ТРОЛЛЕЙБУСЫ, ч. 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. 360 стр.+4 черт. ц. 9 руб. 45 коп. Изд. МКХ РСФСР.

ЗВОНКОВ В. В. ВЕЛИКИЕ СТРОЙКИ КОММУНИЗМА И ТРАНСПОРТ. 96 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Академиздат.

ИОНКИН П. А., ПАНТЮШИН В. С. и СМЕРНОВ В. А. СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРО-

ТЕХНИКЕ. Под ред. В. С. Пантюшина. Изд. 2-е. 436 стр., ц. 8 руб. 30 коп. «Советская наука».

КНОРРИНГ Г. М. СПРАВОЧНИК ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ. Изд. 3-е перераб. 168 стр., ц. 10 руб. Госэнергоиздат.

МАНСУРОВ Н. Н. и ПОПОВ В. С. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Изд. 4-е, перераб. 528 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

НАЗИМОВ В. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. Изд. 2-е, перераб. и доп. 96 стр. ц. 2 руб. Иркутское гос. издательство.

ПОСТНИКОВ И. М. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. 736 стр., ц. 22 руб. 50 коп. Гостехиздат УССР.

РАБЧИНСКАЯ Г. И. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. 272 стр., ц. 6 руб. 70 коп. Госэнергоиздат.

СОРОКИН В. И. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОВОЗ ТИПА IV-КП-1. 276 стр.+4 схемы, ц. 4 руб. 80 коп. Углетехиздат.

ТЮЛЬПАНОВ А. И. ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕЛЬСКИХ ПИДЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. 152 стр., ц. 4 руб. 75 коп. Госиздат БССР.

УЛЬЯНОВ С. А. КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. Учебник для электротехнических вузов и фак. Изд. 4-е, 280 стр., ц. 9 руб. 05 коп. Госэнергоиздат.

ХАЙКИН С. Э. СЛОВАРЬ РАДИОЛЮБИТЕЛЯ. 320 стр., ц. 12 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

ШУМИХИН Ю. А. ВВЕДЕНИЕ В ИМПУЛЬСНУЮ ТЕХНИКУ ЭЛЕКТРОПОДЪЕМНИКИ (ЛИФТЫ). 88 стр. ц. 3 руб. 70 коп. Изд. МКХ РСФСР.

* Звездочками отмечены книги, по которым предполагается помещение рецензии.



К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА

За последние 2—3 года в редакцию журнала „Электричество“ поступают, после завершения годовой подписки на журнал, многочисленные запросы от различных организаций и отдельных лиц, желающих приобрести очередное издание карманного **Календаря-справочника „Электричество“**. Эти запросы остаются большей частью без удовлетворения вследствие того, что тираж Календаря-справочника, являющегося приложением к годовому комплекту журнала „Электричество“, рассчитывается применительно к численности годовых подписчиков на журнал, заблаговременно оформивших свою подписку на весь год.

В связи с этим редакция обращает внимание читателей журнала, рассчитывающих на получение журнала вместе с приложением—**Календарем-справочником на 1953 г.**, на важность своевременного оформления подписки на журнал на весь 1953 год.

Годовая подписка на журнал „Электричество“ с приложением принимается в отделениях Союзпечати и на почте.

ПОПРАВКА

В № 10, 1952 г. в тексте статьи «К новому мощному подъему электрификации Советского Союза» следует: на 3-й полосе, в 3-й строке первого абзаца слева, после слов „в жизни партия“ вставить союз „и“; на 5-й полосе, в 14-й строке левой колонки снизу, после слова „цен“ вставить запятую, в 14-й строке правой колонки сверху, слово „совершенного“ заменить словом „современного“; на 8-й полосе, в 7-й строке левой колонки снизу, слово „Электрификация“ заменить словом „Эксплуатация“.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ОТКРЫТА ПОДПИСКА

**НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Орган Академии наук СССР, Министерства электростанций СССР
и Министерства электронромышленности СССР**

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

В соответствии с программой нового мощного подъема народного хозяйства СССР, предусмотренной директивами XIX съезда КПСС по пятому пятилетнему плану, в журнале систематически освещаются основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и с дальнейшей электрификацией всех отраслей промышленности, сельского хозяйства, транспорта и коммунального хозяйства СССР.

В журнале освещаются новые научно-технические проблемы, связанные с величайшими энергетическими сооружениями Сталинской эпохи.

Журнал «Электричество» уделяет особое внимание вопросам внедрения в производство новой передовой электротехники. В журнале регулярно ведется раздел «Из опыта работы» и печатаются обзоры, обобщающие опыт новаторов науки и техники.

Журнал «Электричество» систематически освещает вопросы истории русской электротехники, информирует читателей в рефератах и обзорах о важнейших материалах отечественной и иностранной электротехнической периодики. В журнале регулярно проводятся научно-технические дискуссии.

В журнале «Электричество» участвуют видные ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

12
номеров
в год
(144 печ. листа)

Годовым подписчикам на журнал будет выслан в качестве приложения календарь-справочник на 1953 г.

**Подписная
цена
96 руб.**

Подписка на журнал „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ принимается во всех отделениях Союзпечати и во всех почтовых отделениях