

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1950


госэнергоиздат

12

КОММУНИЗМ—ЭТО ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ
ПЛЮС ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (Ленин)

ЖУРНАЛ
ОСНОВАН
в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

12
1950
ДЕКАБРЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

А. В. Винтер — Первый в мире государственный план электрификации	3
А. И. Долгинов — Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи и расчет грозоупорности линий с тросами	6
Н. В. Чистов — Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя при учете насыщения	15
А. А. Эфенди Заде — Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения	19
В. Г. Созонов — Механические характеристики двигателя в системе генератор—двигатель с обратными связями	21
Г. М. Каспржак и З. М. Персиц — Асимметричное регулирование асинхронной машины для привода с вентиляторным моментом	25
Г. В. Дершварц — Динамические усилия в расплаве индукционных печей	33
М. В. Беляев — Автоматическое регулирование электрической дуги	37
Ю. М. Галонен — Учет электроэнергии в вагонах трамвая	42
Н. З. Шацев — Защита устройств СЦБ от влияния электротяги переменного тока	45
В. А. Карасев — Аппараты зажигания и питания люминесцентных ламп	50
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Н. И. Клоков — О типе кабеля для электротракторов	55
Ф. Д. Мокрицкий — О нецелесообразности применения частично замкнутых сетей	60
Р. Л. Аронов — Расчет пусковых сопротивлений для двигателей постоянного тока	64
И. Я. Лехтман — К расчету электромагнитов постоянного тока	66
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Д. М. Войтинская — Книга „План электрификации РСФСР“	69
А. В. Храмой — О двух важных этапах в истории электроавтоматики	72
ДИСКУССИИ	
К статье В. Г. Холмского „Применение регулируемых трансформаторов различных типов в городских электрических сетях“	77
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
ХРОНИКА	
Академик А. Ф. Иоффе. К 70-летию со дня рождения и 45-летию научной и педагогической деятельности	84
Научно-техническая сессия по электроприводу в текстильной промышленности	85
Конференция-курсы по эксплуатации сельских электроустановок	87
[В. П. Вологдин]	88
БИБЛИОГРАФИЯ	
Л. Б. Гейлер — Книга И. А. Сыромятникова „Режимы работы асинхронных двигателей“	88
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	90
Указатель материалов, помещенных в журнале „Электричество“ в 1950 г.	91



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. Гла-
зунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**,
канд. 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

Первый в мире государственный план электрификации

К 30-летию плана ГОЭЛРО

Академик А. В. ВИНТЕР

На фронтах гражданской войны шли еще завершающие бои 1920 г. В тяжелых внешних и внутренних условиях начиналась для молодой советской республики борьба на мирном фронте — на фронте хозяйственного строительства. Первоочередная задача советского государства состояла не только в том, чтобы восстановить промышленные предприятия, но и реконструировать их на новой революционной основе. В перспективе стояла великая историческая цель — создать социалистическое народное хозяйство и тем самым превратить советское государство в мощную державу, свободную от какой бы то ни было иностранной зависимости.

Социалистическое народное хозяйство требовало для своего развития могучей энергетической базы, а, между тем, уровень энергетики царской России был ничтожно малым. Быстрое и успешное развитие энергетики в молодом советском государстве было тем самым звеном, за которое нужно было ухватиться, чтобы вытащить всю цепь предстоящего великого социалистического строительства.

В начале 1920 г. В. И. Ленин составил краткую программу того, что нужно сделать для разработки первого государственного хозяйственного плана на 10—15 лет. В феврале того же года, 30 лет назад, ВЦИК вынес постановление об организации Государственной Плановой Комиссии по электрификации РСФСР. Во главе этой комиссии, широко известной под сокращенным называнием «ГОЭЛРО», был поставлен Г. М. Кржижановский.

Советское правительство, Центральный комитет ВКП(б) и лично товарищи Ленин и Сталин с первых же дней существования комиссии оказывали ей повседневную помощь и поддержку в работе. Руководство ГОЭЛРО имело материальную возможность быстро сформировать рабочий аппарат, подобрав большое количество высококвалифицированных сотрудников: профессоров, видных инженеров-практиков, экономистов, хозяйственников. Работа коллектива ГОЭЛРО была построена по принципу свободной постановки крупных технико-экономических вопросов государственного значения, всестороннее

обсуждение которых проводилось сначала по секциям отдельных отраслей народного хозяйства, а затем, по мере накопления материалов, на пленарных заседаниях в общем комплексе.

Широко намеченная программа работ, величественные цели задания, его ясная политическая направленность — все это увлекало сотрудников ГОЭЛРО, возбуждало свободную творческую мысль и желание успешно завершить работу в намеченный товарищами Лениным и Сталиным короткий срок. Работа коллектива ГОЭЛРО была оформлена в виде печатного труда¹ и представлена в декабре 1920 г. на обсуждение VIII съезду Советов.

В работе ГОЭЛРО красной нитью проходит основной руководящий принцип плана: районирование промышленности и сельского хозяйства в зависимости от наличия соответствующего сырья, энергетической базы, транспорта и т. п.

По плану ГОЭЛРО районные центры энергоснабжения были ограничены радиусом действия в 200 км с передачей электроэнергии по высоковольтным линиям при напряжении в 35, 100 и 200 тыс. в, причем предусматривалось их укрупнение путем слияния в будущем, т. е. создание Единой высоковольтной сети всей Европейской части Советского Союза.

Основной политический доклад на VIII Съезде Советов сделал В. И. Ленин. Остановившись на вопросе об электрификации, он сказал:

«...Я думаю, что мы здесь присутствуем при весьма крупном переломе, который во всяком случае свидетельствует о начале больших успехов Советской власти ...Вы услышите доклад Государственной комиссии по электрификации ...Я думаю, что мне не трудно будет убедить вас в особенном значении этого томика. На мой взгляд, это — наша вторая программа партии ...Наша программа партии не может оставаться только программой партии. Она должна превратиться в программу нашего хозяйственного строительства, иначе она негодна и как программа партии.

¹ См. в настоящем номере (стр. 69—71) статью Д. М. Войтинской «Книга „План электрификации РСФСР“. К истории ее издания и распространения».

Она должна дополниться второй программой партии, планом работ по воссозданию всего народного хозяйства и доведению его до современной техники. Без плана электрификации мы перейти к действительному строительству не можем»².

В той же речи Владимир Ильич так оценил роль электричества:

«...Каждый, внимательно наблюдавший за жизнью деревни, в сравнении с жизнью города, знает, что мы корнем капитализма не вырвали и фундамент, основу у внутреннего врага не подорвали. Последний держится на мелком хозяйстве, и чтобы подорвать его, есть одно средство — перевести хозяйство страны, в том числе и земледелие, на новую техническую базу, на техническую базу современного крупного производства. Такой базой является только электричество»³.

Заключительные слова В. И. Ленина были в полном смысле этого слова пророческими:

«Надо добиться того, чтобы каждая фабрика, каждая электрическая станция превратилась в очаг просвещения, и если Россия покроется густою сетью электрических станций и мощных технических оборудований, то наше коммунистическое хозяйственное строительство станет образцом для грядущей социалистической Европы и Азии»⁴.

На этом же съезде Владимир Ильич провозгласил бессмертный лозунг: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»⁵.

После этого исторического выступления Владимира Ильича слово было предоставлено Г. М. Кржижановскому для доклада VIII съезду о работе ГОЭЛРО.

Когда специально выставленная на съезде огромная карта Европейской части нашей Родины расцветилась красными, синими, зелеными и желтыми огнями электрических лампочек, по-очередно вспыхивающих в местах, намеченных планом для новых строительств, делегаты съезда бурей аплодисментов и возгласов выразили свое восхищение и одобрение составленному по инициативе товарищей Ленина и Сталина первому в мире государственному плану электрификации народного хозяйства.

VIII Съезд Советов одобрил и принял план; этот план стал законом, который нужно было выполнить в указанный срок: от 10 до 15 лет.

О плане электрификации товарищ Сталин писал Ленину:

«Превосходная, хорошо составленная книга. Мастерский набросок действительно единого и действительно государственного хозяйственного плана без кавычек. Единственная в наше время марксистская попытка подведения под советскую надстройку хозяйственно-отсталой России действительно реальной и единственной возможной при нынешних условиях технически-производственной базы»⁶.

Уничтожающе высмеяв «средневековых кустарей», осмелившихся критиковать работу ГОЭЛРО и сомневаться в реальности плана, товарищ Сталин в немногих словах указал, как нужно приступить к работе, обеспечив тем самым претворение плана в жизнь.

«Мое мнение:

1) не терять больше ни одной минуты на болтовню о плане;

2) начать немедленный практический приступ к делу;

3) интересам этого приступа подчинить по крайней мере $\frac{1}{3}$ нашей работы ($\frac{2}{3}$ уйдет на «текущие» нужды) по ввозу материалов и людей, восстановлению предприятий, распределению рабочей силы, доставке продовольствия, организации баз снабжения и самого снабжения и пр.

4) Так как у работников Гоэлро, при всех хороших качествах, все же нехватает здорового практицизма (чувствуется в статьях профессорская импотентность), то обязательно влить в плановую комиссию к ним людей живой практики, действующих по принципу «исполнение донести», «выполнить к сроку» и пр.

5) Обязать «Правду», «Известия», особенно «Экономическую Жизнь» заняться популяризацией «Плана электрификации» как в основном, так и в конкретностях, касающихся отдельных областей, помня, что существует **только один «единий хозяйственный план»**, — это «план электрификации», что все остальные «планы» — одна болтовня, пустая и вредная»⁵.

В своих научных трудах и выступлениях товарищ Сталин неоднократно возвращался к вопросу об электрификации нашей страны. Так, например, в октябре 1928 г., выступая против правой опасности в партии и указывая на реально существующие в Советском государстве условия для победы социализма, товарищ Сталин говорил: «...мы можем уничтожить возможность восстановления капитализма, можем выкорчевывать корни капитализма и добиться окончательной победы над капитализмом в нашей стране, если поведем усиленную работу по электрификации страны, если под промышленность, сельское хозяйство и транспорт подведем техническую базу современной крупной промышленности. Из этого и вытекает возможность победы социализма в нашей стране»⁶.

План ГОЭЛРО был встречен звериной яростью и бессильным злопыхательством внешних и внутренних врагов партии и советского народа. На все голоса кричали враги народа «о неизбежном провале».

План ГОЭЛРО предусматривал строительство 10 гидроэлектростанций и 20 тепловых районных электростанций, преимущественно на местном топливе, с суммарной мощностью в 1,5 млн. квт; годовое производство электроэнергии возрастало до 6 000 млн. квтч. Сейчас эти цифры кажутся нам малыми, но в 1920 г., когда годовое производство энергии по всей стране составляло

² В. И. Ленин. Соч., т. XXVI, стр. 45—48.

³ Там же.

⁴ И. В. Сталин. Соч., т. 5, стр. 50—51.

⁵ Там же.

⁶ И. В. Сталин. Соч., т. 11, стр. 228.

$\frac{1}{2}$ млрд. квтч, находились нынешние и маловеры, которые задавали невежественный вопрос — что делать с таким количеством энергии??!

Враги, трусы и маловеры ходом событий были выброшены в мусорную свалку истории.

Объем работ, намеченных по плану ГОЭЛРО, был не только досрочно выполнен в 1931 г., но и значительно перевыполнен. Ни одного лишнего киловаттчаса, конечно, не было и не могло быть! Каждый киловаттчас электрической энергии использовался на нужды народного хозяйства и на благо советских людей.

Выполнение планов сталинских пятилеток во много раз увеличило производство электроэнергии. Подводя итоги первой пятилетки, товарищ Сталин сказал:

«В смысле производства электрической энергии мы стояли на самом последнем месте. Теперь мы выдвинулись на одно из первых мест»⁷.

С момента принятия плана ГОЭЛРО прошло 30 лет. Тридцать лет советский народ, руководимый партией большевиков, ведет великие созидательные работы во всех областях народного хозяйства. Строительство в нашей стране не прекращается ни на один день, оно развивается все шире и шире, совершенствуется все больше и больше. За эти 30 лет мы построили огромное количество электростанций, в том числе крупнейшую в Европе гидроэлектростанцию на Днепре.

⁷ И. В. Сталин. Вопросы ленинизма, стр. 373, Изд. 11.

У нас созданы мощные энергосистемы. От полумиллиарда киловаттчасов, которые производились всеми станциями Советской страны в 1920 г., мы сейчас приближаемся к годовому производству около 100 млрд. квтч., т. е. имеем 200-кратный рост!

Недавно опубликованы исторические постановления Совета Министров СССР о строительстве на великой русской реке Волге двух энергетических гигантов — Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций с общей установленной мощностью в 3 700 тыс. квт и с годовой выработкой около 20 млрд. квтч электрической энергии.

Новые сверхмощные электро-энергетические узлы будут основными звенями Единой высоковольтной сети Европейской части нашей страны; создаются эффективные условия для удешевления производства электрической энергии и наибольшего резервирования мощностей действующих станций.

Волжские гиганты и другие новые электростанции СССР пошлют могучий поток электроэнергии на работы по сталинскому плану преобразования природы; они навсегда останутся величайшими памятниками Сталинской эпохи.

План ГОЭЛРО, принятый к исполнению 30 лет назад, был искрой, из которой возгорелось пламя величественных планов советской электрификации и создания материальной базы коммунизма.

[27. 9. 1950]



Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи и расчет грозоупорности линий с тросами

Кандидат техн. наук, доц. А. И. ДОЛГИНОВ

Всесоюзный заочный энергетический институт

Для линий на металлических опорах нормальным средством грозовой защиты является применение тросовых молниевыводов. Расчет защитного уровня линий с тросами в значительной степени определяет их конструкцию.

При грозовом разряде на линии электропередачи возникают переходные электромагнитные процессы, приводящие к импульсным напряжениям, действующим на изоляцию линии. Изучение этих процессов составляет основу для построения методики расчета защитного уровня линий электропередачи. Новые исследования в области теории молний и волновых процессов на линиях при высоких напряжениях и индуктированных перенапряжениях позволяют внести ряд дополнений в существующую методику расчета защитного уровня линий,ложенную в основу рекомендаций Руководящих указаний по защите от перенапряжений [Л. 1]. Определение защитного уровня линий имеет в основном сравнительное значение. Поэтому целесообразно всемерное упрощение методики расчета. Однако это упрощение должно быть основано на подробном изучении явления с тем, чтобы верно отразить влияние отдельных конструктивных параметров линий на уровень ее грозоупорности.

Схема развития грозового разряда. Работы советских ученых по исследованию длинных искр и молний (И. С. Стекольникова, В. С. Комелькова, А. С. Зингермана и др.) дают основание к построению следующей схемы развития грозового разряда.

Лидер длинной искры можно представить в виде канала высокой проводимости, несущего на конце высокие градиенты, необходимые для его развития. Этим и объясняется возможность прорастания лидера в относительно слабых полях. В области высоких градиентов в окре-

пассматривается механизм электромагнитного воздействия грозового разряда на воздушную линию и методика расчета защитного уровня линий электропередачи с тросовыми молниевыводами. Учитываются особенности волновых процессов на линиях при высоких напряжениях [Л. 2, 3]. В основу расчетов положена схема развития грозового разряда. Предполагается, что горизонтальный разнос тросов обеспечивает столь малый защитный угол, что вероятность прямого поражения проводов можно пренебречь.

стности канала движется множество лавин, возникающих в результате интенсивной фотоионизации (рис. 1, а). Слияние этих лавин в направлении максимального градиента E_{\max} создает нить плазмы высокой проводимости, прорастающей

в пространстве со скоростью 10^8 – 10^9 см/сек. Однако лавины образуются не только в направлении E_{\max} , но и в радиальных направлениях, где они, попадая в область слабых полей, постепенно тормозятся и образуют ионизированный чехол, окружающий центральный канал. Строение этого чехла должно быть аналогично короне отрицательной полярности. Малоподвижные положительные ионы концентрируются вокруг центрального канала; электроны, выносимые в область слабого поля, оседают нанейтральных частицах и образуют внешний слой отрицательных ионов. Двойной ионизированный слой связывает на центральном канале отрицательные заряды, «спускающиеся» по проводящему каналу из облака. Мы употребляем здесь слова «спускаются» в том смысле, как говорим и о движении зарядов на линии в волновом процессе. Таким образом, развитие лидера молний можно грубо, схематически представить в виде спускающегося от облака к земле проводящего канала с большой плотностью электрических зарядов.

Если через σ_{λ} обозначить линейную плотность этого заряда, а через v_{λ} — скорость лидера, то ток лидера $i_{\lambda} = \sigma_{\lambda} v_{\lambda}$. Вследствие больших значений σ_{λ} ток i_{λ} достигает сотен ампер, несмотря на относительно малое значение v_{λ} . С течением времени заряды плазмы диффундируют в окружающую среду: канал лидера «расплывается» и проводимость его резко падает. Это, в свою очередь, ведет к значительному падению потенциала вдоль канала лидера от облака к земле.

Если, например, потенциал облака можно оценить величиной $100 \cdot 1000 \frac{кв}{м} \cdot м$, то потенциал головки лидера при приближении к земле составляет уже величину порядка десятка тысяч киловольт. При токе $i_{\mu} = 100 а$ такому падению потенциала соответствует среднее сопротивление канала лидера $R = 8 - 10 \text{ ом/см}$. Падению потенциала канала лидера соответствует и падение плотности заряда, связанного чехлом лидера.

Когда лидер достигает земли, по его центральному каналу с большой скоростью распространяется разрядная волна, эквивалентная стеканию в землю отрицательных зарядов, связанных в канале чехлом лидера. У земли, где канал лидера обладает высокой проводимостью, скорость разрядной волны близка по измерениям Шонланда к $\frac{1}{3}$ скорости света. Такие же значения скоростей определены теоретически и для волны на линии с импульсной короной, в том случае, когда заряд провода можно считать полностью связанным коронным чехлом [Л. 2]. С ростом высоты проводимость канала лидера резко падает и соответственно снижается скорость разрядной волны. Нейтрализация зарядов плотностью σ_{μ} со скоростью v дает ток $\sigma_{\mu}v$, где v — скорость разрядной волны.

В процессе развития главного разряда за малые времена, соответствующие фронту волны, втягивание малоподвижных ($1 - 2 \text{ см}^2/\text{сек}^2$) ионов лидерного чехла не может существенно влиять на величину тока молнии. Однако при распространении вверх по центральному каналу лидера волны, нейтрализующей связанные заряды между чехлом лидера и каналом нулевого потенциала возникают высокие градиенты, приводящие к интенсивной вторичной ионизации (рис. 1, б). Электроны, возникающие в процессе этой ионизации, втягиваются в центральный канал, что ведет к дополнительному повышению тока молнии. Область интенсивной ионизации видна по резкому возрастанию диаметра свечения по пути главного разряда. Процессы развития вторичной ионизации должны протекать аналогично импульсной короне, практически без запаздывания. Ввиду этого заряды, идущие на образование разрядного тока, поступают в каждый данный момент из области вблизи головки главного канала (рис. 1, б), где интенсивной ионизации способствуют также высокие продольные градиенты.

Вторичный механизм развития главного разряда можно представить в виде процесса распространения вверх по каналу лидера столба положительных ионов. Однако попрежнему остается справедливой формула $i = \sigma v$, где только следует положить $\sigma = \sigma_{\mu} + \sigma_{\mu}$, где σ_{μ} — плотность зарядов канала лидера, а σ_{μ} — плотность зарядов положительного столба у головки лидера, возникающего в процессе вторичной ионизации. Зависимость скорости v от высоты главного разряда y определяется полевыми исследова-

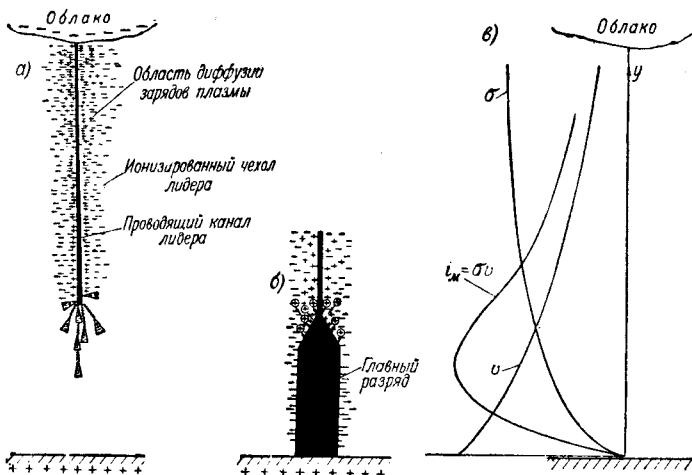


Рис. 1. Схема развития грозового разряда.

ниями (понятно, с большим разбросом величин) и тем самым по известному $i(t)$ может быть найдена и зависимость $\sigma(y)$.

Как видно из кривых $\sigma(y)$ и $v(y)$, приведенных на рис. 1, в, с ростом y σ возрастает, а v падает. Произведение σv дает кривую тока молний, характерную для осциллографических записей.

В расчетах грозоупорности нас обычно интересуют явления на фронте волны. Принимаем в целях упрощения дальнейших расчетов фронт тока молний косоугольным, образованным равномерным нарастанием σ и постоянной усредненной скоростью v . Величину этой усредненной на фронте скорости примем равной $v = \frac{1}{5} c$, где c — скорость света.

Описанная здесь физическая картина развития грозового разряда позволяет дать обоснование известной расчетной схеме, в которой канал молнии замещается волновым сопротивлением. Действительно, исключая поля лидера, можно главный разряд рассматривать как волновой процесс включения на проводящий канал лидера „генератора“ с напряжением U_{μ} , равным напряжению головки лидера при приближении лидера к земле (рис. 2, а). Волна U_{μ} сопровождается коронным разрядом, эквивалентным компенсации зарядов лидера. Таким образом, „волновое сопротивление“ канала молнии Z_0 должно соответствовать волновому сопротивлению вертикального проводника с учетом короны и порядок величины Z_0 может быть оценен в $200 - 300 \text{ ом}$.

В схеме рис. 2, а ток молнии $i = \frac{U_{\mu}}{Z_0 + R_i}$. Напряжение U_{μ} равно току молнии i_{μ} при поражении идеально заземленного объекта ($R_i = 0$), умноженному на Z_0 , и, следовательно, $i = i_{\mu} \frac{Z_0}{Z_0 + R_i}$. Коэффициент $\frac{Z_0}{Z_0 + R_i}$ учитывает снижение тока молнии при поражении объектов с высоким R_i за счет потерь энергии поля лидера при подтекании зарядов, формирующих главный разряд.

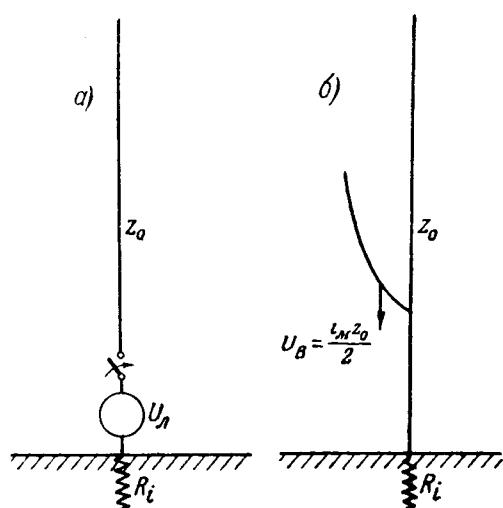


Рис. 2. Расчетная схема грозового разряда.

Схема рис. 2, а может быть преобразована в схему рис. 2, б, в которой волна $\frac{i_n Z_0}{2}$ падает с волнового сопротивления Z_0 . Следует, однако, иметь в виду, что данная схема не отражает физической картины явления. Дело в том, что в неплоском поле канала молнии непригодны основные соотношения волновых процессов на длинных линиях и, следовательно, не могут быть введены коэффициенты преломления и отражения.

Электромагнитное воздействие грозового разряда. В соответствии с описанной схемой развития главного разряда процесс индукции напряжения на линии может быть описан следующим образом. Поле избыточных отрицательных зарядов лидерного канала в силу относительно малой скорости прорастания лидера может в каждый момент времени полагаться электростатическим, несмотря на изменение во времени (квазистатическое поле). В электростатическом поле длинный провод сохраняет нулевой потенциал, так как потенциал провода в бесконечности равен нулю и падение потенциала вдоль линии

отсутствует. Нулевое значение потенциала провода в произвольной точке x создается наложением на электрическое поле лидера поля положительных зарядов q на линии (рис. 3, а). Заряды q подтягиваются с дальних участков линии продольными составляющими электрического поля лидера. Напряженность E_x компенсируется продольными напряженностями E_q , связанными с неравномерным распределением зарядов q по линии. В статическом режиме $E_q = -E_x$. Заметим, что ввиду независимости напряжения от пути интегрирования потенциалы поля $U_x = -U_q = \int_x^{\infty} E_x dx$

можно заменить $\int_0^h E_y dy = E_{y cp} h$, где $E_{y cp}$ — средняя напряженность поля зарядов лидера на высоте линии h .

Главный разряд нейтрализует с большой скоростью избыточные отрицательные заряды лидерного канала, разрушая тем самым поле лидера; напряженности E_x резко снижаются. В процессе вторичной ионизации заряды положительного столба, растущего от земли к облаку, создают электрическое поле, направленное обратно полю лидера. Возрастание поля вторичной ионизации эквивалентно снижению поля лидера и, в частности, снижению продольных составляющих поля E_x . Оба процесса, следовательно, могут быть объединены при рассмотрении. С главным разрядом связано также значительное магнитное поле тока молнии. Резкое возрастание тока молнии на фронте волны индуцирует дополнительное электрическое поле. Понятно, что реальное электрическое поле главного разряда едино и разделение его на составляющие условно. Полное электрическое поле определяется выражением

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (1)$$

где φ — потенциал электростатического поля; \mathbf{A} — вектор-потенциал магнитного поля, совпадающий с направлением тока молнии.

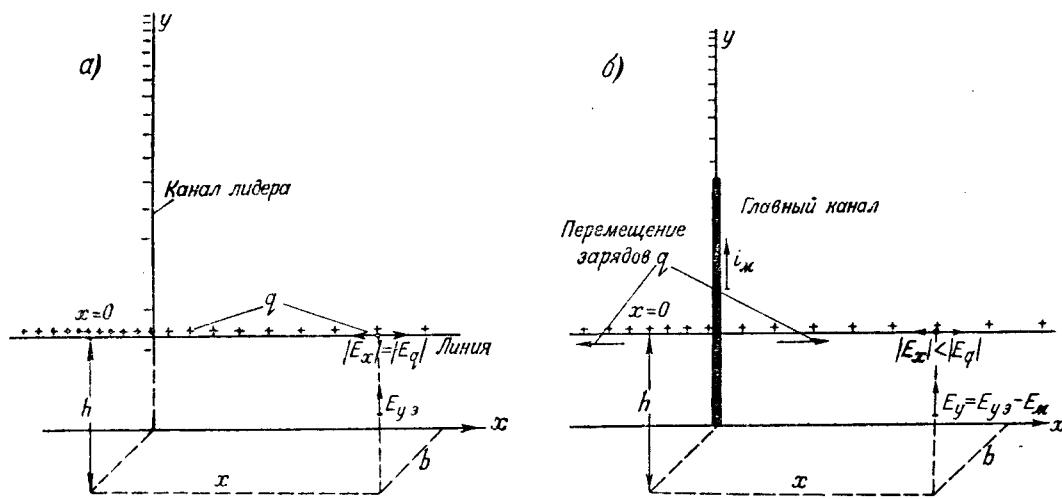


Рис. 3. Схема развития индуктированных перенапряжений (индукция тока молнии).

В поле главного разряда нарушается равновесие сил, действующих на заряды в лидерной стадии. Нарушение равновесия сил¹ наступает при снижении продольной составляющей $E_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\operatorname{grad} \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)$. Но вектор-потенциал \mathbf{A} нормален к линии и, следовательно, $E_{x\perp} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0$, а $E_{x\parallel} = -\frac{\partial}{\partial x} \operatorname{grad} \varphi$. Таким образом нормальное к линии электрическое поле, индуцированное магнитным полем, не участвует в процессе растекания зарядов по линии.

Под действием избыточных сил $q(E_q - E_x)$, возникающих при снижении E_x , заряды q перемещаются по направлению от точки $x=0$ (рис. 3, б). Если бы заряды не имели инерции, то перемещение q следовало бы за изменением E_x так, что E_q все время оставалось равным E_x и потенциал провода сохранял бы нулевое значение. В действительности заряды q обладают инерцией; при движении q образуется магнитное поле, играющее роль кинетической энергии движущегося заряда. Вследствие инерции зарядов E_q остается больше, чем снижающаяся составляющая E_x .

Волновой процесс на линии, соответствующий описанной физической картине, определяется уравнением

$$E_q - E_x = L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

где i — ток в линии, создаваемый движущимися зарядами q ;

L — индуктивность линии.

Полное напряжение линии слагается из потенциала U_q , созданного растекающимися зарядами q , и потенциала $E_{y\perp} h$, определяемого вертикальными составляющими электрического поля $E_y = -E_{y\perp} + E_{y\parallel} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\operatorname{grad} \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)$.

В приложении 1 найдено, что близкий к линии грозовой разряд индуцирует в точке $x=0$, ближайшей к месту разряда, напряжение

$$U_{\text{анд}} = ah_n \left(1 + 0,2 \ln \frac{2vt_\phi}{b} \right), \quad (3)$$

¹ Заметим, что нормальные к проводам составляющие поля не могут удерживать заряды на проводах q , как это принималось ранее автором в [Л. 3]. Поэтому представление о растекании зарядов при снижении вертикальных составляющих поля имеет лишь узко расчетный смысл, соответствующий приближению $E_x = -\frac{\partial U_q}{\partial x}$, где

$U_q = E_y h$. Физическая неприемлемость этого представления обнаруживает себя при расчете $U_{\text{анд}}$ в электрическом поле, индуцированном магнитным полем тока молнии. Тем не менее, $U_{\text{анд.м}}$ определяется зарядами на проводе, как это будет показано ниже.

2 Электричество, № 12.

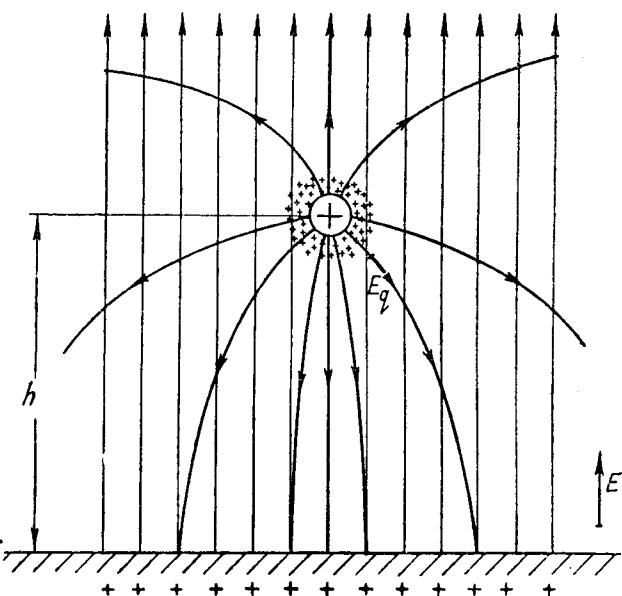


Рис. 4. Структура электрического поля зарядов на проводе во внешнем поле лидера.

где a численно — крутизна косоугольного фронта волн, $\frac{ka}{\mu\text{сек}}$;

t_ϕ — длина фронта волн;

h_n — высота провода, м;

b — расстояние от канала молнии до линии, м;

$v = 1/5$ с.

Под близким грозовым разрядом понимаются разряды, для которых b^2 мало по сравнению со значением $(vt_\phi)^2$. Этому условию удовлетворяют $b < 100$ м.

В формуле (3) слагающая ah_n индуцируется электростатическим полем главного разряда, а слагающая $0,2ah_n \ln \frac{2vt_\phi}{b}$ — магнитным полем тока молнии.

Представляет интерес рассмотрение влияния коронного разряда на проводе на развитие индуцированного напряжения. В лидерной стадии разряда потенциал провода сохраняет нулевое значение за счет поля зарядов q . Конфигурация этого поля показана на рис. 4. По любому направлению между проводом и землей, например по вертикали h , имеет место равенство $\int_s \mathbf{E} ds =$

$= \int_s \mathbf{E}_q ds$, где \mathbf{E} — напряженность поля лидера, а \mathbf{E}_q — напряженность поля индуцированных зарядов q . Вблизи провода напряженность $E_q \gg E$ и, следовательно, на проводе (имеющем нулевой потенциал) возникает коронный разряд. Пренебрегая вблизи провода внешним полем E по сравнению с E_q , можно рассчитать корону, исходя из напряжения на проводе $U = E_y h$. Это напряжение достигает $10^5 - 10^6$ в, что означает возникновение на проводе интенсивной короны.

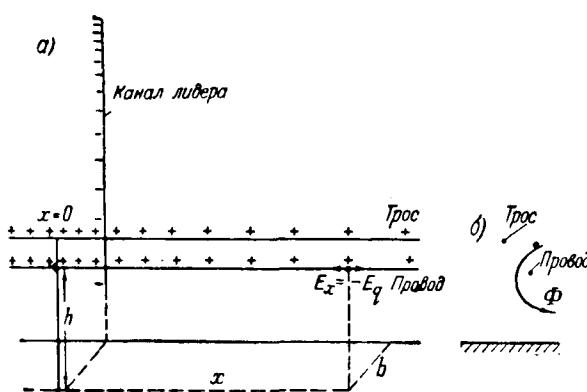


Рис. 5. Защитное действие тросовых молниевводов.

Знак q положителен, и корона имеет положительную полярность.

Индуктированное напряжение возникает в стадии главного разряда, когда разрушается поле лидера, компенсированное полем зарядов q на проводе. Вблизи провода $E_q \gg E$ и снижение E практически не ведет к усилению коронного разряда. Растекание зарядов по линии при распаде поля лидера является фактором, снижающим $U_{\text{инд}}$ в точке $x=0$. В течение малых времен фронта волн главного разряда (тока молнии) заряды коронного чехла на проводе можно считать неподвижными. Следовательно, только доля общего заряда q , сосредоточенная на проводе, может участвовать в процессе растекания по линии. Это означает, что корона на проводах ведет к повышению индуктированного напряжения на линии в $x=0$ и близлежащих точках. Это заключение важно в том отношении, что позволяет рассматривать расчетное соотношение (3), как не преувеличивающее действительные значения $U_{\text{инд}}$, возникающего на проводах.

Подвеска заземленных тросов снижает индуктированные напряжения. Тросы, перехватывая часть силовых линий поля лидера (рис. 5, а), снижают продольную напряженность E_x , а следовательно, и разность $E_q - E_x$, определяющую $U_{\text{инд}}$. При подвеске тросов снижается индуктивность линии, что облегчает растекание зарядов на проводе в переходном процессе. Снижение инерционности зарядов q , как следует из изложенного, также снижает $U_{\text{инд}}$. Наконец, тросы, образующие короткозамкнутый контур, частично вытесняют магнитное поле молнии; силовые линии магнитного поля сцеплены с контуром провод—земля так, как показано, на рис. 5, б. Защитное действие тросов определяется приближенно умножением $U_{\text{инд}}$ [формула (3)] на коэффициент $(1-k)$, где k — коэффициент связи тросопровод. Корона на тросах снижает индуктированное напряжение. С развитием короны возрастает емкость тросов и увеличивается, следовательно, число силовых линий, перехватываемых тросами. Поэтому в расчетах защитного действия тросов следует подставлять коэффициент k с учетом импульсной короны k_k .

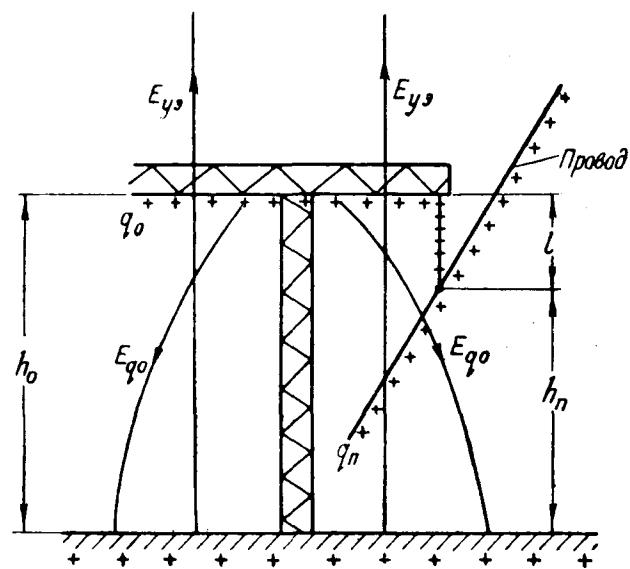


Рис. 6. Индукция зарядов на опоре и проводе в электростатическом поле главного разряда.

Напряжения, действующие на изоляцию линии передачи. Формула (3) определяет напряжение между проводом и землей, индукированное на идеальной линии, на которой отсутствует искажение поля опорами. Однако на линии электропередачи опасное напряжение возникает не между проводом и землей, а между проводом и телом опоры. Определим напряжение, ложащееся на линейную изоляцию, например на гирлянду изоляторов, при грозовом разряде вблизи линии.

Рассмотрим раздельно электростатическое и магнитное поля главного разряда. На рис. 6 показано распределение зарядов на проводе и опоре в конце лидерной стадии разряда. Потенциалы провода и опоры имеют нулевое значение за счет положительных зарядов, подтянутых на проводе продольными составляющими E_{x0} , и на опоре — вертикальными составляющими E_{y0} . В стадии главного разряда при снижении E_{x0} и E_{y0} происходит высвобождение и растекание зарядов на проводе и опоре. Потенциал провода в точке $x=0$, определяемый зарядами q на проводе, равен U_{qn} . Растекание зарядов на опоре, представляющей вертикальную антенну, подчиняется общему неоднородному волновому уравнению при наличии внешнего поля, приведенному в приложении 1. Для опор типовых конструкций (малые h_0) можно принять, что полный потенциал опоры сохраняет нулевое значение и в стадии главного разряда. Это означает, что потенциал верхушки опоры, определяемый зарядами опоры², $U_{q0} = E_{y0} h_0$. С учетом поля E_{y0} по длине гирлянды l находим (в соответствии с расчетом приложения 1), что напряжение, дей-

² Здесь и далее под E_y понимается среднее значение $E_{y,cr}$ вертикальной составляющей электрического поля на высоте линии h .

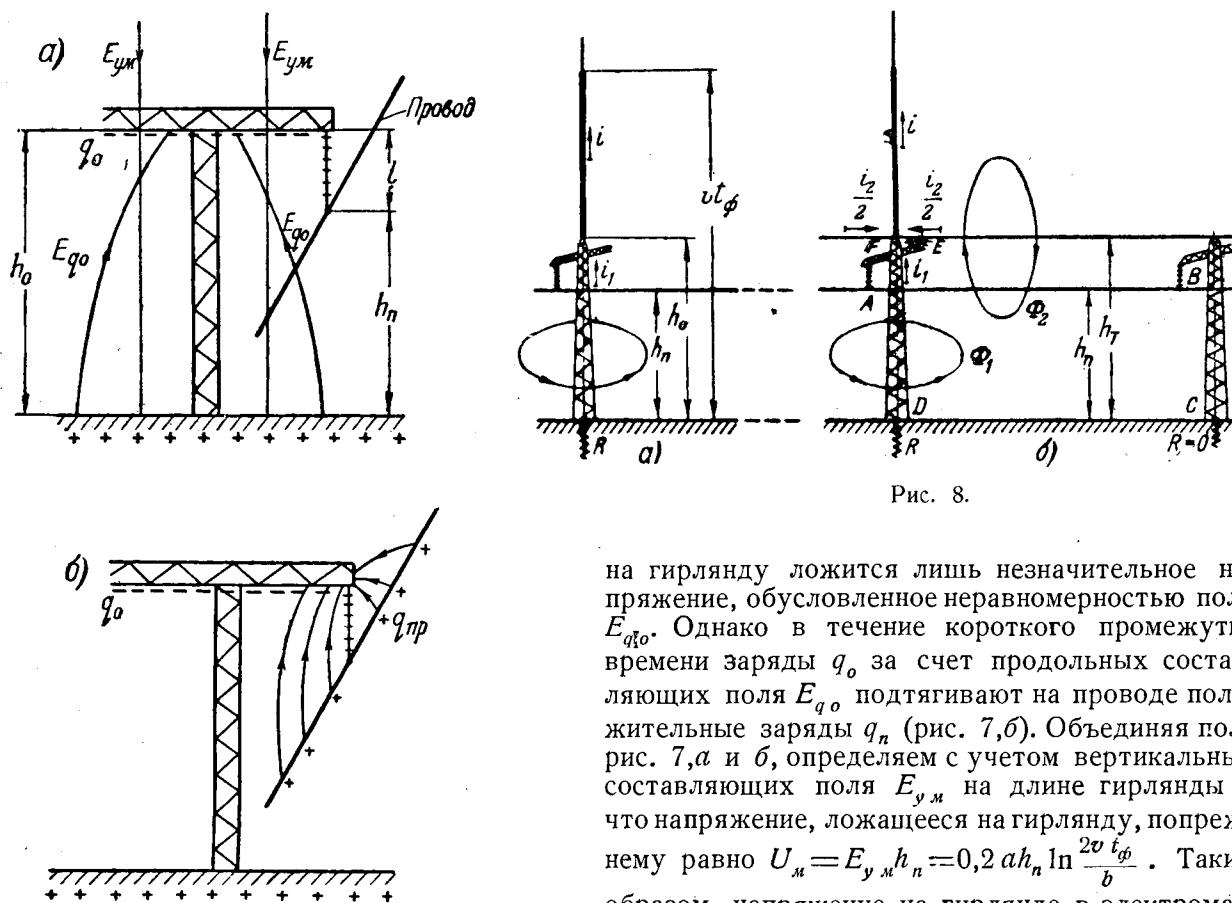


Рис. 7. Индукция зарядов на опоре и проводе в электрическом поле, индуцированном магнитным полем тока молнии.

ствующее на гирлянду в электростатическом поле главного разряда (см. приложение 1),

$$U_s = U_{qn} - E_{y_s} (h_o - l) = U_{qn} - E_{y_s} h_n = ah_n.$$

Заметим, что в приведенном расчете растекание зарядов по проводу и опоре определено без учета связи зарядов между проводом и опорой. Эта связь препятствует растеканию зарядов. Однако, учитывая, что сохранение зарядов на проводе и опоре в равной степени повышает их потенциал, напряжение на гирлянде остается неизменным.

Обратимся теперь к магнитному полю тока молнии, индуцирующему вертикальную составляющую электрического поля E_{y_m} . Поле E_{y_m} вызывает подтекание зарядов q_o на опоре, но не на проводе (рис. 7, а). Полагая, что полный потенциал опоры попрежнему сохраняет нулевое значение, находим, что потенциал верхушки опоры, определяемый отрицательными зарядами опоры, равен

$$U_{q_o} = \int_0^h E_{q_o} dh = -E_{y_m} h_o. \text{ Поле } E_{y_m} \text{ и поле}$$

E_{q_o} взаимно компенсируют друг друга, так что

2*

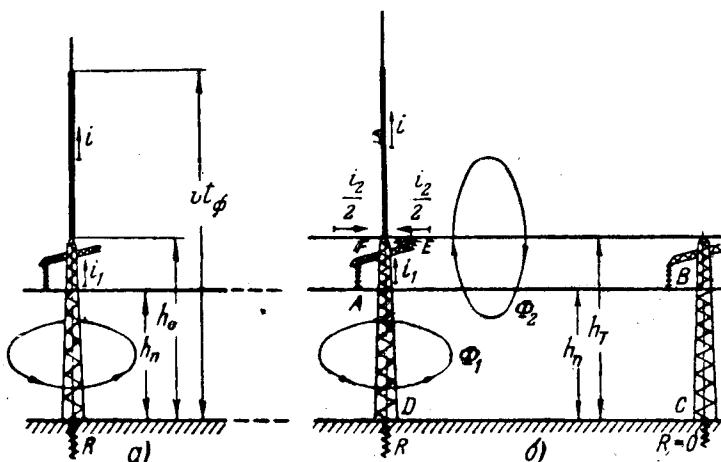


Рис. 8.

на гирлянду ложится лишь незначительное напряжение, обусловленное неравномерностью поля E_{q_o} . Однако в течение короткого промежутка времени заряды q_o за счет продольных составляющих поля E_{q_o} подтягиваются на проводе положительные заряды q_n (рис. 7, б). Объединяя поле рис. 7, а и б, определяем с учетом вертикальных составляющих поля E_{y_m} на длине гирлянды l , что напряжение, ложащееся на гирлянду, попрежнему равно $U_m = E_{y_m} h_n = 0,2 a h_n \ln \frac{2v t_\phi}{b}$. Таким образом, напряжение на гирлянде в электромагнитном поле главного разряда определяется формулой (3). Однако в отличие от идеальной линии напряжение $U_{m\delta}$ здесь целиком обусловлено зарядами на проводе. Кроме того, что очень важно, составляющая напряжения, обусловленная магнитным полем тока молнии, возникает и исчезает с некоторым запаздыванием против нарастания и снижения составляющей поля $E_m = -\frac{\partial A}{\partial t}$.

При опорах большой высоты выравнивание потенциала вдоль опоры требует уже времени, сравнимого с длиной фронта волны. В этом случае на верхушке опоры сохраняется избыточный положительный заряд, снижающий $U_{m\delta}$.

Явление индукции позволяет, между прочим, предполагать, что в результате индукции тока молнии по опорам и стержневым молниеотводам могут протекать токи порядка нескольких килампер и даже выше. Эти токи могут быть ошибочно приняты за токи прямого удара молнии.

Рассмотрим далее (рис. 8, а) прямой удар молнии в заземленную опору без троса. Развитие главного разряда связано с движением нулевого потенциала (при $R = 0$) вверх по каналу молнии. Высвобождающиеся положительные заряды на проводе, подтягивая отрицательные заряды на опоре, создают на гирлянде потенциал U_s . Вертикальное электрическое поле, связанное с изменением тока (э. д. с. самоиндукции), ведет к накоплению избыточных отрицательных зарядов на опоре и в канале молнии; эти заряды, подтягивая на проводе положительные заряды,

создают на гирлянде падение напряжения $U_{\text{инд}}$. Процесс индукции здесь, следовательно, аналогичен рассмотренному и индукированное напряжение определяется формулой (3), где лишь вместо расстояния b следует подставлять эффективный радиус опоры r_s .

$$U_{\text{инд}} = ah_n \left(1 + 0,21 \ln \frac{2vt_\phi}{r_s} \right). \quad (4)$$

Как указывалось, второе слагаемое формулы (4) учитывает напряжение, индуцированное магнитным полем тока молнии. Возможно и раздельное рассмотрение магнитной индукции тока в канале молнии i и опоре i_1 . В этом случае

$$U_{\text{инд}} = ah_n \left(1 + 0,21 \ln \frac{2vt_\phi}{h_o} \right) + aL_o; \quad (5)$$

здесь $L_o = 0,2h_n \ln \frac{h_o}{r_s}$ — индуктивность опоры.

Отсюда следует известное соотношение для волнового сопротивления опоры $W_o = 60 \ln \frac{h_o}{r_s}$.

Слагающая aL_o соответствует так называемому индуктивному падению напряжения на опоре. В нашем методе напряжение aL_o приписывается проводу, а не верхушке опоры. С расчетной точки зрения при косоугольном фронте волны оба метода идентичны. Было бы, однако, неосторожным определять напряжение на гирлянде, пользуясь соотношением $L_o \frac{di}{dt}$ при косинусоидальной или экспоненциальной форме волны. Действительно, напряжение на гирлянде возникает не под действием $L_o \frac{di}{dt}$, а под действием кулонова поля зарядов на проводах, опоре и в канале молнии, связанных с индукцией тока молнии. Напряжение на гирлянде отстает от изменения $L_o \frac{di}{dt}$ на время, необходимое для растекания зарядов, и, следовательно, в момент максимума тока может еще иметь существенное значение. Расчет времени растекания зарядов требует расширения наших знаний о физике главного разряда.

На линии с тросовыми молниеотводами тросы частично отводят ток молнии в соседние опоры. Кроме того, тросы снижают индуцированное напряжение на проводах в соответствии с коэффициентом $(1 - k_\kappa)$. Обозначим через i_1 ток в опоре и i_2 ток в тросах (рис. 8,б). Ток в канале молнии $i = i_1 + i_2$. Доля i_1 и i_2 к моменту максимума i определяется длиной фронта волны тока молнии. Пусть $i_1 = \gamma i$. Коэффициент γ определяется по методу многократных отражений или упрощенно путем замены опоры и тросов индуктивностями (приложение 2).

Ток i_1 создает падение напряжения на заземлении опоры $U_o = i_1 R_i$, где сопротивление заземления R_i определяется с учетом импульсного коэффициента α_i и, следовательно, является функцией тока i_1 . Напряжение, ложащееся на изоляцию опоры,

$$U_{\text{иэ}} = i_1 R_i + U_{\text{инд}\Sigma},$$

где $U_{\text{инд}\Sigma} = U_{\text{инд}} + U_{\text{инд}1} - U_{\text{инд}2}$ слагается из напряжений, индуцируемых на проводе током i в канале молнии ($U_{\text{инд}}$), током i_1 в опоре ($U_{\text{инд}1}$) и током i_2 в тросах ($U_{\text{инд}2}$). Напряжения $U_{\text{инд}}$ и $U_{\text{инд}1}$ повышают напряжение, ложащееся на изоляцию. Итак, можно написать:

$$U_{\text{иэ}} = U_o + (U_{\text{инд}} + U_{\text{инд}1} - U_{\text{инд}2}).$$

Напряжение $U_{\text{инд}} + U_{\text{инд}1} = U_{\text{инд}}^*$ определяется в соответствии с формулой (3) и с учетом защитного действия тросов выражением

$$U_{\text{инд}}^* = ah_n \left[1 + 0,2 \left(\ln \frac{2vt_\phi}{h_m} + \gamma \frac{W_o}{60} \right) \right] (1 - k_\kappa).$$

Численные расчеты показывают, что для типовых конструкций металлических опор величина в квадратных скобках равна примерно двум и, следовательно, $U_{\text{инд}}^* \approx 2 ah_n (1 - k_\kappa)$.

Напряжение, индуцируемое на провода токами в тросах, $U_{\text{инд}2} = U_o k_\kappa = i_1 R_i k_\kappa$.

Подставляя $U_{\text{инд}}$, $U_{\text{инд}1}$ и $U_{\text{инд}2}$ в значение для $U_{\text{иэ}}$, находим упрощенную формулу:

$$U_{\text{иэ}} = (i_1 R_i + 2ah_n)(1 - k_\kappa). \quad (6)$$

Эта формула и может служить для расчета защитного уровня линий электропередачи. Смысл ее таков: на гирлянду действует напряжение, равное падению напряжения на заземлении опоры плюс индуцированное напряжение на проводе, которое в свою очередь слагается из равных по значению электрической и магнитной составляющих ($2ah = ah_s + ah_m$). Защитное действие тросов учитывается коэффициентом $(1 - k_\kappa)$.

Как указывалось, кривая индуцированного напряжения, а следовательно, и напряжение $U_{\text{иэ}}$ несколько смешается в сторону больших времен от кривой $a = \frac{di}{dt}$. Имея это в виду, следует, осторожности ради, подставлять в формулу (6) разрядное напряжение изоляции при полной волне, притом положительной полярности (положительные заряды на проводе).

При расчетном значении крутизны фронта тока молнии a , задаваясь импульсным коэффициентом заземлителя, определяем по формуле (6) ток в опоре i_1 . Защитный уровень линии или ток в канале молнии i_0 , вызывающий перекрытие изоляции, определяется по кривым рис. 9 (приложение 2). Предварительно определяется постоянная времени растекания токов в пролете $T = \frac{L}{R}$, где L — индуктивность тросов в пролете; R — сопротивление заземления, определяемое как среднее между R_0 и R_i .

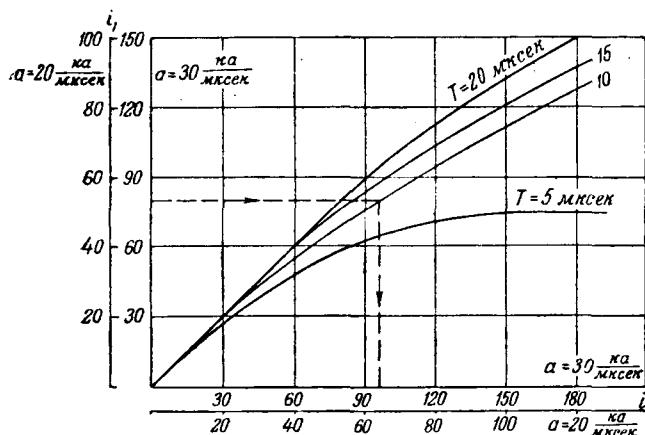


Рис. 9. Ток в опоре i_1 в зависимости от тока молнии i для разных значений постоянной времени T и крутизны фронта тока молнии a .

При высоких R_i полученное значение i_0 умножается еще на коэффициент $\frac{Z_0 + R_i}{Z_0}$, учитывающий возрастание тока молнии при поражении хорошо заземленного объекта.

При получении на основе специальных исследований зависимостей R_i в функции i во всем диапазоне токов i_1 , решение нелинейного уравнения (6) должно производиться графическим методом: строится кривая $i_1 R_i$ и по пересечению этой кривой со значением $\frac{U_{n3}}{1 - k_n} - 2ah_n$ определяется ток в опоре i_1 .

Анализ расчетной формулы (6) показывает, что для линий электропередачи с высокими и малыми защитными уровнями следует нормировать различные значения крутизны фронта тока молнии a . Этот вывод соответствует также статистическим данным измерения токов молний, показывающим, что с уменьшением амплитуд токов снижается и средневзвешенная крутизна фронта. Целесообразно принять $a = 30 \text{ ка/мксек}$ для линий 110 кв и выше и $a = 20 \text{ ка/мксек}$ для линий до 110 кв.

Пример. Определить защитный уровень линии электропередачи 110 кв на металлических опорах. Число элементов в гирлянде 7; сопротивление заземления 15 ом; длина пролета 200 м; линия защищена двумя тросами; средняя высота провода 10 м, тросов 15 м; коэффициент связи тросов с проводом (без учета короны) $k_0 = 0.25$.

Расчет защитного уровня базируется на соотношении (6). Расчетная крутизна косоугольного фронта волны тока молнии $a = 30 \text{ ка/мксек}$. Коэффициент связи трос-провод с учетом короны определяем, согласно [Л. 3], порядка $k_n = 1.1$, $k_0 = 0.275$ (напряжение волны меньше 1 000 кв). Импульсное разрядное напряжение гирлянды из семи элементов при полной волне $U_{n3} = 770 \text{ кв}$. Задаемся импульсным коэффициентом заземлителя при ожидаемом токе $i_1 > 10 \text{ ка}$, $a = 0.4$. Тогда $R_i = 15 \cdot 0.4 = 6 \text{ ом}$.

Определяем:

$$i_1 = \frac{1}{6} \left[\frac{780}{1 - 0.275} - 2 \cdot 30 \cdot 10 \right] \approx 80 \text{ ка.}$$

Находим постоянную времени T . Волновое сопротивление тросов в четырех направлениях $Z = 150 \text{ ом}$. Ин-

дуктивность тросов в пролете $L = \frac{150}{c} 200 = 100 \text{ мкг}$. Постоянная времени $T = \frac{L}{R_{cp}} \approx 10 \text{ мксек}$.

По кривым рис. 9 находим защитный уровень линии $i_0 \approx 100 \text{ ка}$.

Приложение 1. Уравнение (1) может быть переписано в виде $\frac{\partial U_q}{\partial x} + L \frac{di}{dt} = E_x$, которое приводится [Л. 3] к следующему неоднородному волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 U_q}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_q}{\partial t^2} = \frac{\partial E_x}{\partial x}; \quad (1,1)$$

здесь E_x — продольная составляющая напряженности индуцирующего электромагнитного поля, определяемая из общего соотношения

$$E = -\operatorname{grad} \varphi - \frac{\partial A}{\partial t}.$$

Рассмотрим раздельно электрическую и магнитную составляющие индуцированного напряжения. Для $U_{\text{инд.} \circ}$ пишем волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 U_q}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_q}{\partial t^2} = \frac{\partial E_x}{\partial t} = - \frac{\partial^2 U_{n3}}{\partial x^2}.$$

Перенося $\frac{\partial^2 U_{n3}}{\partial x^2}$ в левую часть и обозначая $U_{\text{инд.} \circ} = U_q + U_{n3}$, приходим к уравнению

$$\frac{\partial^2 U_{\text{инд.} \circ}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_{\text{инд.} \circ}}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U_{n3}}{\partial t^2}.$$

Искомая функция $U_{\text{инд.} \circ}$ имеет нулевые начальные условия. Область интегрирования: $-\infty < x < +\infty$. При этих условиях решение для $U_{\text{инд.} \circ}$ в точке $x = 0$ пишется в виде:

$$U_{\text{инд.} \circ} = \frac{1}{c} \int_0^{ct} dx \int_0^{t(1 - \frac{x}{ct})} \frac{\partial^2 U_{n3}}{\partial \tau^2} d\tau = \\ = \frac{1}{c} \int_0^{ct} dx \int_0^{t(1 - \frac{x}{ct})} \frac{\partial U_{n3}}{\partial \tau} d\tau.$$

На рис. 3 дана схема расчета $\frac{\partial U_{n3}}{\partial \tau}$. Канал молнии отстоит от линии на расстоянии b . Направляем канал молнии по оси $y = vt$. Упрощаем расчет, полагая, что вертикальная составляющая поля E_{y3} неизменна на высоте линии h , и следовательно, $U_{n3} = E_{y3} h$. Тогда

$$\frac{\partial U_{n3}(x, \tau)}{\partial \tau} = v \frac{\partial U_{n3}(x, y)}{\partial y} = vh \frac{\partial E_y(x, y)}{\partial y} = \frac{vh y \cdot 2 \cdot 9 \cdot 10^{11}}{[b^2 + x^2 + y^2]^{3/2}}.$$

Двойка учитывает зеркальное изображение канала молнии.

Подставляем $\frac{\partial U_{n3}}{\partial \tau}$ в значение для $U_{\text{инд.} \circ}$. Заменяя переменную $y = vt$, $x = c(t - \tau)$ и вводя $a = a * \tau$, находим:

$$U_{\text{инд.} \circ} = \int_0^t \frac{v^2 h a * \tau^2 d\tau \cdot 2 \cdot 9 \cdot 10^{11}}{[b^2 + c^2(t - \tau)^2 + v^2 \tau^2]^{3/2}}.$$

Этот интеграл равен:

$$U_{\text{инд.} \cdot \vartheta} = 60hv * \left\{ t \frac{(b^2 + c^2t^2)\sqrt{b^2 + v^2t^2} - \left[b^2 \left(2 + \frac{v^2}{c^2} \right) + v^2t^2 \right] \sqrt{b^2 + c^2t^2}}{(v^2 + c^2) \left[b^2 \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) + v^2t^2 \right] \sqrt{(b^2 + v^2t^2)(b^2 + c^2t^2)}} cv^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \ln \frac{v^2t + c \sqrt{b^2 + v^2t^2} - ct - \sqrt{b^2 + c^2t^2}}{v^2t - c \sqrt{b^2 + v^2t^2} - ct + \sqrt{b^2 + c^2t^2}} \right\}. \quad (1,2)$$

Для случая малых $v \ll ct$, vt и $1 + \frac{v^2}{c^2} \approx 1$ выражение (2) упрощается. Подставляя $\alpha^* = \frac{i}{vt_\phi}$, где i — ток молнии с фронтом длиной t_ϕ , находим:

$$U_{\text{инд.} \cdot \vartheta} = 60i \frac{h}{vt_\phi} \left[1 - \frac{v}{c} + \frac{v^2}{c^2} \ln \frac{1 + \frac{v}{c} 2 \cdot ct_\phi}{1 - \frac{v}{c} b} \right]. \quad (1,3)$$

Второй и третий члены в скобках малы по сравнению с первым и, как показывают численные расчеты, может быть использована формула

$$U_{\text{инд.} \cdot \vartheta} = 60i \frac{h}{vt_\phi} = ah, \quad (1,4)$$

где a — крутизна тока молнии, $\text{kA}/\text{мксек}$, $v = 1/\text{бс}$.

Напряжение, индуцированное магнитным полем тока, $U_{\text{инд.} \cdot m} = E_{y,m} h$, где $E_{y,m} = -\frac{\partial A}{\partial t}$ в том предположении, что вектор-потенциал A направлен по оси y (попрежнему полагаем, что $E_{y,m} = \text{const}$ на высоте линии h).

Для точки $x = 0$

$A = \int_{-\infty}^0 B(x) dx$ и, следовательно,

$$U_{\text{инд.} \cdot m} = h \int_{-\infty}^0 \frac{\partial B(x)}{\partial t} dx.$$

Проведем вначале расчет при движении по каналу прямоугольной волны. С учетом зеркального изображения

$$B = 2 \cdot 10^{-9} cv^2 \int_0^t \frac{x d\tau}{[v^2\tau^2 + b^2 + x^2]^{\frac{3}{2}}}.$$

Решаем интеграл

$$U_{\text{инд.} \cdot m} = 2 \cdot 10^{-9} cv^2 h \left(\frac{1}{(b^2 + v^2t^2)} \left(\sqrt{b^2 + v^2t^2} - \frac{b^2}{\sqrt{b^2 + c^2t^2}} \right) \right).$$

Пренебрегая вторым членом и заменяя $cv = i$, находим для косоугольной волны с фронтом t_ϕ и крутизной $a = \frac{i}{t_\phi}$ индуцированное напряжение в момент максимума тока

$$U_{\text{инд.} \cdot m} = 2 \cdot 10^{-9} vha \int_0^{t_\phi} \frac{d\tau}{\sqrt{b^2 + v^2\tau^2}} = \\ = 2 \cdot 10^{-9} ah \ln \frac{vt + \sqrt{v^2t^2 + b^2}}{b}. \quad (1,5)$$

Для малых b , пренебрегая b^2 перед v^2t^2 , находим окончательно

$$U_{\text{инд.} \cdot m} = 0,2ah \ln \frac{2vt}{b}. \quad (1,6)$$

Приложение 2. На рис. 8 приведена схема магнитных полей на пораженном участке. Ток молнии косоугольной формы считаем заданным. Индуктивности

$$L_1 = \frac{\Phi_1}{i_1} \left(= 60 \frac{h_T}{c} \ln \frac{h_T}{r_s} \right) \text{ и } L_2 = \frac{\Phi_2}{i_2} \left(= 60 \frac{l}{c} \ln \frac{2h_T}{r} \right).$$

Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , направленные взаимно противоположно, ограничиваются пределами контура $ABCD$. Следовательно, индуктивности L_1 и L_2 связаны общим магнитным потоком.

Пренебрегая падением напряжения в заземлении соседних опор, пишем по закону Кирхгофа $i_1 R - \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$. Кроме того, имеем $i_1 + i_2 = at$. Решая составленные уравнения, находим:

$$i_1 = a \frac{L_2}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2,1)$$

где

$$T = \frac{L_1 + L_2}{R} \approx \frac{L_2}{R}.$$

Для малых $\frac{t}{T}$, разлагая $e^{-\frac{t}{T}}$ в ряд и ограничиваясь тремя членами разложения, получаем:

$$i_1 = i \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{T} \right) = i\gamma; i_2 = i \frac{1}{2} \frac{t}{T} = i(1 - \gamma). \quad (2,2)$$

Подставляя $t = t_\phi$, определяем коэффициент γ при заданной длине фронта волны.

При заданной крутизне фронта тока молнии находим связь i и i_1 , решая уравнение $i_1 = at \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{T} \right)$ относительно t . Находим длину фронта волны, соответствующую току i_1 при заданной крутизне

$$t_\phi = T + \sqrt{T^2 - 2T \frac{i_1}{a}}, \quad (2,3)$$

и ток молнии $i = at_\phi$. По (2,3) строятся кривые рис. 8.

Интересно отметить, что согласно соотношению (2,3) максимально возможный ток в опоре $i_{1 \text{ макс}} = \frac{aT}{2}$. Линия, рассчитанная на этот ток, «абсолютно грозоупорна».

В формуле (2,1) сопротивление заземления R принималось постоянным. В действительности оно изменяется, а именно падает по мере увеличения тока i_1 . Поэтому постоянную $T = \frac{L_2}{R}$ следует определить, подставляя среднее значение между R_0 и R_i , где R_0 и R_i — сопротивления заземления без учета и с учетом импульсного коэффициента заземлителя при токе i_1 .

Литература

1. Руководящие указания по защите от перенапряжений установок переменного тока. Госэнергоиздат, 1946.
2. А. И. Долгинов. Волновые характеристики линий при высоких напряжениях. Электричество, № 9, 1949.
3. А. И. Долгинов. Индуцированные напряжения на линиях электропередачи, Электричество № 10, 1949. [27. 7. 1950]



Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя при учете насыщения

Кандидат техн. наук, доц. Н. В. ЧИСТОВ

Ивановский энергетический институт им. Ленина

В современных сильно использованных асинхронных двигателях, выполняемых с полуза-крытыми пазами статора и полузакрытыми или закрытыми пазами ротора, индуктивные сопротивления зависят от тока статора и связанного с ним насыщением зубчатого слоя. В основном это обусловлено изменением полей рассеяния, а частично связано с изменением главного магнитного потока.

На основании работ ряда советских авторов [Л. 1—5, 6—9] можно утверждать, что с достаточной для практики точностью индуктивное сопротивление рабочего контура $x_k = x_1 + \frac{x'_2}{c}$ в эквивалентной схеме рис. 1. изменяется одновременно с токами I_1 и I_2' по гиперболическому закону и может быть выражено уравнением:

$$x_k = x_{kn} \left(m + \frac{n}{s} \right), \quad (1)$$

где x_k — искомое индуктивное сопротивление с учетом насыщения;

x_{kn} — номинальное индуктивное сопротивление при $I_{1k} = I_{1n}$;
 m и n — постоянные для каждого двигателя коэффициенты;

s — скольжение.

Проанализируем уравнение (1) с целью установления метода определения значений постоянных коэффициентов m и n , входящих в это уравнение.

При скольжении $s = \infty$ индуктивное сопротивление $x_{ks} = \infty$ по уравнению (1) определяется выражением:

$$x_{ks} = \infty = x_{kn}m. \quad (2)$$

Рассматриваются эмпирические уравнения, дающие зависимости индуктивного сопротивления асинхронных двигателей с учетом насыщения вида $x_k = f(s)$ и $x_k = f(I_1)$, и приводятся методы расчетного и опытного определения постоянных коэффициентов, входящих в эти уравнения. Вводится понятие о граничном скольжении s_x , определяющем нагрузки, в пределах которых можно с достаточной для практики точностью пользоваться круговой диаграммой, построенной по номинальным параметрам.

Отсюда

$$m = \frac{x_{ks} = \infty}{x_{kn}}. \quad (3)$$

При скольжении $s = 1$ соответствующее индуктивное сопротивление

$$x_{ks=1} = x_{kn}(m + n). \quad (4)$$

Пользуясь уравнением (4) и (3), найдем значение коэффициента n :

$$n = \frac{x_{ks} = 1}{x_{kn}} - m = \frac{x_{ks} = 1 - x_{ks} = \infty}{x_{kn}}. \quad (5)$$

При отсутствии влияния насыщения индуктивное сопротивление x_k при любом скольжении может быть принято величиной постоянной и равной x_{kn} , следовательно:

$$m = \frac{x_{ks} = \infty}{x_{kn}} = 1, \quad (6)$$

$$n = \frac{x_{ks} = 1 - x_{ks} = \infty}{x_{kn}} = 0 \quad (7)$$

и

$$m + \frac{n}{s} = 1. \quad (8)$$

Приведенный нами метод определения постоянных коэффициентов m и n , входящих в уравнение (1), через индуктивные сопротивления x_{kn} , $x_{ks=1}$ и $x_{ks} = \infty$, дающий вполне

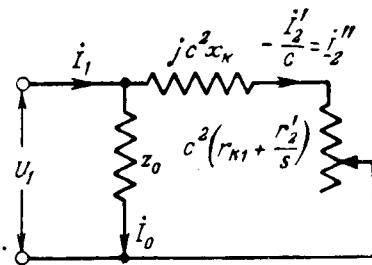


Рис. 1.

Значения индуктивных сопротивлений x_{kp} и $x_{k_2} = f(s)$ для двигателя АД-31/4

Таблица 1

s	0,01	0,03	0,0425	0,07	0,08	0,1	0,5	0,75	1,0	∞
x_{kp} , ом	15,05	11,45	10,95	10,21	10,14	9,9	7,08	6,76	6,63	6,29
x_{k_2} , ом	40,3	17,6	14,0	11,15	10,54	9,69	6,97	6,74	6,63	6,29
Δx_k , ом	-25,25	-6,15	-3,05	-0,94	-0,4	0,21	0,11	0,02	0	0
%	168	54	28	9,2	3,94	2,12	1,55	0,33	0	0

определенные значения этих коэффициентов, достаточно простой и позволяет определять индуктивные сопротивления асинхронной машины для всего диапазона скольжения, от $s = s_x$ до $s = \infty$.

Пример. Пользуясь расчетными значениями¹ индуктивных сопротивлений x_{kp} , $x_{k_2} = 1$ и $x_{k_2} = \infty$, определим постоянные коэффициенты m и n уравнения (1) для двигателя завода „Электросила“ АД-31/4, $P = 2,2$ квт, $U_1 = 220/380$ в, $I_1 = 8,3/4,8$ а, статор Δ/λ , ротор короткозамкнутый, $n = 1500$ об/мин, $f = 50$ гц. Согласно уравнений (3) и (5) получим $m = 0,575$ и $n = 0,031$.

В табл. 1 приводятся значения индуктивных сопротивлений, полученные расчетным путем, и значения индуктивных сопротивлений x_{k_2} , полученные по уравнению (1) для двигателя АД-31/4.

Данные таблицы показывают, что индуктивные сопротивления x_{kp} и x_{k_2} резко расходятся в своих значениях при малых скольжениях. В данном случае при $s = 0,01$ разница в значениях x_{kp} и x_{k_2} , $\Delta x_k = 25,25$ ом, что составляет 168% от x_{kp} . Из этой таблицы следует, однако, что, начиная с какого-то скольжения s_x , в данном случае превосходящего 0,07, расхождение в значениях x_{kp} и x_{k_2} лежит в практически допустимых пределах. Таким образом, приходим к выводу, что определение индуктивных сопротивлений x_{k_2} по уравнению (1) возможно для нагрузок двигателя, соответствующих скольжениям s , превосходящим скольжение s_x . При скольжениях s , меньших скольжения s_x , как показывают исследования [Л. 2, 8], при определении рабочих характеристик в этом диапазоне скольжений можно пользоваться номинальным значением индуктивного сопротивления x_{kp} . Это объясняется частичной взаимной компенсацией изменений индуктивных сопротивлений рабочего контура x_k и намагничивающей ветви x_0 , а главным образом тем, что при малых скольжениях преобладающее значение будет иметь активное сопротивление $\frac{r_2}{s}$.

Из сказанного выше следует, что при определении рабочих характеристик асинхронного

двигателя при нагрузках, соответствующих скольжениям s , меньшим скольжения s_x , можно пользоваться с достаточной для практики точностью номинальным значением индуктивного сопротивления x_{kp} . При скольжениях s , превосходящих скольжения s_x , необходимо учитывать влияние насыщения на индуктивное сопротивление и брать значение x_k , соответствующее данному скольжению. Поэтому скольжение s_x мы назовем *пограничным скольжением*.

По уравнению (8) легко определить предельное значение скольжения $s = s_x$ при нагрузках, до которого можно пользоваться номинальным значением индуктивного сопротивления x_{kp} . Это скольжение s_x и будет пограничным скольжением. Оно определится уравнением:

$$s_x = \frac{n}{1-m} = \frac{x_{k_2} = 1 - x_{k_2} = \infty}{x_{kp} - x_{k_2} = \infty}. \quad (9)$$

Для двигателя АД-31/4 значение пограничного скольжения $s_x = 0,073$. Уравнение (1) дает положительные результаты и для двигателя с полузакрытыми пазами ротора.

В табл. 2 приводятся расчетные значения¹ индуктивных сопротивлений с учетом насыщения x_{kp} для двигателя АД-31/4, отверстия паза ротора которого имеют ширину 1,0 мм.

Таблица 2

Расчетные значения индуктивных сопротивлений двигателя АД-31/4 ($x_{kp} = 9,35$ ом; отверстие паза ротора 1 мм)

s	0,085	0,1	0,25	0,5	1,0	∞
x_{kp}	9,35	9,11	7,54	6,55	6,22	5,93
x_{k_2}	9,35	8,83	7,09	6,51	6,22	5,93
Δx_k	0	0,28	0,45	0,04	0	0
%	0	3,1	6,0	0,6	0	0

По данным табл. 2 определяем постоянные коэффициенты m и n по уравнениям (3,5) и пограничное скольжение s_x по уравнению (9). Значения их будут: $m = 0,635$, $n = 0,031$ и $s_x = 0,085$. Эта таблица также подтверждает, что и в случае открытия паза ротора максимальное расхождение в значениях индуктивных сопротивлений x_{kp} , определенных расчетным путем¹, и x_{k_2} по уравнению (1) составляет всего лишь 6%.

¹ Расчетные значения, упомянутые здесь и везде ниже, заимствованы нами из „Заводских расчетов асинхронных электродвигателей“ под общей редакцией Б. И. Кузнецова, Р. А. Лютера, Н. Баранча, 1949 г.

Это расхождение повлечет за собой расхождение в значениях токов статора не больше чем на 0,6 %. Таким образом, предлагаемый нами метод определения индуктивных сопротивлений с учетом насыщения по уравнению (1) пригоден как для закрытых, так и для полузакрытых пазов ротора.

Значения постоянных коэффициентов m и n уравнения (1) и пограничное скольжение s_x могут быть найдены также и опытным путем. Опытное определение коэффициентов m и n пограничного скольжения s_x приводится в приложении 1.

Перейдем к рассмотрению зависимости индуктивного сопротивления с учетом насыщения x_k от тока статора I_1 . Произведенные исследования [Л. 4, 7, 8] подтверждают, что зависимость индуктивного сопротивления от тока статора имеет также гиперболический характер и может быть выражена уравнением:

$$x_k = x_{kn} \left(a + \frac{b}{I_1} \right), \quad (10)$$

где x_k — искомое индуктивное сопротивление с учетом насыщения;

x_{kn} — номинальное индуктивное сопротивление при $I_{1k} = I_{1n}$;

I_1 — ток статора, для которого определяется индуктивное сопротивление x_k ;

I_{1n} — номинальный ток статора;

a и b — постоянные для каждого двигателя коэффициенты.

Значения постоянных коэффициентов a и b уравнения (10) определяем, решая совместно уравнения (11) и (12):

$$x_{ks} = x_k \left(a + \frac{b}{I_{1x}} \right) \quad (11)$$

и

$$x_{ks=1} = x_{kn} \left(a + \frac{b}{I_{1ks=1}} \right). \quad (12)$$

Считая, что при нагрузках двигателя вплоть до пограничного скольжения s_x выражение

$$\left[a + \frac{b}{I_{1x}} \right] = 1, \quad (13)$$

можно принять $x_{ks=s_x} = x_{kn}$.

Для двигателя АД-31/4 значения постоянных коэффициентов a и b уравнения (10) будут: $b = 0,822$ и $a = 0,452$.

В табл. 3 приводятся значения индуктивных сопротивлений x_{kp} , определенные расчетным путем¹, и значения индуктивных сопротивлений x_{ks} по (10).

Табл. 3 показывает почти полное совпадение значений индуктивных сопротивлений x_{kp} и x_{ks} .

Таблица 3
Значения индуктивных сопротивлений

$$x_{kp} \text{ и } x_{ks} = f \left(\frac{I_1}{I_{1n}} \right)$$

s	0,073	0,1	0,5	0,75	1,0	∞
I_1	7,5	9,2	22,1	25,0	26,6	32,2
x_{kp}	10,95	9,9	7,03	6,76	6,63	6,29
x_{ks}	10,95	9,8	6,96	6,73	6,63	6,33

Введение понятий о пограничном скольжении асинхронного двигателя s_x и установление методов расчетного и опытного его определения решает вопрос об области применения круговой диаграммы, построенной по номинальным параметрам, при исследовании рабочих свойств асинхронного двигателя, а также позволяет по трем значениям сопротивлений: x_{kn} , $x_{ks=1}$ и $x_{ks=\infty}$, определяемых расчетным или опытным путем, легко находить x_k с учетом насыщения для всего диапазона скольжений от $s=s_x$ до $s=\infty$, пользуясь (1) или (10).

Приложение 1. Опытное определение коэффициентов m и n и скольжения s_x для двигателя АД-31/4.

Производим опыт короткого замыкания асинхронного двигателя и на основании опытных данных строим кривую $x_k = f(I_{1k})$ (рис. 2). По кривой определяем, что при $I_{1k}=4,8$ а, $x_{kn}=10$ ом. Снимаем опытную точку короткого замыкания асинхронного двигателя при $U_k=U_n$ и определяем $x_{ks=1}=6,06$ ом и $I_{1ks=1}=27$ а.

Из опыта холостого хода при $U_0=U_n$ находим $I_{10}=-2,2$ а, $P_0=142,5$ вт. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания при $I_{1k}=I_{1n}$ строим круговую

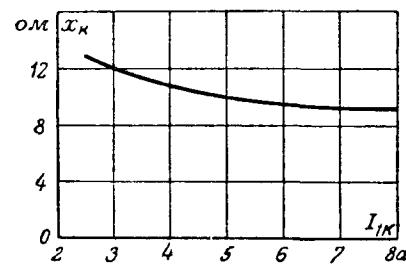
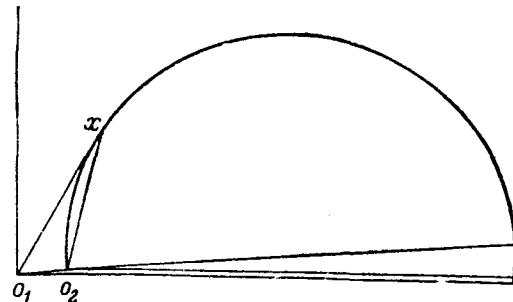


Рис. 2.



диаграмму¹ рис. 3. Данные для построения круговой диаграммы: $U_{1n}=220$ в, $I_0=2,2$ а, $x_1=4,63$ ом, $r_{1750}=3,52$ ом, $P_0=142,5$ вт. Из круговой диаграммы рис. 3

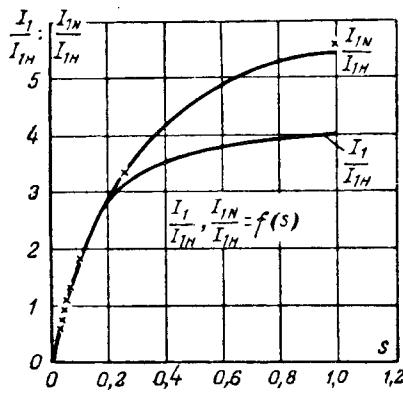


Рис. 4.

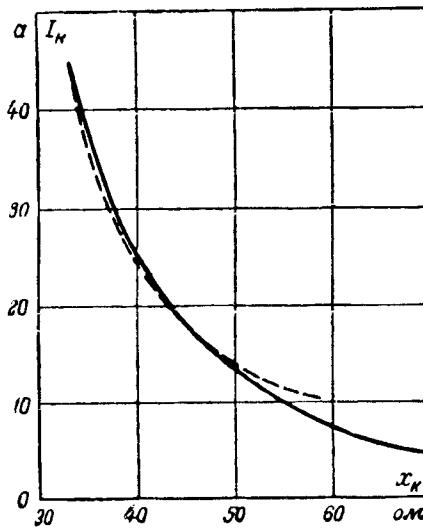


Рис. 5.

определяем ток статора I_{1x} , соответствующий максимальному значению $\cos \varphi_1$. Вектор 0_1x , касательный к окружности токов, и будет током I_{1x} , соответствующим пограничному скольжению $s_x \cdot I_{1x} = 7,5 \text{ а.}$

Значение пограничного скольжения

$$s_x = \frac{r'_2}{\sqrt{\frac{U_{1H}^2}{I_{1x}^2} - x_{ks}^2}} = s_x = \frac{r_1}{r_2} = 0,082.$$

Для данного двигателя $r'_2 = 2 \text{ ом}$, $r_{1750} = 3,52 \text{ ом}$, $I_{1x} = 7,5 \text{ а.}$ При токе статора $I_1 = I_{1x} = 7,5 \text{ а}$ находим по опытной кривой рис. 2 $x_{ks} = s_x = 8,8 \text{ ом}$; тогда $s_x = 0,082$.

По уравнению (9) при $s = \infty$ индуктивное сопротивление $x_{ks} = \infty = 5,75 \text{ ом}$. По уравнению (3) и (5) находим $m = 0,572$ и $n = 0,034$. Таким образом получаем почти полное тождество в значениях s_x , m и n , определяемых расчетным и опытным путем.

На рис. 4 приведены кривая тока статора I_1 двигателя АД-31/4 без учета влияния насыщения, подсчитанного по постоянному значению индуктивного сопротивления x_{kn} , и кривая тока статора I_{1N} с учетом влияния насыщения, подсчитанного по индуктивным сопротивлениям, определяемым по уравнению (1). Опытные точки показаны крестиками.

Приложение 2. Для сравнения опытных значений индуктивных сопротивлений x_{ks} с индуктивными сопротивлениями x_{kn} , определенными по уравнениям (1), (10), приводим данные для ряда двигателей.

Двигатель завода „Ревтруд“ ТАГ-21-4, $P = 1 \text{ квт}$, $U_1 = 380/220 \text{ в}$, $I_1 = 3,72/2,15 \text{ а}$, $f = 50 \text{ гц}$, ротор коротко-

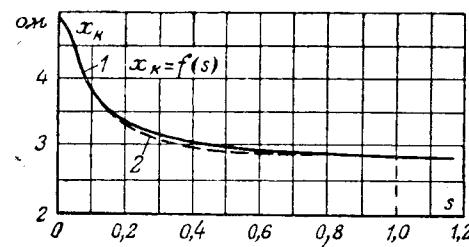


Рис. 6.

замкнутый, $n = 1500 \text{ об/мин}$. Опытные данные [Л. 4]: $I_{1N} = 3,72 \text{ а}$, $x_{kn} = 22 \text{ ом}$, $I_{1x} = 23,9 \text{ а}$, $x_k = 11,75 \text{ ом}$. Учитывая малую мощность двигателя, принимаем $I_{1x} = I_{1N}$. Пользуясь опытными данными, решаем уравнения (11), (12) и определяем: $b = 0,552$, $a = 0,448$. В табл. 4 приведены значения x_{ks} и x_{kn} .

Таблица 4

$I_1, \text{ а}$	3,72	4,5	4,89	8,29	12,8	17,15	20,5	23,9
$x_{ks}, \text{ ом}$	22,0	20,1	19,5	16,2	13,7	12,6	12,0	11,75
$x_{kn}, \text{ ом}$	22,0	19,9	19,0	15,3	13,4	12,5	12,0	11,75

Двигатель серии „Урал“ $P = 4,2$. Ротор короткозамкнутый с закрытым пазом. Данные заводского испытания [Л. 7]: $I_{1N} = 8 \text{ а}$, $x_{kn} = 5,9 \text{ ом}$, $I_{1x} = 45 \text{ а}$, $x_k = 3,3 \text{ ом}$. Принимая $I_{1x} = 1,3 I_{1N}$, находим $b = 0,745$ и $a = 0,427$. На рис. 5 нанесены опытная кривая $I \cdot x_{ks} = f(I_{1x})$ и кривая $2 \cdot x_{kn} = f(I_{1x})$.

Двигатель $P = 4,8 \text{ квт}$, $U_1 = 380/220 \text{ в}$, $f = 50 \text{ гц}$, $n = 1440 \text{ об/мин}$. Ротор короткозамкнутый. Опытные данные [Л. 9]: $I_{1N} = 64,5 \text{ а}$, $x_k = 2,89 \text{ ом}$. По опытной кривой I рис. 6 при $s_n = 0,04$, $x_{kn} = 4,5 \text{ ом}$. Принимаем пограничное скольжение $s_x = 0,1$ и $x_{ks} = s_x = 3,8 \text{ ом}$. Решая совместно уравнения $x_{ks} = s_x = x_{kn} \left(m + \frac{n}{s_k} \right)$ и $x_{ks} = x_{kn} (m + n)$, находим $n = 0,0224$ и $m = 0,62$. Значения x_{kn} по уравнению (1) нанесены на рис. 6, кривая 2.

Как видно из приведенных примеров, наблюдается почти полное совпадение значений x_{ks} и x_{kn} .

Литература

- Б. П. Апаров. О влиянии насыщения на работу асинхронных двигателей. Труды ГЭЭИ, вып. 1924.
- Б. П. Апаров. О диаграммах тока асинхронных машин. Сборник статей по энергетике № 7 и № 8, МЭИ, 1934.
- Л. М. Пиотровский. Диаграмма токов индукционного двигателя с переменным индуктивным сопротивлением. Электричество, № 14, 1937.
- Л. М. Пиотровский. Индукционный двигатель с переменными параметрами. Монография, 1937.
- Б. П. Апаров. Рабочий процесс асинхронного двигателя с учетом насыщения. ВЭП, № 7, 1940.
- Д. М. Пиотровский. Геометрическое место токов асинхронной машины с переменным насыщением стали. Электричество, № 2, 1946.
- Э. Д. Кравчик. Влияние насыщения от полей рассеяния на свойства малых асинхронных двигателей. ВЭП, № 9, 1946.
- Н. В. Чистов. Исследование рабочих характеристик асинхронных двигателей с учетом насыщения. Диссертация. Ивановский энергетический институт, 1947.
- Г. Н. Петров. Влияние насыщения на характеристики и диаграмму тока асинхронной машины. Электричество, № 12, 1948. [27. 7. 1950]



Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения

Кандидат техн. наук А. А. ЭФЕНДИ ЗАДЕ

Энергетический институт им. Кржижановского

Известная аналитическая зависимость между моментом асинхронного двигателя и его скольжением

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(1+\epsilon)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2\epsilon}, \quad (1)$$

справедлива для асинхронного двигателя с постоянными параметрами $r_2 = \text{const}$ и $x_2 = \text{const}$.

Автор предлагает аналитическое выражение зависимости момента асинхронного двигателя от скольжения в более общей форме, справедливо как для двигателя с глубоким пазом, так и для двигателя с постоянными параметрами.

Зависимость имеет вид:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(1+\epsilon+z)}{\frac{s}{s_m}\epsilon^2\varphi(s) + \frac{s_m}{s}r(s) + 2\epsilon},$$

где

$$\epsilon = s_m \frac{R_1}{R_2}; \quad \varphi(s) = \frac{1+x_\kappa^2[x(s)]^2}{r(s)};$$

$$z = s_m \frac{aR_n}{R_2}; \quad r_n = \frac{R_n}{R_2};$$

$$r(s) = 1 + r_n(k_r - 1); \quad x_n = \frac{X_n}{X_\kappa};$$

$$x(s) = 1 - x_n(1 - k_x); \quad x_\kappa = \frac{X_\kappa}{R_1}.$$

Остальные обозначения пояснены в конце статьи.

Для машины с постоянными параметрами:

$$k_r = k_x = 1; \quad r(s) = 1;$$

$$a = 0; \quad x(s) = 1;$$

$$z = 0; \quad \epsilon^2\varphi(s) = 1.$$

Предлагается зависимость между моментом, развиваемым асинхронным двигателем, и скольжением. Соотношение справедливо как для двигателя с глубоким пазом, так и для двигателя с постоянными параметрами.

Подставив эти значения, получим:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(1+\epsilon)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2\epsilon},$$

что тождественно с известным в литературе уравнением.

Приложение. Предложенная нами зависимость получена для следующих условий:

1. В основу принятая уточненная схема замещения двигателя с глубоким пазом с вынесенным намагничивающим контуром, предложенная М. П. Костенко¹.

2. Значения коэффициентов активного и индуктивного сопротивлений ротора, учитывающих вытеснение тока в обмотках, заложенных в пазы активной стали, приняты по кривым, аппроксимирующими выражения для k_r и k_x .

Вращающий момент асинхронного двигателя согласно принятой схеме:

$$M = \frac{m_2 R_2 I_2^{n^2}}{s} = \frac{m_2 (R_n k_r + R_\theta) I_2^{n^2}}{s}$$

или

$$M = \frac{k (R_n k_r + R_\theta)}{s \left[\left[R_1 + \frac{R_n k_r + R_\theta}{s} \right]^2 + [X_1 + X_\theta + X_n k_x]^2 \right]}, \quad (1)$$

где k_r — коэффициент, учитывающий возрастание активного сопротивления при изменении частоты во вторичной цепи двигателя или скольжения; k_x — коэффициент, учитывающий уменьшение индуктивного сопротивления ротора.

Коэффициенты k_r и k_x определяются следующим образом:

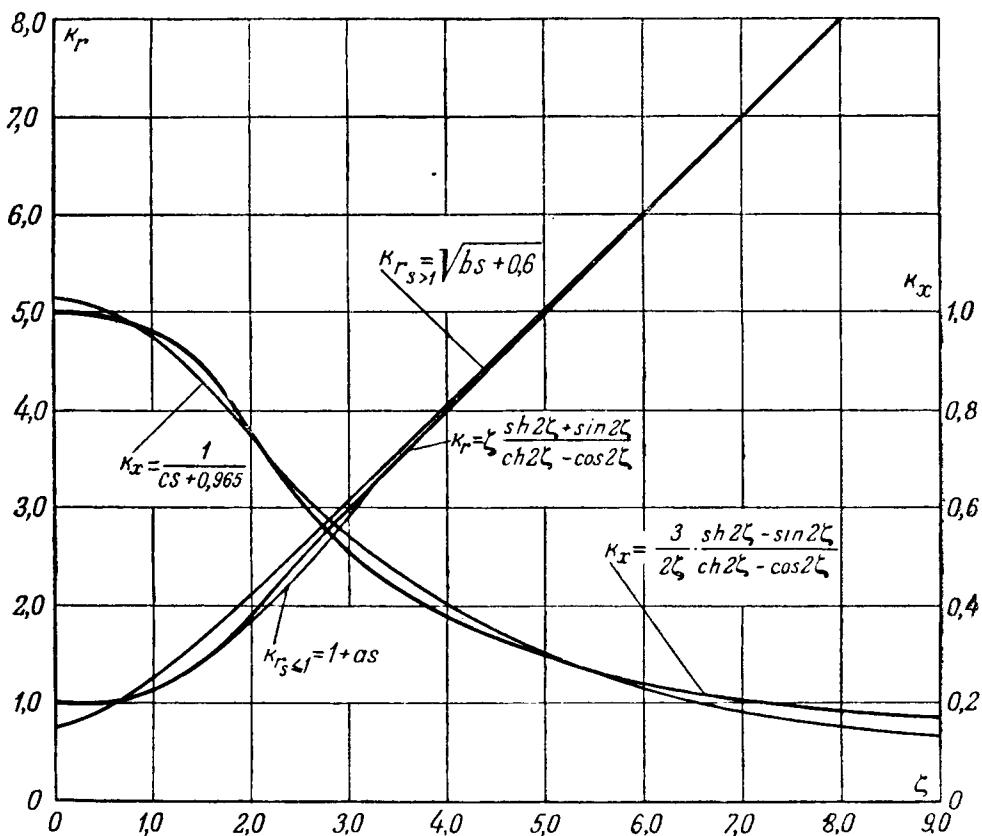
$$k_r = \zeta \frac{\sin 2\zeta + \sin 2\zeta}{\cosh 2\zeta - \cos 2\zeta},$$

$$k_x = \frac{3}{2\zeta} \frac{\sin 2\zeta - \sin 2\zeta}{\cosh 2\zeta - \cos 2\zeta};$$

здесь

$$\zeta = k'_a h \sqrt{\frac{b}{b_n} \cdot \frac{f_1 s}{\rho}} = k_a \sqrt{s}.$$

¹ М. П. Костенко. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1949.



На рисунке приведены кривые, построенные по этим выражениям. На этом же рисунке даны кривые, построенные по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} k_{r,s < 1} &= 1 + as, \\ k_{r,s > 1} &= \sqrt{bs + 0.6}, \\ k_x &= \frac{1}{cs + 0.965}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$a = 0.215 k_a^2; b = k_a^2; c = 0.0965 k_a^2.$$

При выводе уравнения, дающего зависимость между моментом и скольжением, пользуемся формулами (2).

Для определения максимального момента и скольжения, соответствующего этому моменту, дифференцируем выражение (1) по s . При этом, виду того, что M_m имеет место при $s < 1$, пользуемся выражением для $k_{r,s < 1} = 1 + as$.

$$M = \frac{k(R_2 + aR_n s)}{s \left\{ \left[(R_1 + aR_n) + \frac{R_2}{s} \right]^2 + [X_k + X_n(1 - k_x)]^2 \right\}},$$

где $R_2 = R_n + R_b$.

Дифференцируем M и определяем из $\frac{dM}{ds} = 0$ максимальное скольжение

$$s_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2} - R_n a}. \quad (3)$$

При этом было учтено, что в области $s = s_m$, $k_x \approx 1 = \text{const}$.

Подставим значение s_m из (3) в выражение для M , получим для максимального момента:

$$M_m = \frac{k}{2(\sqrt{R_1^2 + X_k^2} + R_1)}. \quad (4)$$

Беря отношение $\frac{M}{M_m}$ и производя некоторые преобразования, находим предложенную нами зависимость (1) момента от скольжения:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(1 + \varepsilon + x)}{\frac{s}{s_m} \varepsilon^2 \varphi(s) + \frac{s_m}{s} r(s) + 2z}.$$

Обозначения

M — момент, соответствующий произвольно заданному скольжению s ;
 M_m — наибольший момент, соответствующий скольжению s_m ;

s — скольжение асинхронного двигателя;
 s_m — максимальное скольжение, соответствующее опрокидывающему моменту;

R_2 — приведенное к статору активное сопротивление ротора;
 R_n — активное сопротивление пазовой части обмотки ротора;

R_b — неизменное по величине активное сопротивление лобовой части обмотки ротора;
 R_1 — активное сопротивление обмотки статора;

X_k — полное индуктивное сопротивление машины;
 k_r — коэффициент, учитывающий увеличение омического сопротивления вследствие вытеснения тока;

k_x — коэффициент, учитывающий уменьшение индуктивного сопротивления обмотки ротора вследствие вытеснения тока;

I''_2 — приведенный к статору ток ротора.

[27. 7. 1950]



Механические характеристики двигателя в системе генератор-двигатель с обратными связями

Инж. В. Г. СОЗОНОВ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Широкое распространение получили системы электропривода, использующие для получения специальных характеристик двигателя обратные связи, осуществляемые специальными обмотками возбуждения, расположенными или непосредственно на полюсах генератора или на полюсах

воздушителя генератора. Такие системы применяются для привода стола крупных продольно-строгальных станков, экскаваторов, вспомогательных механизмов прокатных станов — линеек манипуляторов, нажимных устройств, ножниц. В некоторых случаях в этих системах в качестве воздушителя генератора используется электромашинный усилитель.

Эти системы привода позволяют получить характеристики двигателя типа экскаваторной, дающей надежное токоограничение и жесткие характеристики, необходимые для достижения широкого диапазона регулирования скорости.

При проектировании подобных систем электропривода необходимо по заданным параметрам системы находить механическую характеристику двигателя или по заданной механической характеристике отыскать параметры системы.

Ниже дается способ построения механических характеристик двигателя, позволяющий анализировать влияние параметров системы на вид характеристик.

Графический способ построения механических характеристик. Рассмотрим способ построения характеристик на примере системы генератор — двигатель (рис. 1) с возбудителем генератора *ТВ*, имеющим три обмотки возбуждения: независимую *НОВ*, шунтовую *ШОВ*, включенную согласно с обмоткой независимого возбуждения, и серийную *СОВ*, включенную встречно первым двум обмоткам. Такая система дает возможность получить характеристики двигателя экскаваторного типа.

Рассматривается графический метод построения механических характеристик двигателя при питании его от генератора, цепи возбуждения (или цепи возбудителя) которого связаны с главной цепью. На примере системы электропривода с трехобмоточным возбудителем и электромашинным усилителем в качестве возбудителя показан метод построения характеристик по предлагаемому способу. Также рассматривается вопрос об определении параметров системы по заданной механической характеристике двигателя. Предлагаемый метод применен и при наличии различного рода нелинейностей.

Уравнение результирующих ампервитков в^озбудителя:

$$F = F_u + F_w - F_o \quad (1)$$

где F_n — намагничивающая сила (н. с.) независимой обмотки возбуждения; F_w — шунтовой; F_c — серийной обмотки. Так как

$$F_{uu} = \frac{w_u}{r_u} U_z = k_u U_z; \quad F_c = \frac{R_s}{r_c} w_c I = k_c J;$$

$$U_z = E_\theta + IR_\theta = C_e n + IR_\theta,$$

то уравнение (1) напишется в виде:

$$F = F_s + k_w C_e n - I(k_c - k_w R_d). \quad (2)$$

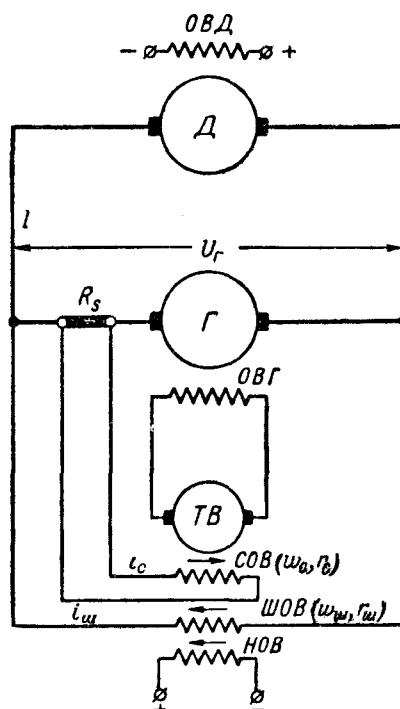


Рис. 1.

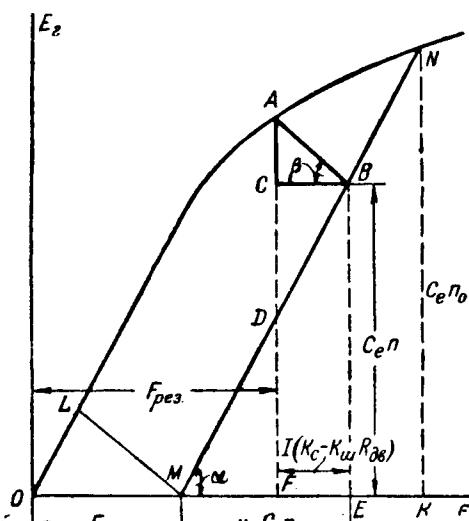


Рис. 2.

В этих уравнениях: U_2 — напряжение генератора между точками присоединения шунтовой обмотки возбудителя, I — ток главной цепи, E_{an} — э. д. с. и скорость вращения двигателя, R_d — сопротивление якоря двигателя, C_e — коэффициент пропорциональности между э. д. с. и скоростью вращения двигателя. Остальные обозначения понятны из рис. 1.

Для построения характеристик используется уравнение (2).

Строится зависимость для э. д. с. генератора E_2 в функции н. с. возбудителя (рис. 2). На оси ампервитков откладываются н. с. независимого возбуждения F_n (отрезок OM). Из точки M под углом α к оси абсцисс проводится прямая MN до пересечения с кривой $E_2=f(F)$.

$$\operatorname{tg} \alpha \frac{1}{k_w} = \frac{r_w}{w_w}.$$

Оордината какой-либо точки прямой MN будет $C_e n$. Например, для точки B : $BE=ME$, $\operatorname{tg} \alpha = -k_w C_e n \frac{1}{k_w} = C_e n$. Построив для этой точки реактивный треугольник ABC со сторонами $BC = -I(k_c - k_w R_d)$ и $AC = IR_0$, где ($R_0 = R_s + R_d$), найдем отрезок AB , величина которого пропорциональна току главной цепи.

Следовательно, построение механических характеристик можно вести с помощью указанного реактивного треугольника, подобно тому, как это делается при построении внешней характеристики генератора с несколькими обмотками возбуждения [Л. 1].

При практическом построении необходимо реактивный треугольник строить по углу β , для которого

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R_0}{k_c - k_w R_d},$$

и затем, задаваясь точкой $C_e n$ прямой MN , следует провести из нее прямую, параллельную

гипотенузе реактивного треугольника, до пересечения с $E_2=f(F)$, что даст отрезок, пропорциональный току главной цепи.

Скорость идеального холостого хода определяется точкой пересечения прямой MN с кривой $E_2=f(F)$ (ордината KN), ток короткого замыкания двигателя — отрезком ML , проведенным из точки M параллельно гипотенузе реактивного треугольника.

В тех случаях, когда необходимо учесть изменение сопротивлений R_s , R_s и R_d при изменении тока в главной цепи, описанным выше методом неудобно пользоваться, так как стороны реактивного треугольника не будут изменяться пропорционально друг другу при изменении тока главной цепи. Следовательно, для каждого значения скорости двигателя потребуется построить новый реактивный треугольник.

В этих случаях удобнее пользоваться другим методом, основанным на следующем.

Разность ординат между кривой $E_2=f(F)$ и прямой MN , например (рис. 2),

$$AD = AC + CD = AC + BC \operatorname{tg} \alpha = \\ = IR_0 + I(k_c - k_w R_d) \frac{1}{k_w} = I \left(\frac{k_c}{k_w} + R_s \right).$$

Имея зависимости $I \left(\frac{k_c}{k_w} + R_s \right)$ и IR_0 в функции тока главной цепи (их следует нанести на чертеж), можно отыскать для данной разности ординат величину IR_0 , которая откладывается от соответствующей точки на кривой $E_2=f(F)$ (для которой находилась разность ординат) вниз. Отрезок до оси абсцисс дает $C_e n$.

Пример. В целях иллюстрации метода покажем, как нужно вести построения характеристик для системы электропривода, изображенной на рис. 3. В этой системе возбудителем генератора служит электромашинный усилитель ЭУ, имеющий три обмотки возбуждения: независимую НOB, шунтовую ШOB и серийную СOB. Система обеспечивает получение жестких характеристик двигателя до определенной нагрузки, после которой, вследствие токовой отсечки скорость двигателя падает при незначительном изменении тока главной цепи. До отсечки тока справедливо следующее уравнение н. с. электромашинного усилителя:

$$F = F_n - F_w; \quad (3)$$

после отсечки тока

$$F = F_n - F_w - F_c. \quad (4)$$

Так как

$$F_w = i_w w_w = \frac{w_w}{r_w} U_2, \quad F_c = i_c w_c = \frac{IR_s - U_s}{r_c} w_c$$

(r_c включает в себя сопротивление купроксного выпрямителя), то уравнение (4) напишется в виде:

$$F = F_n - \frac{w_w}{r_w} U_2 - \frac{IR_s - U_s}{r_c} w_c. \quad (5)$$

В координатной сетке построим зависимость $E_2 = f(F_{gy})$ э. д. с. генератора от н. с. электромашинного усилителя (рис. 4).

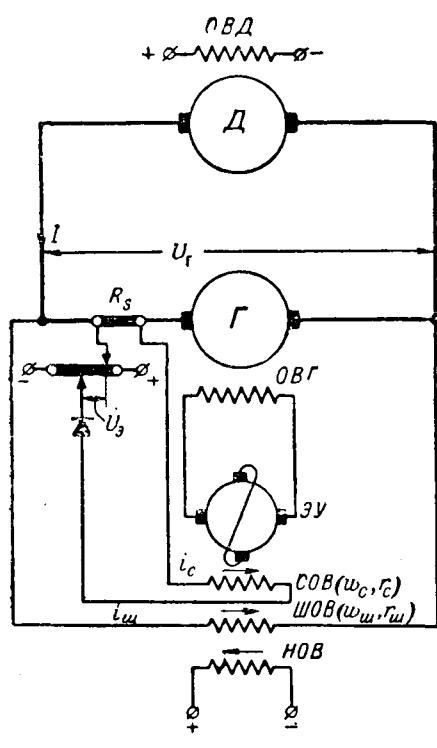


Рис. 3.

Из точки M ($OM = F_h$) проведем прямую MN под углом α к оси абсцисс, причем $\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_w}{w_w}$. Прямая MN в этом построении будет наклонена в другую сторону, чем на рис. 2, так как в данном случае шунтовая обмотка электромашинного усилителя включена встречно независимой обмотке возбуждения. Пользуясь изложенным методом доказательства, на основании уравнения (5) можно показать,

что разность ординат между кривой $E_2 = f(F_{by})$ и прямой MN равна

$$IR_2 - \frac{IR_s - U_2}{r_c w_w} r_w w_c.$$

Нанесем это выражение в координатной сетке E_δ , I в функции тока главной цепи I с учетом всех нелинейностей. В частности, нелинейны вольтамперная характеристика купроксного выпрямителя, сопротивление главной цепи машин и пр.

До значения тока, соответствующего току отсечки I_{kp} , второй член этой зависимости равен нулю. На этом участке зависимость будет представлять собой падение напряжения на сопротивлении R_2 от тока главной цепи. После тока отсечки второй член будет возрастать и кривая пойдет вниз. Крутизна кривой будет зависеть от параметров обратной связи по току.

В этих же осях нанесем зависимость $IR_0 = f(I)$, которая в общем случае может быть криволинейной. В нашем, частном, случае это прямая линия. Для того чтобы отыскать скорость идеального холостого хода, необходимо точку пересечения кривой $E_2 = f(F_{by})$ и прямой MN снести на ось $C_e n$.

Для построения участка характеристики, соответствующего работе двигателя при токах, меньших тока отсечки, необходимо по разности ординат между $E_2 = f(F)$ и прямой MN (например, по отрезку AD) найти I по кривой $IR_2 = f(I)$ (отрезку AD на рис. 4 соответствует ток I_1), затем по $IR_0 = f(I)$ найти IR_0 и полученную величину отложить от точки A вниз (AC), тогда CF даст $C_e n = E_\delta$.

Поступая таким же образом для других разностей ординат, найдем характеристику двигателя от точки идеального холостого хода до точки, соответствующей току отсечки I_{kp} . При этом будет найдена также E_{2kp} и F_{kp} , соответствующие току отсечки. Из рисунка видно, что э. д. с. генератора при работе двигателя на участке от $I = 0$ до $I = I_{kp}$ возрастает, и характеристика двигателя будет иметь при этом повышенную жесткость. Однако характеристика не может быть абсолютно жесткой. Жесткость характеристики в большой степени зависит от соотношения сопротивлений двигателя и генератора.

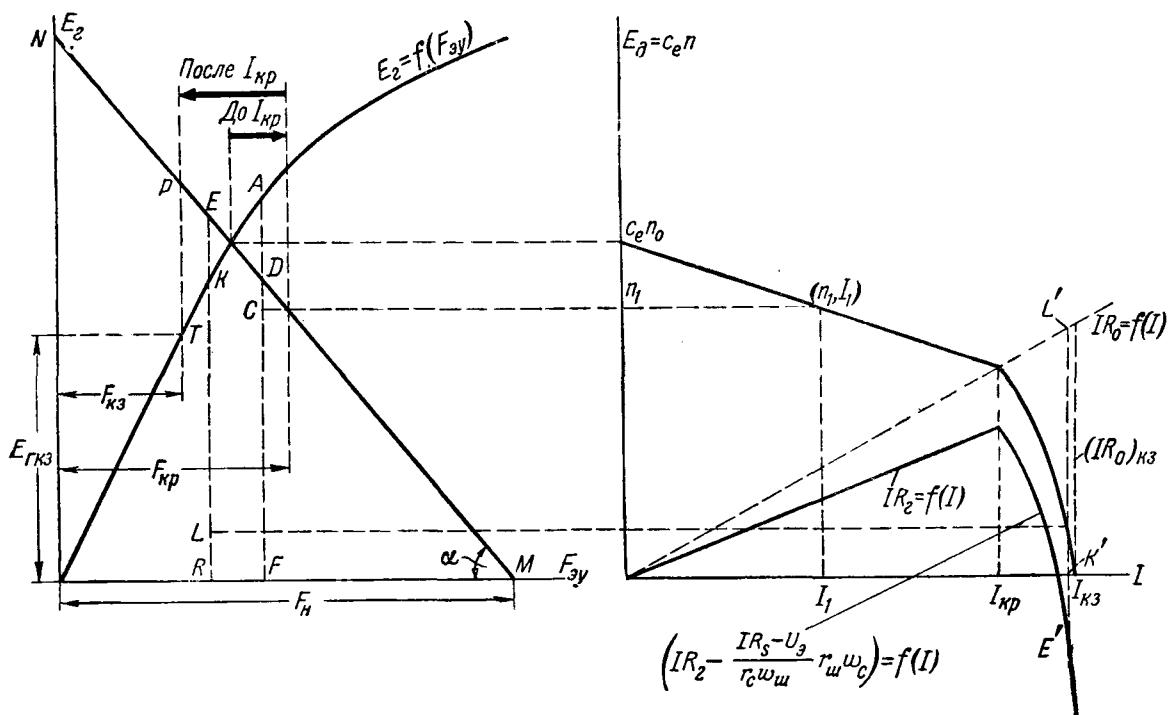


Рис. 4.

Для построения участка характеристики при токах, превосходящих ток отсечки, необходимо разность ординат между $E_2 = f(F_{ay})$ и прямой MN для нахождения тока I откладывать на кривой $\left(IR_s - \frac{IR_s - U_s}{r_c w_m} r_m w_c \right) = f(I)$ и

аналогично предыдущему находить IR_0 и $C_e n$. При этом, по мере возрастания тока, э. д. с. генератора будет падать. Жирные стрелки на рис. 4 показывают, как изменяются э. д. с. генератора и F электромашинного усилителя на обоих участках характеристики.

После того, как при работе на втором участке характеристики будет пройдена точка, соответствующая э. д. с. идеального холостого хода, разности ординат необходимо откладывать вниз от оси I (см., например, отрезки EK и $E'K'$) и полученную величину $IR_0(K'L')$ откладывать от точки K вниз (KL), отрезок LR даст $C_e n$. Продолжая построение дальше, можно найти ток короткого замыкания двигателя.

В том случае, когда требуется решить обратную задачу — по заданной точке идеального холостого хода n_0 , току отсечки I_{kp} и току короткого замыкания I_{kz} найти параметры системы, поступают следующим образом.

По точке идеального холостого хода находится точка пересечения кривой $E_2 = f(F_{ay})$ и прямой MN (рис. 4). Затем, соединяя точку пересечения с F_n , получим прямую MN . Тангенс угла наклона прямой MN к оси абсцисс даст отношение w_m .

Для определения величин R_s и U_s , удовлетворяющих заданным I_{kp} и I_{kz} , необходимо составить два уравнения. Одно уравнение составляется из условий получения требуемой величины тока отсечки. При этом должно иметь место равенство

$$I_{kp} R_s - U_s = 0. \quad (6)$$

Второе уравнение дают условия получения требуемого тока короткого замыкания.

Для тока короткого замыкания отыскивается величина падения напряжения в главной цепи при коротком замыкании (IR_0)_{kz} по $IR_0 = f(I)$. Затем на кривой $E_2 = f(F)$ отыскивается такое значение н. с., при котором э. д. с. генератора равна найденному значению (IR_0)_{kz}. Отыскав для этой н. с. отрезок PT (рис. 4) — разность ординат

¹ F_n должно быть задано или им можно задаться произвольно.

между $E_2 = f(F)$ и прямой MN , можно, учитывая знак PT , составить уравнение:

$$\bar{PT} = I_{kz} R_s - \frac{I_{kz} R_s - U_s}{r_c w_m} r_m w_c. \quad (7)$$

Совместным решением (6) и (7) находятся искомые R_s и U_s . При этом витки w_c должны быть заданы, в противном случае ими можно задаться произвольно.

Найденные таким образом $\frac{w_m}{r_m}$, R_s и U_s дадут характеристику, которая будет проходить через заданные точки n_0 , I_{kp} и I_{kz} . Вид характеристики между этими точками необходимо найти графическим построением. Если она почему-либо не удовлетворяет поставленным требованиям жесткости в первой своей части и степенью крутизны во второй части, необходимо расчертить повторить, задавая другие F_n и w_c . Так как при определении (IR_0)_{kz} величина R_s не учитывалась, то значение I_{kz} может не соответствовать заданному. В этом случае I_{kz} следует скорректировать путем изменения r_c .

Пользуясь описанным методом, можно решать задачи определения параметров и в том случае, когда дополнительно задается скорость, при которой должна произойти отсечка тока.

Необходимо отметить, что при построении следует выбрать одинаковый масштаб на осях E_2 и E_o .

Выводы. 1. Изложенный графический метод построения механических характеристик двигателя позволяет решать прямые и обратные задачи электропривода.

2. Построение характеристик двигателей и решение различных задач этим методом осуществляется более просто, чем в случае использования методов, описанных в [Л. 2, 3].

3. Описанный метод наглядно показывает влияние параметров системы на вид механической характеристики двигателя и позволяет проследить изменение э. д. с. генератора и н. с. возбудителя при изменении тока главной цепи от нуля до I_{kz} .

Литература

1. Г. Н. Петров. Электрические машины, часть II. Госэнергоиздат, 1947.

2. В. П. Бычков. Характеристики двигателя в системе Леонарда при трех обмотках возбуждения у генератора, Электричество, № 9, 1948.

3. С. З. Барский. Анализ схемы электропривода с падающей характеристикой. Электричество, № 5, 1950.

[25. 6. 1950]



Асимметричное регулирование асинхронной машины для привода с вентиляторным моментом

Кандидат техн. наук Г. М. КАСПРЖАК и инж. З. М. ПЕРСИД

Москва

Общие положения. В качестве регулируемых приводов с вентиляторным моментом обычно применяют два варианта электрической схемы: трехмашинный (не считая возбудителя) агрегат с электродвигателем постоянного тока или асинхронный электродвигатель с регулируемым сопротивлением в цепи ротора. Первый из этих вариантов, как известно, дорог и громоздок, второй—дешевле и требует для своего осуществления меньшего помещения, но неудобен из-за неустойчивости работы при глубоком регулировании, а также сложности и громоздкости регулирующего устройства.

Значительными преимуществами перед описанными схемами обладает вариант асимметричного регулирования асинхронной машины, работающей в двухфазном режиме при повышенном скольжении [Л. 1], осуществленный авторами статьи в аэrodинамической лаборатории МГУ им. Ломоносова в 1947—1948 гг.

Эта установка обладает рядом преимуществ перед вариантом с трехмашинным агрегатом постоянного тока и свободна в значительной степени от недостатков варианта с асинхронной машиной: управление осуществляется просто, установка получается малогабаритной, достигается плавное регулирование в очень широких пределах. Коэффициент полезного действия при асимметричном регулировании достаточно велик. При больших скоростях и нагрузках, он на несколько процентов меньше, чем в случае варианта с асинхронной машиной, но значительно выше к. п. д. варианта с двигателем постоянного тока.

Недостатком асимметричного регулирования является увеличение тока в обмотках ротора

Проводятся две проверенные в эксплоатации схемы асимметричного регулирования двухфазных асинхронных машин с контактными кольцами, примененные для привода аэродинамической трубы, и производится их сравнительный анализ. Результаты анализа даны в виде универсальных безразмерных зависимостей, отображающих регулировочные и нагрузочные свойства асинхронных регулируемых приводов с так называемым вентиляторным статическим моментом. По полученным универсальным характеристикам, сопоставленным с опытными данными, сделаны выводы, необходимые для проектирования такого рода приводов. Содержится также ряд экспериментально проверенных рекомендаций, относящихся к применению для асимметричного регулирования обычных трехфазных асинхронных машин.

и статора, а также в сети при низких скоростях. Это увеличение тока ограничивается соответствующим выбором величины балластного сопротивления в цепи ротора, наличие которого необходимо также для получения требуемого критического скольжения, обеспечивающего высокое качество регулирования и торможения асинхронной машины

машины [Л. 1]. В ряде случаев при работе регулируемых асинхронных машин в качестве приводов аэродинамических труб перегрев обмоток может оказаться невысоким даже при токах в обмотках выше номинальных вследствие улучшенных условий охлаждения потоком воздуха, поступающим из трубы.

На рис. 1 представлены принципиальные схемы двух экспериментально проверенных вариантов асимметричного регулирования двухфазного асинхронного привода аэродинамической трубы мощностью 25 квт с устойчивым регулированием скорости от 20÷800 об/мин: а) регулирования углом с помощью фазорегулятора (рис. 1, а); б) регулирования напряжением с помощью автотрансформатора (рис. 1, б).

В первой схеме обмотка возбуждения ОВ регулируемого электродвигателя РД (45 квт; 110/220 в; 242/121 а; 970 об/мин) получает питание непосредственно от сети (от двух фаз или фазы и нуля); на обмотку управления ОУ регулируемого электродвигателя РД подается переменное по фазе напряжение от фазорегулятора ФР, выполненного из асинхронного электродвигателя с кольцами (МА-206; 6,7 квт; 960 об/мин; 220/380 в, ХЭМЗ). В цепь ротора двухфазной машины включается постоянное трехфазное балластное сопротивление БС. Регулирование скорости в рассматриваемой схеме производится изме-

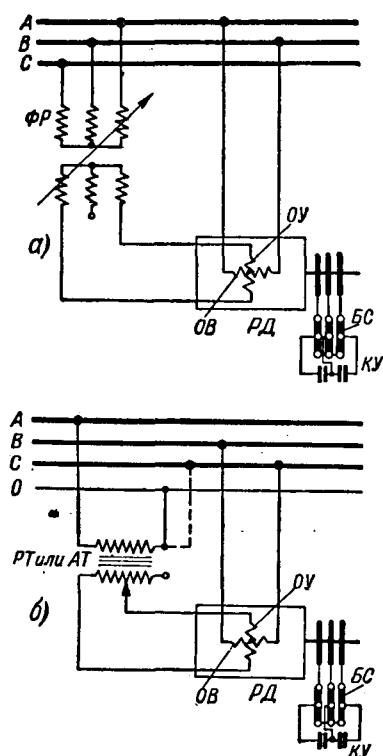


Рис. 1. Схемы включения двухфазных машин.
а — регулирование углом; б — регулирование напряжением.

нением фазы напряжения на обмотке управления OY с помощью фазорегулятора ΦR . Переход на работу с более жесткой характеристикой производится с помощью контактора управления KU путем закорачивания части балластного сопротивления BC . Вследствие этого расширяется размах регулирования при значительных нагрузках.

Во второй схеме (рис. 1,б) питание обмотки управления OY осуществляется от регулируемого трансформатора PT или автотрансформатора AT (АТ/Т-33; 30 ква; 0—220 в; завод «Гостеасвет»). Все остальные детали схемы регулирования напряжением те же, что и в схеме регулирования углом.

Расчет механических параметров. Механические характеристики для любого асимметричного режима работы мощной асинхронной машины могут быть построены, исходя из упрощенной схемы замещения (рис. 2,а), пользуясь методом симметричных составляющих, т. е. путем определения разности моментов прямой и обратной последовательности при данной скорости и режиме питания:

$$M = M_1 - M_2. \quad (1)$$

Таким путем несложно получить [Л. 1] для построения механических характеристик следующие расчетные выражения в относительных единицах:

$$\begin{aligned} \mu_n &= \frac{\alpha^2(1-\nu)}{\cos^2\psi_R + \sin^2\psi_R(1-\nu)^2} - \\ &- \frac{\beta^2(1+\nu)}{\cos^2\psi_R + \sin^2\psi_R(1+\nu)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

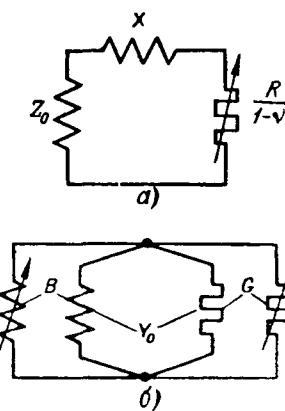


Рис. 2. Преобразование схемы замещения.
а — исходная упрощенная схема, б — преобразованная.

и

$$\mu_n = \xi \left[\frac{\alpha^2}{\frac{s_{KR}}{1-\nu} + \frac{1-\nu}{s_{KR}}} - \frac{\beta^2}{\frac{s_{KR}}{1+\nu} + \frac{1+\nu}{s_{KR}}} \right]. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) приняты следующие обозначения:

$\mu_n = \frac{M}{M_n}$ — момент асинхронной машины при асимметричном питании в долях пускового момента при симметричном питании и сопротивлении цепи ротора R ;

$\mu_n = \frac{M}{M_n}$ — то же, но в долях номинального момента, вычисленного по паспортным данным машины;

$\nu = \frac{n}{n_0}$ — скорость вращения асинхронной машины при асимметричном питании и сопротивлении цепи ротора R в долях синхронной скорости;

$\nu_n = \frac{r_n}{n_0}$ — номинальная скорость вращения асинхронной машины по паспорту в тех же единицах;

$s_{KR} = 1 - \nu_{KR} = \frac{R}{X}$ — скольжение асинхронной машины, соответствующее максимальному моменту при симметричном питании сопротивлении цепи ротора R ;

$s_{kr} = 1 - \nu_{kr} = \frac{r}{X}$ — то же, но вычисленное по паспортным данным машины;

$\alpha = \frac{U_1}{U_n} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + a^2 + 2a \sin \delta}$ — напряжение прямой последовательности в долях номинального напряжения машины;

$\beta = \frac{U_2}{U_n} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + a^2 - 2a \sin \delta}$ — напряжение обратной последовательности в тех же единицах;

$a = \frac{U_y}{U_\delta} = \frac{U_y}{U_n}$ — напряжение обмотки управления в долях номинального напряжения машины;
 δ — угол сдвига фаз между напряжениями управления и возбуждения;

$$\psi_R = \arccos \frac{R}{Z} = \arccos \frac{s_{KR}}{\sqrt{1+s_{KR}^2}} = \arcsin \frac{X}{Z} = \\ = \arcsin \frac{1}{\sqrt{1+s_{KR}^2}}$$

— угол сдвига фаз между током и напряжением для последовательной цепи схемы замещения асинхронной машины с сопротивлением цепи ротора R при $v=0$;
 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — полное сопротивление последовательной цепи схемы замещения асинхронной машины в этом же случае;

$$\xi = \frac{2M_n}{M_n} = \\ = \frac{s_{kr}}{1-v_n} + \frac{1-v_n}{s_{kr}}$$

— двойной максимальный момент асинхронной машины в долях номинального момента, вычисленного по паспортным данным машины.

Приведенные выше выражения могут быть использованы для анализа любого асимметричного режима работы асинхронной машины. Например, для анализа двигателяного режима может быть найдена скорость при данном моменте, если задаваться значениями α и β , вычисленными по данным a и δ ; для анализа пускового режима может быть вычислен момент, полагая $v=0$ и задаваясь значениями коэффициентов a и β ; для анализа холостой работы может быть вычислена скорость, полагая $\mu_n=0$ или $\mu_n=0$ и задаваясь значениями a и β ; наконец, для анализа тормозного эффекта при закорачивании одной из фаз или при $\delta=0^\circ$ могут быть определены значения тормозных моментов при данных значениях скоростей, полагая в первом случае $\alpha=\beta=0,5$ и во втором случае $-\alpha=-\beta=0,707$.

Расчет токов в обмотках статора. Токи в обмотках статора регулируемой асинхронной машины также можно определять методом симметричных составляющих, выделив активные и реактивные проводимости упрощенных схем замещения (рис. 2, а) в отдельные параллельные ветви (рис. 2, б), параметры которых могут быть выражены в функции скольжения или скорости следующим образом:

для прямой последовательности

$$G_1 = \frac{R}{\left[\frac{R}{s}\right]^2 + X^2} + \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R \left[\frac{1}{1-v} + \frac{1-v}{s_{KR}^2} \right]} + \frac{1}{R_0}$$

или

$$g_1 = \frac{G_1}{Y_n} = \frac{K}{\frac{1}{1-v} + \frac{1-v}{s_{KR}^2}} + g_0 \quad (4)$$

и

$$B_1 = \frac{X}{\left[\frac{R}{s}\right]^2 + X^2} + \frac{1}{X_0} = \frac{1}{R \left[\frac{1}{s_{KR}} + \frac{1}{(1-v)^2} \right]} + \frac{1}{X_0}$$

или

$$b_1 = \frac{B_1}{Y_n} = \frac{K}{\frac{1}{s_{KR}} + \frac{1}{(1-v)^2}} + b_0; \quad (5)$$

для обратной последовательности

$$G_2 = \frac{\frac{R}{2-s}}{\left[\frac{R}{2-s}\right]^2 + X^2} + \frac{1}{R_0} = \\ = \frac{1}{R \left[\frac{1}{1+v} + \frac{1+v}{s_{KR}} \right]} + \frac{1}{R_0} \quad \left. \right\} \quad (4')$$

или

$$g_2 = \frac{G_2}{Y_n} = \frac{K}{\frac{1}{1+v} + \frac{1+v}{s_{KR}^2}} + g_0 \quad \left. \right\}$$

и

$$B_2 = \frac{X}{\left[\frac{R}{2-s}\right]^2 + X^2} + \frac{1}{X_0} = \frac{1}{R \left[\frac{1}{s_{KR}} + \frac{1}{(1+v)^2} \right]} + \frac{1}{X_0}$$

или

$$b_2 = \frac{B_2}{Y_n} = \frac{K}{\frac{1}{s_{KR}} + \frac{1}{(1+v)^2}} + b_0. \quad (5')$$

В полученных выражениях приняты обозначения:

G_1 и G_2 — активные проводимости схемы замещения асинхронной машины напряжению прямой и обратной последовательности;

B_1 и B_2 — реактивные проводимости схемы замещения асинхронной машины напряжению прямой и обратной последовательности;

g_1 и g_2 — относительные активные проводимости в долях полной номинальной проводимости схемы замещения

$$Y_n = \frac{1}{Z_n} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r}{s_n}\right)^2 + X^2}};$$

b_1 и b_2 — относительные реактивные проводимости в долях Y_n ;

$g_0 = \frac{Z_n}{R_0}$ — относительная активная проводимость параллельной ветви схемы замещения в долях Y_n ;

$b_0 = \frac{Z_n}{X_0}$ — относительная реактивная проводимость параллельной ветви схемы замещения в долях Y_n ;

$K = \frac{Z_n}{R}$ — расчетный коэффициент.

Для расчета токов статора методом симметричных составляющих необходимо также знать величины напряжений прямой и обратной последовательностей и так называемые фазовые углы Ψ_e и Ψ_y , т. е. углы сдвига фаз между напряжениями прямой и обратной последовательности в обеих обмотках регулируемой машины. Можно показать (приложение), что при регулировании только углом или только напряжением фазовые углы остаются неизменными и равны следующим величинам¹:

Фазовый угол в обмотке:	всэзждения Ψ_e	управления Ψ_y
При регулировании: углом δ	$\pm 90^\circ$	$\mp 90^\circ$
напряжением U_y	0°	$\mp 180^\circ$

Пользуясь полученными значениями проводимостей, напряжений и фазовых углов, несложно составить следующие выражения для токов в обмотках в комплексном виде:

при регулировании углом ($\Psi_e = 90^\circ$ и $\Psi_y = -90^\circ$)

$$I_s = U_1(G_1 - B_1j) + U_2(G_2 - B_2j) \quad (6)$$

и

$$I_y = U_1(G_1 - B_1j) + U_2(G_2 - B_2j); \quad (7)$$

при регулировании напряжением ($\Psi_e = 0^\circ$ и $\Psi_y = 180^\circ$).

$$I_s = U_1(G_1 - B_1j) + U_2(G_2 - B_2j) \quad (8)$$

и

$$I_y = U_1(G_1 - B_1j) - U_2(G_2 - B_2j). \quad (9)$$

Расчетные формулы для токов в обмотках статора получаются путем определения модулей выражений (6), (7), (8) и (9). При этом все величины выражаются в долях от своих номинальных значений, т. е. номинального фазного напряжения машины U_n , номинального фазного тока машины I_n и номинальной проводимости машины Y_n .

Выражения для расчета токов обмотки возбуждения $i_s = \frac{I_s}{I_n}$ и обмотки управления $i_y = \frac{I_y}{I_n}$ в относительных единицах имеют следующий вид:

при регулировании углом

$$i_s = \sqrt{(\alpha_e g_1 - \beta_e b_2)^2 + (\alpha_e b_1 + \beta_e g_2)^2} \quad (10)$$

и

$$i_y = \sqrt{(\alpha_e g_1 + \beta_e b_2)^2 + (\alpha_e b_1 - \beta_e g_2)^2}; \quad (11)$$

¹ Знаки углов Ψ_e и Ψ_y зависят от знака угла сдвига фаз между U_e и U_y , т. е. от знака угла δ .

при регулировании напряжением

$$i_s = \sqrt{(\alpha_y g_1 + \beta_y g_2)^2 + (\alpha_y b_1 + \beta_y b_2)^2} \quad (12)$$

и

$$i_y = \sqrt{(\alpha_y g_1 - \beta_y g_2)^2 + (\alpha_y b_1 - \beta_y b_2)^2}. \quad (13)$$

Индексы при коэффициентах асимметрии α и β обозначают, что полученные выражения справедливы лишь при регулировании углом (α_e и β_e) или лишь при регулировании напряжением (α_y и β_y).

расчет эквивалентных токов статора и ротора. Токи в обмотке возбуждения i_s и в обмотке управления i_y — различные величины. Как будет видно ниже, эта разница особенно велика при регулировании напряжением.

Ток в роторе регулируемой асинхронной машины наводится эллиптическим вращающимся полем и, следовательно, несинусоидален. Однако методом симметричных составляющих он может быть представлен в виде двух синусоидальных токов i_{p1} и i_{p2} различной частоты и амплитуды, протекающих одновременно по одной и той же обмотке.

Если вычислить среднеквадратичный ток обмоток статора $i_{c,s}$ и квадратичную сумму токов ротора различной последовательности $i_{p,s}$, то можно получить значения приблизительно эквивалентных по нагреву токов статора и ротора из следующих выражений:

для статора

$$i_{c,s} = \sqrt{\frac{i_s^2 + i_y^2}{2}}, \quad (14)$$

для ротора

$$i_{p,s} = \sqrt{i_{p1}^2 + i_{p2}^2}. \quad (15)$$

Формулы (14) и (15) могут быть обе приведены к одному и тому же виду

$$i_s = \sqrt{(\alpha y_1)^2 + (\beta y_2)^2}. \quad (16)$$

Для этого необходимо подставить значения y_e и y_y в выражение (14), а значения i_{p1} и i_{p2} в (15) заменить произведениями относительных напряжений и проводимостей для последовательной цепи схемы замещения. Разница в вычислении эквивалентного тока ротора по сравнению с вычислением эквивалентного тока статора заключается в том, что в первом случае при определении проводимостей не следует учитывать проводимости холостого хода g_0 и b_0 .

Анализ асимметричного регулирования. Пользуясь полученными расчетными выражениями, был произведен анализ асимметричного регулирования асинхронных машин мощностью в несколько десятков киловатт для приводов с вентиляторным моментом, аналогичных описан-

ной выше установке для аэродинамической трубы. Для этого по выражениям для момента (2) и (3) строились механические характеристики в двигательном и тормозном режиме для регулирования углом и регулирования напряжением при различных критических скольжениях; затем в тех же координатах строились кривые статического момента, изменяющегося по закону $\mu = \mu_c \cdot v^2$, для различных μ_c , т. е. статических моментов при синхронной скорости, выраженных в долях пускового момента. По полученной сетке кривых делались выводы о регулировочных свойствах машин либо непосредственно, либо путем построения так называемых регулировочных характеристик. На рис. 3 приведена такая сетка механических характеристик и кривых статического момента для асинхронной машины с критическим скольжением $s_{KR} = 2$.

Путем анализа аналогичных кривых для различных критических скольжений удалось выявить следующие *регулировочные свойства* асинхронных регулируемых машин с контактными кольцами:

1. Двухфазная асинхронная машина с критическим скольжением больше единицы обладает регулировочными свойствами при изменении коэффициента асимметрии питающих напряжений.

2. При асимметричном регулировании изменение скорости происходит в ограниченном диапазоне регулирования угла или напряжения, причем этот диапазон расширяется с увеличением критического скольжения и нагрузки при одновременном снижении максимальных значений скорости.

3. Кроме обычных для асинхронной машины тормозных режимов при асимметричном регулировании машин с критическим скольжением больше единицы может быть получен режим однофазного торможения, соответствующий коэффициенту асимметрии, равному единице.

4. При регулировании углом механические характеристики положе, изменение скорости при регулировании более пропорционально и тормозные моменты больше, чем при регулировании напряжением.

По выражениям для тока в обмотках статора (10), (11), (12) и (13) и для среднеквадратичного тока статора и ротора (16) были построены так называемые нагрузочные характеристики для случая регулирования углом и регулирования напряжением в двигательном и тормозном режиме с различным критическим скольжением. На рис. 4 показаны характерные нагрузочные кривые при критическом скольжении, равном $s_{KR} = 2$.

Анализ нагрузочных свойств регулируемых асинхронных машин был произведен по упомянутым выше нагрузочным кривым при различных критических скольжениях и нагрузках. На рис. 5 приведены кривые максимального момента и тока для довольно характерного случая асимметричного регулирования асинхронных машин средней мощности и скорости, в которых от-

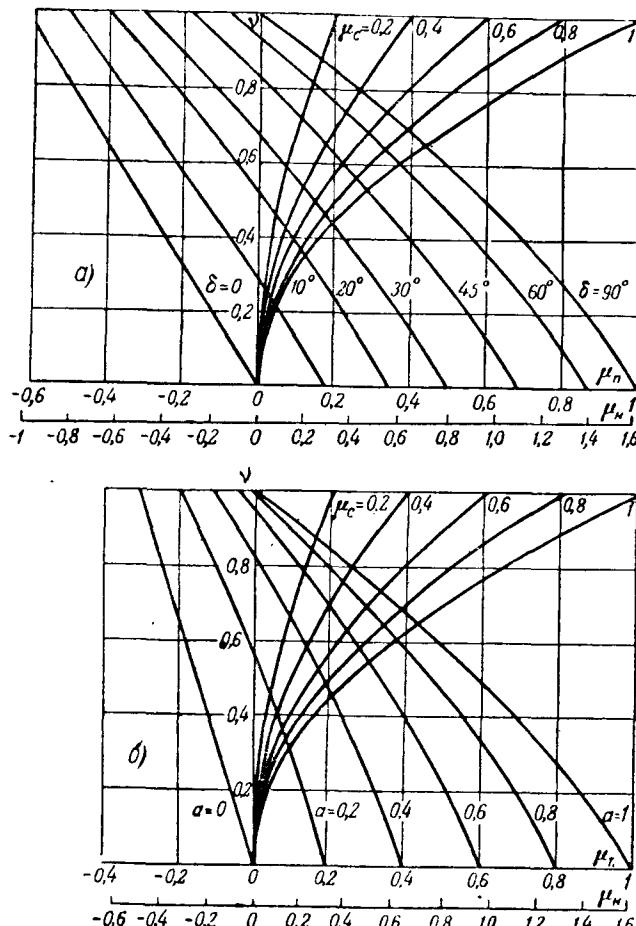


Рис. 3. Механические характеристики при критическом скольжении $s_{KR} = 2$.

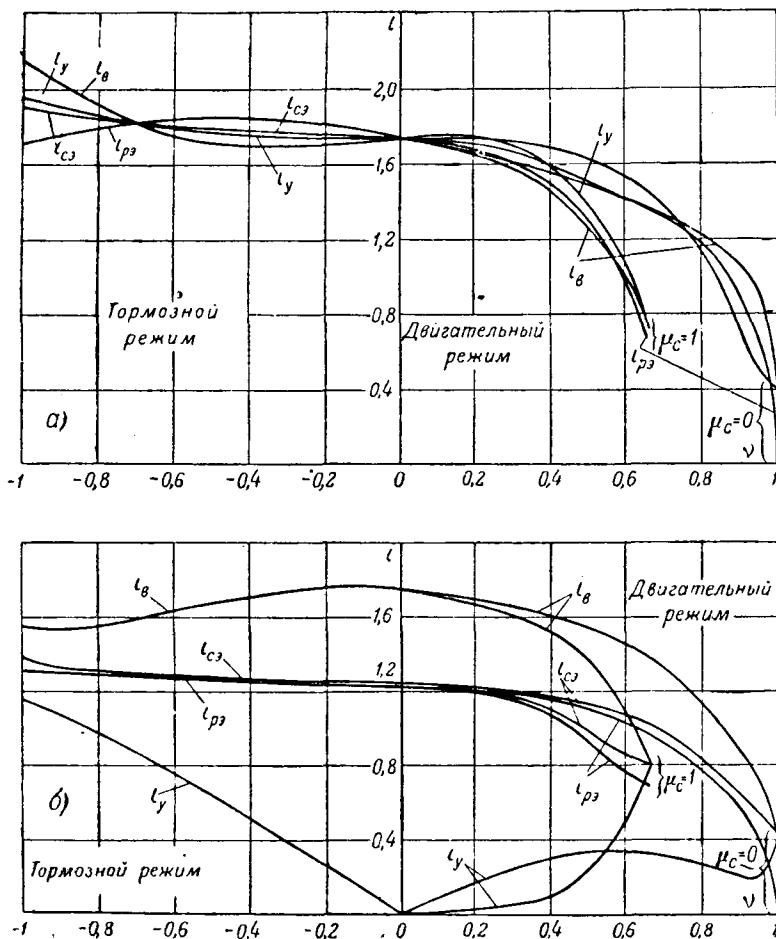
a — регулирование углом; *b* — регулирование напряжением.

ношение скольжений $\frac{s_{KR}}{s_{nr}} \approx 4 \div 5$ и относительный ток холостого хода $i_0 = 0,4 \div 0,45$. Эксперименты показывают, что максимальные значения моментов близки к значениям, приведенным на рис. 5, а максимальные значения токов обычно на 15 \div 25 % меньше приведенных на этом рисунке.

Выводы, которые могут быть сделаны при изучении *нагрузочных свойств* асинхронных регулируемых машин, следующие:

1. Максимальным моментом в двигательном режиме при асимметричном регулировании машин с критическим скольжением $s_{KR} \geq 1$ является пусковой момент. Значение этого момента еще достаточно велико даже при $s_{KR} = 2 \div 3$. Уменьшение максимальной развиваемой машиной мощности объясняется не снижением момента, а падением скорости.

2. Токораспределение при асимметричном регулировании зависит от способа регулирования, величины критического скольжения и характера изменения величины статического момента. При регулировании углом токораспределение менее выгодное и нагрев машины больше, чем при регулировании напряжением. Увеличение критического скольжения за счет повышения активного



сопротивления цепи ротора приводит к уменьшению нагрева машины. С увеличением статической нагрузки токораспределение становится более выгодным.

3. Наиболее неблагоприятной с точки зрения нагрева является работа при низких скоростях: при асимметричном регулировании среднеквадратичный ток нарастает обычно с падением скорости до ее половинного значения и остается неизмененным при дальнейшем изменении скорости до нуля и в сторону отрицательных значений (при однофазном торможении).

4. Минимальное значение критического скольжения, обеспечивающее при регулировании напряжением допустимый нагрев машины при практически любых режимах и скоростях, равно $s_{KR} = 1,7 \div 1,9$. При регулировании углом эта величина возрастает до $s_{KR} = 2,8 \div 3$.

Схемы включения трехфазных машин. При комплектовании схем асимметричного регулирования для приводов аэродинамических труб или других установок с вентиляторным моментом могут быть использованы либо двухфазные асинхронные машины специального изготовления, либо обычные асинхронные машины с пересоединением обмоток статоров, либо, наконец, обычные асинхронные машины, включаемые по специальным схемам.

Первые два способа вряд ли смогут найти в настоящее время широкое применение, так как специальное изготовление нерентабельно, а пересоединение обмоток ведет к очень большому недоиспользованию машин ввиду

несоответствия напряжения пересоединенных обмоток напряжению сети.

При включении нормальных трехфазных машин становится задача получения возможно более простым способом системы напряжений с изменением коэффициента асимметрии $\gamma = \frac{\beta}{\alpha}$ от единицы до нуля при наивыгоднейшем характере токораспределения. Значение коэффициента асимметрии, равное единице, необходимо для создания пульсирующего поля и полного останова машины даже при холостом ходе. Значение коэффициента асимметрии, равное нулю, необходимо для создания кругового поля и полного использования машины при максимальной скорости.

Для асимметричного регулирования трехфазных машин могут быть применены схемы, приведенные на рис. 6. В этих схемах² используются трансформаторы или автотрансформаторы с плавным регулированием напряжения. Если необходимо также реверсирование, то регулируемые трансформаторы или автотрансформаторы снажаются вторым дополнительным ползунком или дополнительной обмоткой (показано на схемах пунктиром).

Оценку схем рис. 6 целесообразно производить путем выяснения того, в какой степени они по своим свойствам приближаются к схемам двухфазных регулируемых машин по показателям:

1. Возможности регулирования скорости от нуля до максимума при любой нагрузке без необходимости "выворачивания" фазы управляющей обмотки, связанного с получением неблагоприятного токораспределения в обмотках.

2. Возможности высокого электродинамического использования машины, иначе говоря, получения наиболее

² Схемы с соединением в треугольник разработаны и освоены при участии В. С. Савина-Стрельцова.

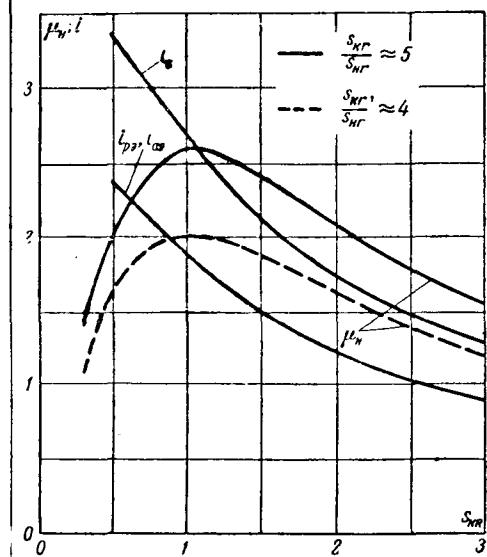


Рис. 5. Максимальный момент и ток в двигательном режиме при регулировании напряжением.

Рис. 4. Нагрузочные характеристики при критическом скольжении $s_{KR} = 2$.
а — регулирование углом; б — регулирование напряжением.

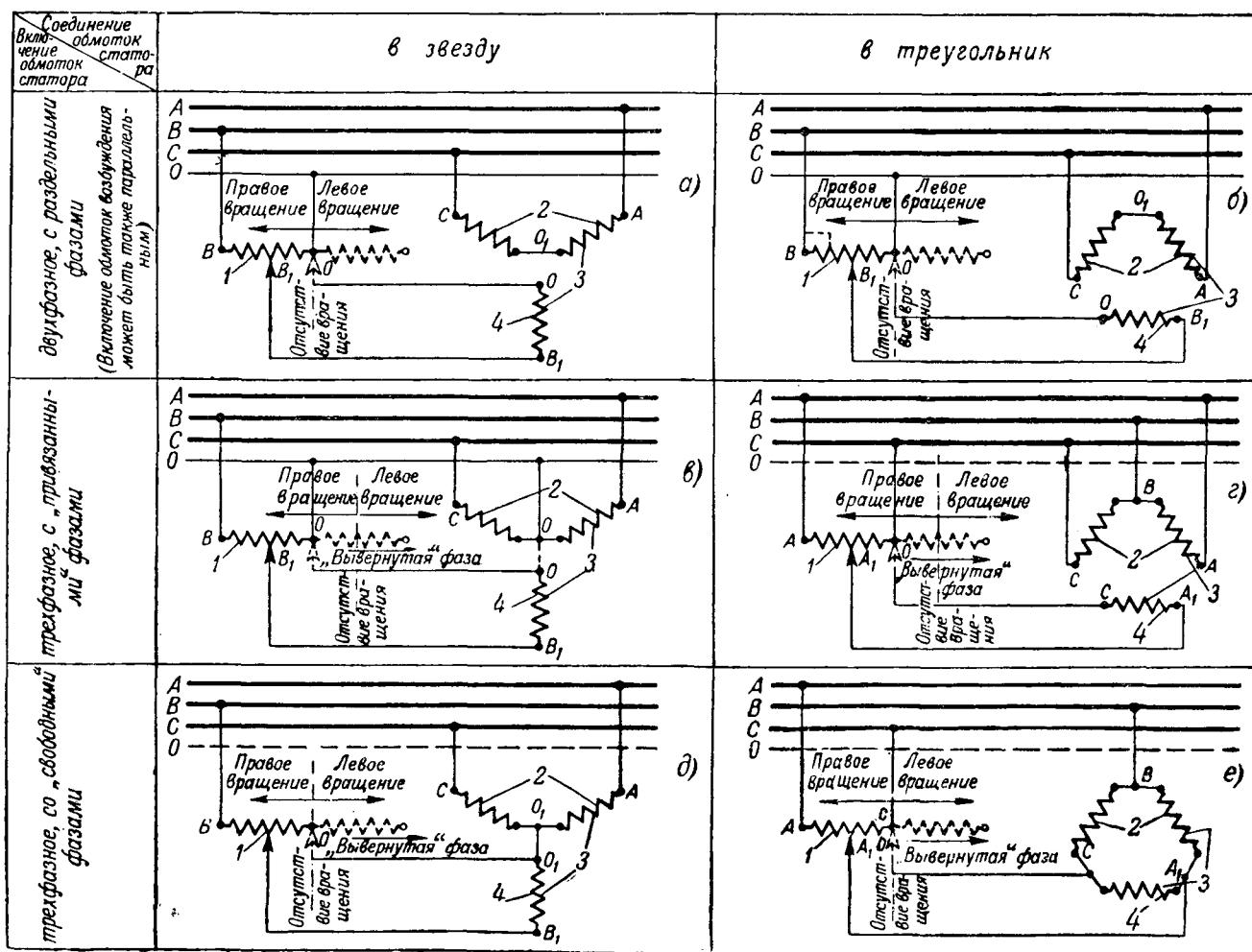


Рис. 6. Схемы включения трехфазной машины.

1 — автотрансформатор; 2 — обмотки возбуждения; 4 — обмотки управления (2, 3, 4 — обмотки статора).

пологой механической характеристики для данной машины при данном балластном сопротивлении.

3. Возможности плавного реверсирования машины путем непрерывного изменения скорости от максимальных положительных значений до максимальных отрицательных значений с помощью одной рукоятки без „выворачивания“ фазы.

К сожалению, ни одна из приведенных схем асимметричного регулирования трехфазных машин не удовлетворяет одновременно всем перечисленным требованиям. Схемы двухфазного включения (рис. 6, а и б) дают хорошее регулирование и реверсирование, но не обеспечивают полного использования машины; схемы с „привязанными“ фазами (рис. 6, в и 6, г) дают хорошее использование, но не обеспечивают ни полного регулирования (рис. 7, а), ни, тем более, реверсирования без „выворачивания“ фазы; наконец, схемы со „свободными“ фазами (рис. 6, д и е) обеспечивают хорошее регулирование (рис. 7, б) и использование машины, но реверсирование и здесь требует „выворачивания“ фазы.

Таким образом, если по условиям работы не требуется плавного реверсирования, то следует выбрать схемы со свободными фазами. Испытание трехфазного асинхронного электродвигателя с кольцами, включенного по такой схеме при соединении в звезду (по схеме со „свободной“ нулевой точкой), дает регулировочные кривые (рис. 7, б) и нагрузочные кривые (рис. 8), сходные с кривыми для двухфазного электродвигателя. Это, очевидно, объясняется тем, что в зоне регулирования

ния ($\text{до } a = \frac{U_y}{U_s} = 0,4 \div 0,5$) при практически возможных нагрузках режим работы машины близок к двухфазному. При работе по схеме со свободной нулевой точкой две фазы, образующие обмотку возбуждения, оказываются включенными на пониженное фазное напряжение, равное $U_s = 1,73 \cdot 0,5 U_\phi = 0,87 U_\phi$, благодаря чему величина критического скольжения может быть уменьшена в этом случае против рекомендованных выше значений до $s_{KR} = 1,5 \div 1,7$.

Особенностью схемы со свободной нулевой точкой является необходимость применения трансформатора на напряжение сети, равное $U_{mp} = 0,87 \cdot 1,73 U_\phi = 1,5 U_\phi$.

В заключение следует заметить, что асимметричное регулирование может быть осуществлено также путем применения для этой цели трехфазных короткозамкнутых машин с повышенным сопротивлением ротора. Увеличение сопротивления ротора нормальных короткозамкнутых машин, применяемых в качестве регулируемых машин, может быть практически достигнуто либо путем частичного высверливания алюминиевых стержней ротора, либо путем полного удаления алюминия из пазов ротора и замены его латунными стержнями.

Приложение. Вычисление фазовых углов Ψ_y и Ψ_u . Напряжение любой из обмоток статора двухфазной регулируемой машины U_y или U_u может быть представлено в виде геометрической суммы напряжений прямой и об-

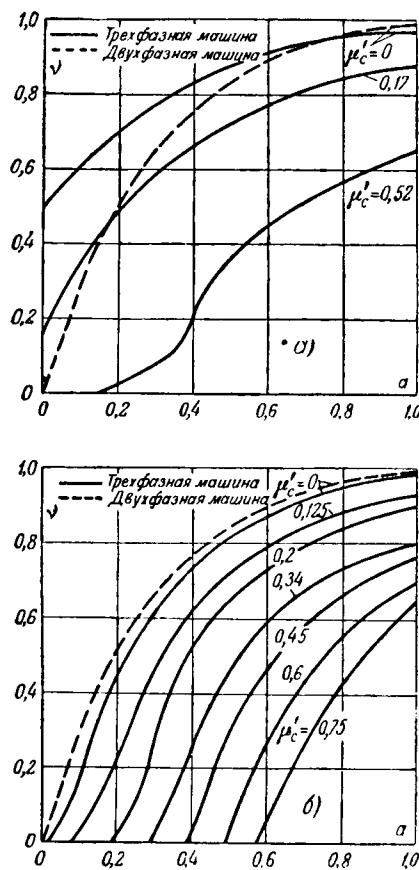


Рис. 7. Регулировочные характеристики при регулировании трехфазных машин с $s_{KR} \approx 1,7$.
а — схема с «привязанными» фазами; б — со «свободными» фазами (μ_c' — постоянная величина, не зависящая от v).

ратной последовательности (U_1 и U_2), действующих в этой обмотке. Следовательно, по теореме косинусов

$$U_y^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \Psi_\theta \quad (1,1)$$

и

$$U_\theta^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \Psi_y; \quad (1,2)$$

откуда

$$\Psi_\theta = \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\beta} + \frac{\beta}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{\alpha\beta} \right) \right] \quad (1,3)$$

и

$$\Psi_y = \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\beta} + \frac{\beta}{\alpha} - \frac{1}{\alpha\beta} \right) \right]. \quad (1,4)$$

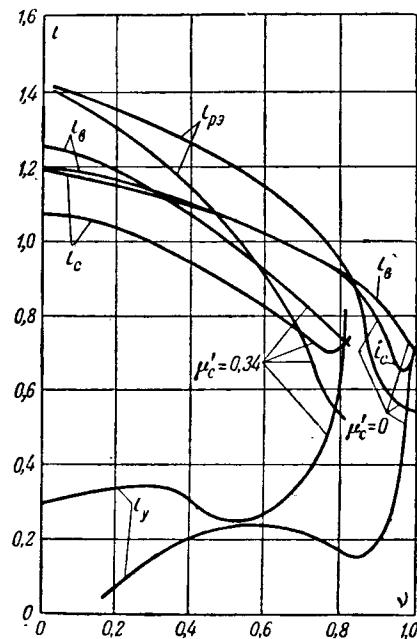


Рис. 8. Нагрузочные кривые для асимметричного включения трехфазной машины по схеме „свободной“ нулевой точкой при $s_{KR} \approx 1,7$.

Если подставить в (1,3) и (1,4) значения

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{1 + a^2 + 2a \sin \delta} \text{ и } \beta = \frac{1}{2} \sqrt{1 + a^2 - 2a \sin \delta},$$

то путем несложных алгебраических преобразований можно получить: а) при $\delta = 90^\circ$, соответствующем регулированию напряжением, $\Psi_\theta = \arccos 1 = 0^\circ$ и $\Psi_y = \arccos (-1) = \mp 180^\circ$; б) при $a = 0$, соответствующем регулированию углом, $\Psi_\theta = \arccos 0 = \pm 90^\circ$ и $\Psi_y = \arccos 0 = \mp 90^\circ$.

Верхние знаки перед значениями фазовых углов соответствуют случаю, когда напряжение U_y отстает по фазе от напряжения U_θ (принята при настоящем анализе последовательность); нижние знаки — обратной последовательности фаз.

Литература

1. Г. М. Каспржак. Асинхронная регулируемая машина малой мощности. Электричество, № 2, 1949.

2. R. Rüdenberg. Anordnung zur Erzeugung eines elliptischen Drehfeldes bei der Steuerung von Asynchronmotoren. Patentschrift № 606092, kl. 21 d³, Gr. 2402. 24.09.27.

[6.2.1950]



Динамические усилия в расплаве индукционных печей

Кандидат техн. наук Г. В. ДЕРШВАРЦ

Московский энергетический институт им. Молотова

При протекании тока по проводнику, помимо его нагревания, наблюдается возникновение механических сил. Если этот проводник жидкий, то под влиянием усилий может произойти видимая деформация металла. Такая деформация, в частности, наблюдается в индукционных печах со стальным сердечником и проявляется, например, в виде так называемого эффекта сжатия, вследствие которого существенно уменьшается генерация тепла в камне печи.

В расплавленном металле в индукционных печах без стального сердечника возникает характерный выпуклый мениск, который также обусловлен электродинамическими усилиями. Электродинамические усилия, возникающие в индукционных печах, вызывают циркулярное движение металла. Благодаря этому движению металл получается однородным по своему составу и скорость протекания металлургических реакций возрастает.

Электродинамическое перемешивание расплава. Если силы, действующие на частицы жидкости, не находятся в равновесии, то в ней возникает движение, стремящееся выравнять разность давлений. В замкнутом объеме потенциальные силы не могут вызвать движения жидкости. Для возникновения движения в замкнутом объеме необходимо, чтобы линейный интеграл главного вектора \mathbf{F} всех массовых сил, действующих в жидкости по замкнутому контуру, был отличен от нуля:

$$\oint (\mathbf{F} d\mathbf{s}) \neq 0. \quad (1)$$

Это эквивалентно требованию, чтобы

$$[\nabla \mathbf{F}] \neq 0. \quad (2)$$

Если это условие не выполняется, то все массовые силы, действующие в жидкости, суть потенциальные и движения вызвать не могут.

Можно показать, что в плоскопараллельной системе произвольной формы электродинамиче-

ское перемешивание отсутствует (приложение 1). Во всех конечных—реальных—системах циркуляция в расплаве неизбеж-

на. В частности в плоско-меридиональных полях перемешивание расплава происходит в плоскости меридианов. Чем больше такая система приближается к плоско-параллельной (отнесение концов в бесконечность), тем слабее вихревое движение. Перемешивающее усилие в плоско-меридиональных полях падает также с ростом частоты, ибо и здесь, при прочих равных условиях, с увеличением частоты поле становится все более плоским. Однако с ростом частоты (при постоянном возбуждающем поле) в таких системах растет потенциальная сила, которая, в частности, порождает мениск в индукционных печах без стального сердечника.

Электродинамическое давление в расплаве. Электродинамическая сила, действующая на элемент объема проводника, пропорциональна величине этого объема, плотности тока и магнитной индукции в нем. Таким образом, сила по величине и направлению определяется равенством

$$dF = [\delta B] dV. \quad (3)$$

Если ток распространяется вдоль оси z , то давление на грань, перпендикулярную оси y , в декартовой системе координат записывается так:

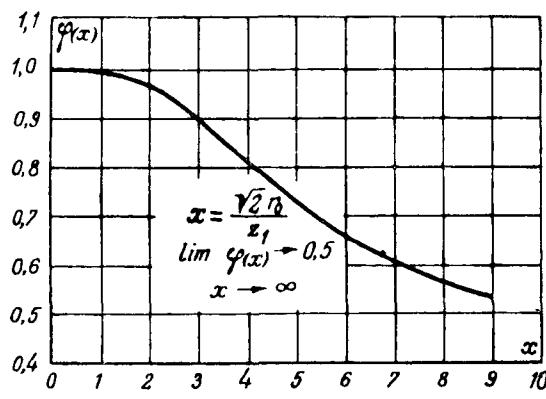
$$dp_y = \delta_z B dz. \quad (4)$$

Это же равенство в цилиндрической системе принимает вид:

$$dp_r = \delta_z B dr, \quad (5)$$

где dp_r — элементарное давление на бесконечно малую грань, перпендикулярную радиусу.

В случае переменного тока среднее элементарное давление за период можно найти из вы-



ражения:

$$dp_{med} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(B\delta^*) d\tau, \quad (5')$$

где δ^* — сопряженный с δ комплекс.

Давление в бесконечном круглом проводнике при переменном токе. Допустим, мы имеем круглый цилиндрический проводник бесконечной протяженности и пусть вдоль его оси протекает переменный ток. В результате взаимодействия этого тока и порожденного им потока возникает усилие, которое направлено к центру проводника. При известных условиях возникнет шейкообразная деформация жидкого проводника и даже его разрыв (эффект сжатия).

Исходя из выражения (5'), можно получить формулу для определения величины давления в центре проводника (приложение 2):

$$p_{med} = 1,02 \frac{I_{eff}^2}{\pi r_0^2} \varphi \left(\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right) \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right]; \quad (6)$$

здесь r_0 — радиус проводника; I_{eff} — эффективное значение тока, протекающего по проводнику; $\varphi \left(\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right)$ — некоторая функция аргумента $\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1}$ (где z_1 — глубина проникновения тока $z_1 = \frac{\sqrt{2}}{\omega \gamma \mu}$).

Эта функция может быть выражена через действительную и мнимую части функции Бесселя первого рода нулевого порядка и через их производные:

$$\begin{aligned} \varphi \left(\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right) &= \frac{1}{\left[\operatorname{ber}' \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right]^2 + \left[\operatorname{bei}' \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right]^2} \times \\ &\times \int_0^{\frac{r_0 \sqrt{2}}{z_1}} [\operatorname{bei}' x \operatorname{ber} x - \operatorname{ber}' x \operatorname{bei} x] dx. \end{aligned} \quad (7)$$

Функция $\varphi(x)$ представлена на рисунке для $0 \leq x \leq 10$ (где $x = \frac{r_0 \sqrt{2}}{z_1}$). Из графика видно, что при постоянном токе ($z_1 = \infty$)

$\varphi \left(\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right) = 1$. Таким образом, (6) вырождается для $\omega = 0$ в общезвестное выражение [Л. 1]:

$$p = 1,02 \frac{I^2}{\pi r_0^2} 10^{-8} \left[\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right]. \quad (6')$$

Если воспользоваться асимптотическими выражениями для $\operatorname{ber} x$, $\operatorname{bei} x$, $\operatorname{ber}' x$ и $\operatorname{bei}' x$, то можно легко показать, что при $x = \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \rightarrow \infty$ функция $\varphi(x) \rightarrow 0,5$. Таким образом, с ростом аргумента $\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1}$ функция $\varphi \left(\frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right)$ монотонно убывает. Когда $x \rightarrow \infty$, то

$$p_{med} \rightarrow 0,51 \frac{I_{eff}^2}{\pi r_0^2} 10^{-8} \left[\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right]. \quad (6'')$$

При плавке алюминия и его сплавов приходится делать плавильные каналы с большим поперечным сечением. В таких каналах оказывается поверхностный эффект. Поэтому в данном случае следует уровень зеркала „болота“ выбирать, исходя из (6) так, чтобы гидростатическое давление столба металла уравновесило сжимающее.

Пример. Канал круглого поперечного сечения ($r_0 = 7 \text{ см}$) заполнен жидким металлом. Удельное сопротивление металла $\rho = 2 \cdot 10^{-5} \text{ ом. см}$. Удельный вес металла $q = 2,4 \text{ гр/см}^3$. Вдоль оси канала протекает ток $I_s = 3,5 \cdot 10^4 \text{ а}$; $f = 50 \text{ гц}$. Определить давление в центре канала и высоту зеркала металла

$$z_1 = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 3,16 \text{ см}; x = \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1}; \varphi(x) = 0,88 \text{ (рисунок)},$$

$$p_{med} = 1,02 \frac{I_s^2}{\pi r_0^2} \varphi(x) \cdot 10^{-8} = 0,072 \text{ кг/см}^2$$

$$h = \frac{p_{med} \cdot 10^3}{q} = 30 \text{ см}.$$

Рассмотрим теперь давление, которое возникает в расплаве бесконечно протяженной в аксиальном направлении индукционной печи без стального сердечника.

Закон нарастания давления от края ($r = r_0$) к центру ($r = 0$) выражается уравнением (приложение 3):

$$p_{rmed} = \frac{1}{4} \mu |H_0|^2 \left[\frac{\left| J_0 \left(\sqrt{J} \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right) \right|^2 - \left| J_0 \left(\sqrt{J} \frac{\sqrt{2} r}{z_1} \right) \right|^2}{\left| J_0 \left(\sqrt{J} \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right) \right|^2} \right] \quad (8)$$

Полное усредненное за период давление в центре

$$p_{r_0 med} = \frac{1}{4} \mu |H_0|^2 \left[1 - \frac{1}{\left| J_0 \left(\sqrt{J} \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1} \right) \right|^2} \right]; \quad (9)$$

здесь r — текущий радиус ($0 \leq r \leq r_0$); r_0 — наружный радиус садки;

$J_0\left(Vj \frac{\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка от аргумента

$$Vj \frac{\sqrt{2}r_0}{z_1}, \text{ где } z_1 = \frac{\sqrt{2}}{\mu \gamma \mu}$$

H_0 — напряженность магнитного поля на поверхности садки (при $r = r_0$); μ — магнитная проницаемость.

Когда частота растет, то z_1 убывает. Поэтому $\frac{r_0 V \sqrt{2}}{z_1}$ растет с частотой. Но с увеличением аргумента растет и абсолютное значение функции $J_0\left(Vj \frac{\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)$.

Из (9) видно, что с ростом частоты давление в центре увеличивается. Это означает, что мениск резче выражен при более высоких частотах (если $H_0 = \text{const}$).

Почти во всех современных плавильных печах без стального сердечника радиус садки и принятая частота таковы, что аргумент $\frac{\sqrt{2}r_0}{z_1} \geq 10$. В этом случае, без ущерба для точности, можно пренебречь вторым членом в скобке выражения (9). Тогда приходим к простой формуле:

$$p_{r_0 \text{med}} = \frac{1}{4} \mu |H_0|^2.$$

Этой формулой на практике пользоваться неудобно ввиду того, что в эксплоатации H_0 неизвестно. Для $\frac{\sqrt{2}r_0}{z_1} \geq 10$ можно пользоваться формулой [Л. 2]:

$$P_2 = 10^{-4} \sqrt{\rho \mu_f} H_0^2 F, \quad (10)$$

где

P_2 — мощность, поглощаемая садкой печи, вт ; F — боковая поверхность садки, см^2 ; μ — относительная проницаемость расплава (равна 1 в расплаве); ρ — удельное сопротивление, $\text{ом} \cdot \text{см}$; f — частота, гц .

Значит,

$$p_{r_0 \text{med}} = 32 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{\mu}{\rho f}} \frac{P_2}{F} \left[\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right]. \quad (10')$$

Отсюда определяется высота мениска:

$$h = 32 \cdot 10^{-2} \frac{1}{q} \sqrt{\frac{\mu}{\rho f}} \frac{P_2}{F} [\text{см}], \quad (11)$$

где q — удельный вес металла, $\frac{\text{гр}}{\text{см}^3}$.

Эта формула дает преувеличенное значение для высоты мениска и является лишь первым приближением, так как садка реальной печи не бесконечна. Формула (11) показывает, что при неизменной мощности P_2 высота мениска с ростом частоты постоянна [см. формулу (10)].

Из полученных выражений для давления и высоты мениска нельзя делать каких-либо заключений относительно перемешивающих усилий индукционных печах.

Приложение 1. В бесконечно протяженном в аксиальном направлении цилиндрическом проводнике с произвольной формой поперечного сечения ротация электродинамической силы равна нулю. Если обозначить электродинамическую силу через K , то в цилиндрической системе координат

$$\left. \begin{aligned} \text{rot}_r K &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial K_z}{\partial \varphi} - r \frac{\partial K_\varphi}{\partial z} \right), \\ \text{rot}_\varphi K &= \frac{\partial K_r}{\partial z} - \frac{\partial K_z}{\partial r}, \\ \text{rot}_z K &= \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (rK_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial K_r}{\partial \varphi} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Пусть для определенности электрический вектор направлен вдоль оси z . В этом случае

$$K_z = 0; \frac{\partial K_z}{\partial z} = 0; \frac{\partial K_\varphi}{\partial r} = 0$$

(последние два равенства верны в силу плоскопараллельности поля).

Но, как известно¹:

$$K = [\delta B], \text{ где } B = e_r B_r + e_\varphi B_\varphi \text{ и } \delta = e_z \delta.$$

Таким образом,

$$K = \delta B_r [e_z; e_r] + \delta B_\varphi [e_z; e_\varphi],$$

но

$$[e_z e_r] = e_\varphi \text{ и } [e_z e_\varphi] = -e_r.$$

Поэтому

$$K = \delta e_\varphi B_r - \delta e_r B_\varphi.$$

Отсюда

$$K_r = -\delta B_\varphi \text{ и } K_\varphi = \delta B_r.$$

Подставив это в (12), получим:

$$\text{rot } K = \frac{\delta}{r} \left[\frac{\partial (rB_r)}{\partial r} + \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} \right]. \quad (13)$$

Заметим, что в нашем случае плоскопараллельного поля $\text{div } B = 0$. Расхождение вектора индукции в цилиндрической системе координат применительно к этому случаю запишется:

$$\text{div } B = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial (rB_r)}{\partial r} + \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} \right].$$

Но в силу непрерывности магнитных силовых линий $\text{div } B = 0$. Поэтому (13) равно нулю, т. е. $\text{rot } K = 0$. Значит, в любом случае плоскопараллельного электромагнитного поля движение жидкости под действием этого поля отсутствует.

Приложение 2. Если бесконечно протяженный цилиндрический провод обтекается током вдоль оси, то, как известно (Л. 4), плотность тока в точке, отстоящей от оси на расстоянии r , выражается уравнением²

$$\delta_{rz} = \delta_{r_0 z} \frac{J_0\left(Vj \frac{\sqrt{2}r}{z_1}\right)}{J_0\left(Vj \frac{\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)}. \quad (14)$$

¹ Сила K отнесена к единице объема.

² Первый индекс указывает координату, на которой „замерена“ данная плотность тока, а второй — направление распространения тока. В дальнейшем второй индекс опускается.

Аналогично можно показать, что напряженность магнитного поля выражается при помощи функции первого рода первого порядка:³

$$\dot{H}_r = \dot{H}_{r_0} \frac{J_1\left(\sqrt{j} \frac{r\sqrt{2}}{z_1}\right)}{J_1\left(\sqrt{j} \frac{r_0\sqrt{2}}{z_1}\right)}, \quad (15)$$

здесь \dot{H}_{r_0} — напряженность магнитного поля на поверхности проводника; $J_1\left(\sqrt{j} \frac{r\sqrt{2}}{z_1}\right)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка от аргумента $\left(\sqrt{j} \frac{r\sqrt{2}}{z_1}\right)$.

Из уравнения Максвелла $[\nabla \vec{E}] = -j\omega\mu\vec{H}$ непосредственно следует, что для нашего случая

$$\frac{\partial \delta}{\partial r} = j\omega\mu\dot{H}. \quad (16)$$

Тогда, памятая, что $\frac{d}{dz} J_0(z) = J_1(z)$, можем выразить δ_{r_0} через H_{r_0} :

$$\delta_{r_0} = e_r \frac{\sqrt{2j}}{z_1} \dot{H}_{r_0} \frac{J_0\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)}{J_1\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)}. \quad (17)$$

Подставляя это в (13), получим

$$\delta_r = e_r \frac{\sqrt{2j}}{z_1} \dot{H}_{r_0} \frac{J_0\left(\sqrt{2j} \frac{r}{z_1}\right)}{J_1\left(\sqrt{2j} \frac{r_0}{z_1}\right)}. \quad (18)$$

Умножив (15) на μ , мы подставим это произведение и выражение (18) в (5'). Тогда запишем:

$$dp_{med} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{\sqrt{-j^2}}{z_1} \frac{|\dot{H}_{r_0}|^2}{|J_1\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)|^2} \times \right. \\ \left. \times J_1\left(\sqrt{2j} \frac{r}{z_1}\right) J_0^*\left(\sqrt{2j} \frac{r}{z_1}\right) dz, \right] \quad (19)$$

где

$$J_0^*\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1}\right) = J_0\left(\sqrt{-j} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1}\right).$$

Давление в центре проводника выражается с помощью интеграла

$$p_{med} = \frac{\mu |\dot{H}_{r_0}|^2}{V\sqrt{2}z_1 |J_1\left(\sqrt{2j} \frac{r_0}{z_1}\right)|^2} \times \\ \times \operatorname{Re} \int_0^{r_0} \left[V-j J_1\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1}\right) J_0^*\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1}\right) \right] dr. \quad (20)$$

³ На направление напряженности магнитного поля совпадает с возрастающим углом φ , если ток распространяется вдоль положительной оси z .

Подинтегральное выражение не регулярно и поэтому данный интеграл не поддается вычислению при помощи методов комплексного интегрирования. Однако его легко вычислить графически. Следует сначала взять действительную часть подинтегрального выражения

$$p_{med} = \frac{\mu |\dot{H}_{r_0}|^2}{2 \left[\left(\operatorname{ber}' \left(\frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1} \right) \right)^2 + \left(\operatorname{bei}' \left(\frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1} \right) \right)^2 \right]} \times \\ \times \int_0^{\frac{r_0\sqrt{2}}{z_1}} [\operatorname{bei}'x \operatorname{ber}x - \operatorname{ber}'x \operatorname{bei}x] dx. \quad (21)$$

Если подставить вместо $H_{r_0} = \frac{V\sqrt{2}J_{sgf}}{2\pi r_0}$, то получим (6), где $\varphi \left(\frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1} \right)$ дается выражением (7).

Приложение 3. В случае бесконечно протяженной в аксиальном направлении индукционной печи без стального сердечника для плотности тока и напряженности магнитного поля соответственно справедливы следующие выражения [Л. 3]:

$$\delta = \frac{e_\varphi (1+j) \dot{H}_0}{z_1} \frac{J_1\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1}\right)}{J_0\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)}, \quad (22)$$

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \frac{J_0\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1}\right)}{J_0\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)}. \quad (23)$$

После подстановки в (5') и некоторых простейших преобразований, приходим к выражению

$$dp_{rmed} = \frac{1}{2} |H_0|^2 \mu \times \\ \times \frac{\operatorname{ber} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1} d \left(\operatorname{ber} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1} \right) + \operatorname{bei} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1} d \left(\operatorname{bei} \frac{V\sqrt{2}r}{z_1} \right)}{|J_0\left(\sqrt{j} \frac{V\sqrt{2}r_0}{z_1}\right)|^2}, \quad (24)$$

что после интегрирования приводит к (8).

Литература

1. Электрические промышленные печи, под редакцией А. Д. Свенчанского, Госэнергоиздат, стр. 186, формула (13,1), 1948.
2. Там же, стр. 131, формула (9,16).
3. Там же, стр. 135—136, формулы (9,32) и (9,35).
4. К. А. Круг. Теоретические основы электротехники, т. II, стр. 606, Госэнергоиздат, 1946.

[9. 6. 1950]



Автоматическое регулирование электрической дуги

Кандидат техн. наук, доц. М. В. БЕЛЯЕВ

Уральский политехнический институт им. Кирова

На целесообразность применения электромашинных усилителей для непрерывного автоматического регулирования дуговых электропечей неоднократно указывалось в периодической литературе [Л. 1, 2 и др.].

Для обеспечения высокой производительности производственного агрегата схема автоматического регулирования должна обладать надежной устойчивостью, высокой точностью в работе и быстродействием. Оценить эти свойства не только с качественной, но и с количественной стороны можно лишь на основе глубокого математического анализа переходных процессов в схеме и широких экспериментальных исследований этой схемы в производственных условиях.

Физические явления, сопровождающие процесс автоматического регулирования, отличаются большим разнообразием и сложностью, поэтому на пути проведения математического анализа встречаются большие, часто непреодолимые трудности. Отсюда вытекает необходимость теоретического и экспериментального исследования схемы автоматического регулирования электрической дуги в простейшем, скелетном, виде. На рис. 1 изображена такая схема.

Электропривод перемещения одного электрода состоит из двигателя независимого возбуждения, питаемого от электромашинного усилителя, который возбуждается от двух встречно включенных обмоток возбуждения. Ток возбуждения одной из этих обмоток зависит от тока электрической дуги, а ток возбуждения другой обмотки зависит от напряжения дуги.

Для преобразования переменного тока дуги в постоянный ток возбуждения электромашинного усилителя служат меднозакисные выпрямители, включенные по схеме двухполупериодного выпрямления. Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока и устранения высших гармоник применялись не показанные для наглядности схемы, электрические фильтры, составленные из после-

Излагаются результаты теоретического и опытного исследования схемы автоматического регулирования электрической дуги на лабораторной установке. Показано, что посредством применения простой схемы электромашинной автоматики можно успешно осуществить устойчивое регулирование электрической дуги. Установлены в общем виде соотношения параметров, обеспечивающие устойчивость работы такой схемы. Показано, что для повышения чувствительности и быстродействия схемы следует применять перекомпенсированные электромашинные усилители.

довательно-параллельного включения ёмкости и индуктивности.

Наличие высокого коэффициента усиления и сильной компенсационной обмотки электромашинного усилителя придает схеме свойства высокой чувствительности. При малом боты от заданного электроподжечения электрода и поэтотамперной характеристики характеристик медно-закиси не являются существенно ая чувствительность схемы ботать на линейной частиничивания электромашинно- указанных обстоятельственных процессов в схеме и линейными.

ствительности. При малом отклонении режима работы от заданного электропривод начинает перемещение электрода и поэтому нелинейности вольтамперной характеристики дуги и нелинейности характеристик медно-закисных выпрямителей схемы не являются существенно заметными. Повышенная чувствительность схемы дает возможность работать на линейной части характеристики намагничивания электромашинного усилителя. Ввиду указанных обстоятельств можно считать переходные процессы в схеме в первом приближении линейными.

Автоматическое регулирование электрической дуги заключается в поддержании постоянства заданного тока. При его изменении начинается автоматическое перемещение подвижного электрода в сторону восстановления заданного режима тока дуги. В результате перемещения электрода уничтожается причина, вызывающая это перемещение, т. е. исчезает импульс, поданный в схему для работы электропривода. Такая система регулирования является замкнутой.

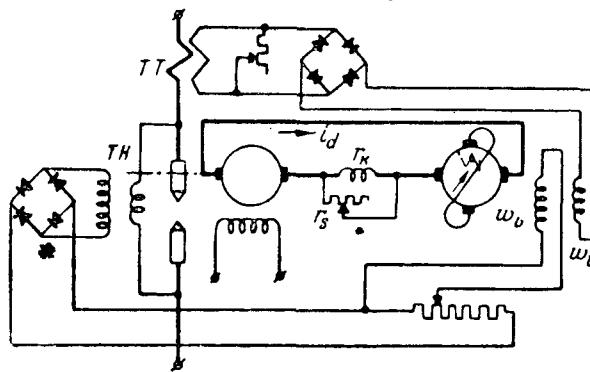


Рис. 1. Схема автоматического регулирования электрической дуги.

Внешнее возмущение — нарушение заданного режима горения электрической дуги — возникает в производственных условиях очень быстро, практически мгновенно. Перемещение электрода начинается по мере преодоления электромагнитной и механической инерции системы регулирования. Постоянные электромагнитной и механической инерции различны по своей величине. В особенности малы постоянные электромагнитной инерции обмоток возбуждения электромашинного усилителя и, кроме того, эти обмотки постоянно возбуждены при неподвижном состоянии электропривода перемещения электрода. Предполагая, что токи возбуждения электромашинного усилителя изменяются одновременно с изменением тока и напряжения дуги, можно составить систему дифференциальных уравнений для рассматриваемой схемы в следующем виде:

$$L_q \frac{di_q}{dt} + r_q i_q = \beta (F_i - F_v + F_k), \quad (1)$$

$$L_d \frac{di_d}{dt} + \left(r_d + \frac{r_k r_s}{r_k + r_s} \right) i_d + c_e n = k_q i_q, \quad (2)$$

$$c_m i_d = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + M_s, \quad (3)$$

$$i_d = i_k + i_s, \quad (4)$$

$$L_k \frac{di_k}{dt} + r_k i_k = r_s i_s, \quad (5)$$

$$\gamma \Delta l = -(F_i - F_v), \quad (6)$$

$$\Delta l = \int n dt. \quad (7)$$

Если ток дуги равен заданной величине, то $F_i = F_v$ и электромашинный усилитель не возбужден, а поэтому $F_k = 0$.

При отклонении режима дуги от заданного возникает небаланс $F_i \neq F_v$ и электромашинный усилитель возбуждается, а поэтому появляются ампервитки компенсационной обмотки, усиливающие его возбуждение в случае перекомпенсации реакции якоря. Перекомпенсация электромашинного усилителя повышает чувствительность системы регулирования, так как при малом отклонении от состояния равновесия ампервитков возбуждения электропривод начинает работать, перемещая подвижный электрод. Посредством компенсационной обмотки осуществляется форсировка возбуждения, так как пуск электропривода сопровождается сравнительно большим толчком пускового тока, спадающим по мере разгона электропривода.

Электромашинный усилитель возбуждается от алгебраической суммы ампервитков, как показывается в уравнении (1).

В момент нарушения режима горения дуги разность ампервитков возбуждения $F_i - F_v$ становится мгновенно равной некоторой, вполне определенной, конечной величине в зависимости

от силы внешнего воздействия. По мере перемещения электродов и изменения длины дуги эта разность ампервитков уменьшается и при восстановлении нарушенного равновесия становится равной нулю. Равновесие восстанавливается тогда, когда расстояние между электродами в соответствии с вольтамперной характеристикой дуги принимает такое значение, при котором получается равенство ампервитков возбуждения электромашинного усилителя, $F_i = F_v$. Между величиной дугового промежутка и разностью этих ампервитков существует жесткая связь.

Система регулирования действует в направлении устранения неравенства ампервитков возбуждения. Перемещение электродов совершается автоматически в обратном направлении возникающему неравенству этих ампервитков. Это один из примеров общего свойства замкнутых систем автоматического регулирования [Л. 3]. Это свойство выражается в рассматриваемой задаче уравнением (6).

При составлении уравнения (2) приняты некоторые упрощения. В главной цепи схемы имеется контур компенсационной обмотки и шунтирующего ее сопротивления. Величина этого сопротивления в несколько десятков раз больше, чем общая величина сопротивления главной цепи и поэтому, как показывают простые расчеты, главную цепь можно считать одним инерционным звеном [Л. 3].

Совместное решение составленной системы дифференциальных уравнений относительно наиболее интересной с практической точки зрения величины скорости перемещения электрода дает однородное дифференциальное уравнение (приложение 1):

$$\theta T_d T_q \frac{d^3 n}{dt^3} + \theta (T_d + T_q) \frac{d^2 n}{dt^2} + [T_q + (1 - B)\theta] \frac{dn}{dt} + n + A \int n dt = (B - 1) \Delta n. \quad (8)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$n = c_k e^{x_k t} \quad (k = 1, 2, 3, 4).$$

Характер переходного процесса зависит от знаков корней характеристического уравнения:

$$\theta T_d T_q x^4 + \theta (T_d + T_q) x^3 + [T_q + (1 - B)\theta] x^2 + x + A = 0. \quad (9)$$

Если значения корней или их вещественных частей будут отрицательны, то переходный процесс будет затухающим.

Условие затухания переходных процессов в рассматриваемой схеме выражается наличием двух неравенств

$$T_q + (1 - B)\theta > \frac{T_q T_d}{T_d + T_q}, \quad (10)$$

$$T_q + (1 - B)\theta - A\theta (T_d + T_q) > \frac{T_d T_q}{T_d + T_q}. \quad (11)$$

Правые части этих неравенств всегда положительны и малы по абсолютной величине, так как значения постоянных времени являются положительными величинами и $T_d \ll T_q$.

Устойчивость работы системы регулирования зависит от ее структуры и соотношения параметров. В рассматриваемой задаче структура системы была предварительно задана и поэтому необходимо найти лишь соотношение параметров, обеспечивающее устойчивость работы системы регулирования. Это соотношение получается из неравенства (11):

$$T_q + \theta(1 - B) > A\theta(T_d + T_q). \quad (12)$$

Это неравенство можно изменять за счет подбора величины шунтирующего сопротивления r_s , так как T_d , θ , B , A зависят от его величины.

Подсчеты (приложение 2) и опыт показывают, что при соблюдении этого неравенства устойчивость работы системы автоматического регулирования дуги обеспечивается.

С практической точки зрения является интересным не только затухающий процесс, но крайне желателен апериодически затухающий процесс.

В рассматриваемой схеме возможны колебания скорости электропривода около нового состояния равновесия. В маховых массах во время движения электропривода запасена кинетическая энергия. В электромагнитных контурах схемы и, в особенности, в коротко замкнутом контуре электромашинного усилителя запасается электромагнитная энергия.

В схеме существуют возможности перехода энергии из одной формы в другую.

Когда электропривод подходит после устранения внешних возмущений к новому состоянию равновесия $F_i = F_v$, то независимое возбуждение электромашинного усилителя исчезает и остается лишь возбуждение за счет электромагнитной энергии, связанной с короткозамкнутым контуром и контуром компенсационной обмотки этого усилителя. Наличие этой энергии и кинетической энергии маховых масс обеспечивает перемещение электрода в сторону нарушения состояния равновесия и вызывает небаланс ампервитков $F_i \neq F_v$, в результате чего происходит перемагничивание электромашинного усилителя и возникает обратное перемещение электродов. Такое же явление может возникнуть за счет разных скоростей рассеивания кинетической и электромагнитной энергии. Если затухание э. д. с. электромашинного усилителя происходит быстрее, чем затухание противо-э. д. с. двигателя, то возникает обратный толчок тока, который не только размагничивает, но и может перемагнить электромашинный усилитель в случае его перекомпенсации.

В качестве первого приближения для определения условий апериодичности процесса регулирования следует рассмотреть работу системы регулирования вблизи состояния равновесия посленейтрализации внешних возмущений. При этом работа системы определяется характером затуха-

ния ампервитков компенсационной обмотки. Если $\theta < T_q$, то затухание F_k происходит быстро, так как скорость перемещения электрода спадает почти так же быстро, как и э. д. с. электромашинного усилителя. Перемещение электрода за счет механической инерции будет незначительным. Электродвижущая сила электромашинного усилителя будет спадать апериодически, так как эта э. д. с. обусловлена в рассматриваемом случае лишь током короткозамкнутого контура, который является инерционным звеном и поэтому уравнение (5) принимает такой вид:

$$T_q \frac{di_q}{dt} + i_q = 0. \quad (5')$$

Совместное решение системы дифференциальных уравнений относительно скорости перемещения электрода дает дифференциальное уравнение:

$$\theta T_d T_q \frac{d^3 n}{dt^3} + \theta (T_d + T_q) \frac{d^2 n}{dt^2} + (T_q + \theta) \frac{dn}{dt} + n + \Delta n = 0. \quad (13)$$

Характеристическое уравнение

$$\theta T_d T_q x^3 + \theta (T_d + T_q) x^2 + (T_q + \theta) x + 1 = 0 \quad (14)$$

раскладывается на первоначальные множители и при условии, что $\theta > 4T_d$, все корни этого уравнения будут вещественными и отрицательными.

Большую роль при этом играет статический момент, который заглушает малые колебания скорости электропривода, так как препятствует перемещению электродов как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения длины дуги.

Опыты показывают, что апериодический процесс в рассматриваемой системе регулирования вполне возможен. Вопрос о точности регулирования тесно связан с наличием петли гистерезиса и статического момента. Рассмотрение этого вопроса может составить содержание отдельной статьи.

Быстродействие системы регулирования может быть оценено лишь только с качественной стороны, так как получить выражение интегральной кривой $n = f(t)$ в общем виде невозможно. Следует лишь отметить, что перекомпенсация электромашинного усилителя, т. е. увеличение шунтирующей компенсационную обмотку сопротивления, способствует повышению быстродействия или ускоряет процесс регулирования электрической дуги, но ухудшает устойчивость системы регулирования. При этом возникает необходимость применения стабилизирующих устройств.

Данные опыта¹. На опытной установке, позволяющей осуществить регулирование горизонтальной электрической дуги, один из электродов был неподвижен, а перемещение другого осу-

¹ В проведении опытной части работы принимал участие студент дипломант Уральского политехнического института В. В. Пилат.

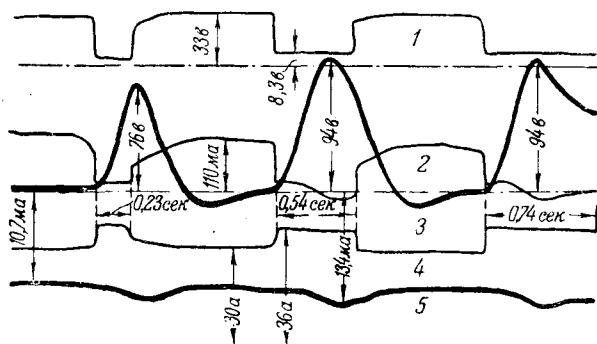


Рис. 2. Осциллограммы незатухающего процесса регулирования при $r_s = 35 \text{ ом}$.

ществлялось через редуктор двигателем 1,2 квт 220 в 1450 об/мин, питаемом от электромашинного усилителя типа ЭМУ5-3000 4,5 квт.

Предварительно были сняты зависимости токов возбуждения электромашинного усилителя от тока и напряжения электрической дуги, а также характеристики медно-закисных выпрямителей.

В пределах изменения тока дуги от 15 до 40 а эти зависимости являются почти линейными.

Для изучения переходных процессов в схеме были сняты многочисленные осциллограммы, которые показали возможность возникновения как затухающих, так и незатухающих процессов.

На рис. 2 показаны осциллограммы незатухающих процессов: 4 — ток электрической дуги; 5 — ток возбуждения электромашинного усилителя, зависящий от тока дуги; 1 — напряжение электрической дуги; 2 — ток возбуждения электромашинного усилителя, зависящий от напряжения дуги. Эти осциллограммы показывают, что предположение одновременности изменения токов возбуждения электромашинного усилителя, тока и напряжения дуги, принятное в теоретической части, справедливо; 3 — напряжение электромашинного усилителя, которое показывает колебательный характер скорости электропривода. Осциллограммы 1—5 сняты при сопротивлении шунта компенсационной обмотки 35 ом, что теоретически соответствует незатухающему процессу в схеме регулирования.

На рис. 3 показаны также осциллограммы незатухающих, но более медленных, чем на рис. 2, процессов. Нумерация осциллограммы та же самая, что и на рис. 2. Эти осциллограммы сняты

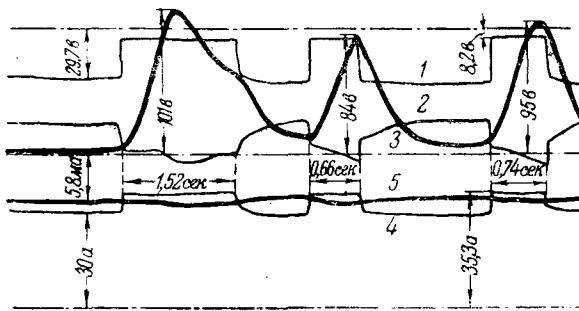


Рис. 3. Осциллограммы незатухающего процесса регулирования при $r_s = 30 \text{ ом}$.

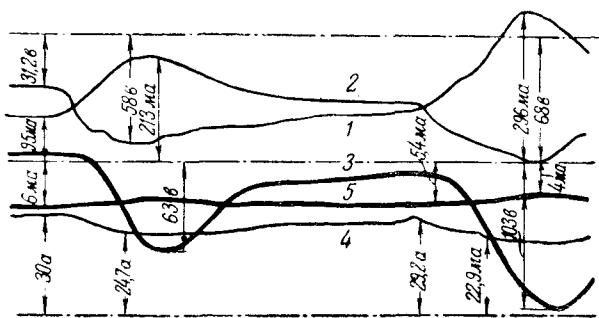


Рис. 4. Осциллограммы затухающего процесса регулирования.

при сопротивлении шунта 30 ом, что также увязывается с теоретической частью статьи.

На рис. 4 показаны осциллограммы затухающего, апериодического процесса. Заметно, что система медленно возвращается к состоянию равновесия. Это объясняется малой величиной сопротивления шунта в 18 ом, в результате чего получается слабая форсировка возбуждения электромашинного усилителя, но при восстановлении равновесия не происходит перемагничивания электромашинного усилителя.

Были также проделаны опыты с электрической дугой на той же самой установке, включая и электропривод перемещения электрода, но вместо электромашинного усилителя ЭМУ5-3000 был использован электромашинный усилитель ЭМУ2,5-3000, 2,5 квт, у которого компенсационная обмотка имеет малое число ампервитков. Автоматическое регулирование получается слишком замедленным и неточным. Схема отличается малой чувствительностью.

Эти опыты показывают, что скелетная схема автоматического регулирования электрической дуги может быть сделана устойчивой и достаточно быстродействующей посредством подбора сопротивления шунта компенсационной обмотки. Следует применять в таких схемах регулирования перекомпенсированные электромашинные усилители, так как степень перекомпенсации и даже недокомпенсацию можно всегда изменять посредством сопротивления шунта компенсационной обмотки.

Заключение. Рассмотренная схема автоматического регулирования электрической дуги может быть принята как первый шаг на пути разработки и внедрения промышленной схемы автоматизации дуговых электропечей с применением электромашинного усилителя. Учитывая бурный характер протекания процессов плавления шихты, а также неравномерный ход дуговых электропечей в других фазах металлургического процесса, следует схему дополнить стабилизирующими звенями. Эти стабилизирующие звенья должны обладать малой собственной инерцией.

Приложение 1. Подставляя уравнение (3) в (2), а затем полученный результат в уравнение (1) и вводя величины постоянных электромагнитной и электромеханической инерции

$$T_d = \frac{L_d}{r_d + \frac{r_k r_s}{r_k + r_s}} ; T_q = \frac{L_q}{r_q} ;$$

$$\theta = \frac{GD^2}{375c_m c_e} \left(r_d + \frac{r_k r_s}{r_k + r_s} \right),$$

получаем дифференциальное уравнение:

$$\theta T_d T_q \frac{d^3 n}{dt^3} + \theta (T_d + T_q) \frac{d^2 n}{dt^2} + (\theta + T_q) \frac{dn}{dt} + \\ + n + \Delta n = \frac{\beta k_q}{c_e r_q} (F_e - F_v + F_k).$$

Подставляя в правую часть этого уравнения выражения ампервитков возбуждения, зависящих от электрической дуги, через посредство уравнений (6, 7) получаем

$$\theta T_d T_q \frac{d^3 n}{dt^3} + \theta (T_d + T_q) \frac{d^2 n}{dt^2} + (\theta + T_q) \frac{dn}{dt} + n + \Delta n = \\ = - \frac{\beta \gamma k_q}{c_e r_q} \int n dt + \frac{\beta k_q}{c_e r_q} w_k i_k. \quad (8')$$

Решая совместно уравнения (4, 5), получаем:

$$T_k \frac{di_k}{dt} + i_k = \frac{r_s}{r_k + r_s} i_d;$$

$$T_k = \frac{L_k}{r_k + r_s}.$$

Так как $r_s \gg r_k$, то $T_k < T_d < T_q$ и отсюда

$$i_k = \frac{r_s}{r_s + r_k} i_d.$$

Выражая i_d через посредство уравнения (3) и подставляя значение i_k в (8'), получаем уравнение (8), где

$$A = \frac{\beta k_q}{c_e r_q}; \quad B = \frac{\beta w_k k_q}{r_q (r_d + r_k)}, \text{ так как } r_k < r_s.$$

Приложение 2. В основу численных расчетов положены данные опыта. Постоянные электромагнитной инерции были определены посредством снятия дополнительных осцилограмм. Например, для определения постоянной электромагнитной инерции короткозамкнутого контура были сняты осцилограммы тока этого контура в увеличенном масштабе. Подобные осцилограммы показали, что $T_k = 0,005$ сек, $T_d = 0,015$ сек, $T_q = 0,06$ сек.

Постоянная электромеханической инерции была определена также посредством опыта. Эта постоянная зависит от омического сопротивления главной цепи, которое меняется в небольших пределах в связи с изменением величины шунтирующего сопротивления. Для $r_s = (20 \div 40)$ ом $\theta = (0,42 \div 0,45)$ сек.

Величины A и B были определены также опытным путем. Эти величины зависят от степени компенсации электромашинного усилителя, т. е. от ампервитков компенсационной обмотки, число которых зависит от величины шунтирующего сопротивления. Снимая внешние характеристики электромашинного усилителя при различных сопротивлениях шунта компенсационной обмотки, можно найти величины A и B . Можно также определить эти величины, пользуясь графическим способом построения внешних характеристик при различных сопротивлениях шунта по одной известной внешней характеристике и характеристике намагничивания электромашинного усилителя.

Чем больше величина шунтирующего сопротивления, тем больше ампервитки компенсационной обмотки при одном и том же нагружочном токе, и тем больше величины A и B , т. е. тем сильнее изменяется неравенство (12).

Величина A имеет размерность $\frac{1}{сек}$, а B является безразмерной величиной.

Для $r_s = (20 \div 40)$ ом, $A = (4,1 \div 6,2) \frac{1}{сек}$, $B = (0,7 \div 0,9)$.

Разница величин A и B получилась за счет малой величины c_e , стоящей в знаменателе.

Эта величина для быстроходных машин малой мощности невелика. Для двигателя перемещения электрода $c_e = 0,145$ ом.

Подставляя значения T_d , T_q , θ , A и B в неравенство (12), убеждаемся, что оно справедливо для малых r_s и несправедливо для больших. Величина r_s влияет не только на изменение параметров схемы, сколько на характеристики электромашинного усилителя. Главными величинами определяющими устойчивость рассматриваемой схемы регулирования, являются величины θ и r_s . Это утверждение хорошо согласовывается с опытом. Так, например, на лабораторной установке при увеличении маховых масс не удалось добиться устойчивой работы схемы.

О б о з н а ч е н и я .

F_i , F_v , F_k — ампервитки, зависящие от тока и напряжения дуги и тока компенсационной обмотки;

L_q , L_d — индуктивности короткозамкнутого контура и главной цепи схемы;

r_q , r_d , r_k , r_s — омические сопротивления короткозамкнутого контура, главной цепи схемы, компенсационной обмотки и ее шунта;

k_q — коэффициент пропорциональности между током короткозамкнутого контура и э. д. с. электромашинного усилителя;

β — тангенс угла наклона характеристики намагничивания короткозамкнутого контура;

c_m — коэффициент пропорциональности между током и крутящим моментом двигателя;

c_e — то же между противо- э. д. с. и скоростью двигателя;

γ — то же между напряжением дуги и длиной дуги;

i_q , i_d , i_k — токи короткозамкнутого контура, главной цепи схемы и компенсационной обмотки;

n — скорость электропривода;

GD^2 — маховой момент электропривода;

M_s — статический момент на валу двигателя;

w_k — число витков компенсационной обмотки с учетом реакции якоря;

θ , T_d , T_q , T_k — постоянные электромеханической инерции электропривода, электромагнитной инерции главной цепи схемы, короткозамкнутого контура и компенсационной обмотки.

Литература

1. С. И. Тельный, Автоматическое регулирование трехфазных дуговых электропечей. Электричество, № 5, 1946.

2. Ю. Е. Ефрович. К теории регулирования дуговых электросталеплавильных печей. Электричество, № 12, 1945.

3. Д. И. Марьяновский. Устойчивость линейных систем автоматического регулирования. Электричество, № 9, 1946.

[25. 5. 1950]



Учет электроэнергии в вагонах трамвая¹

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

В настоящее время учет электрической энергии на трамвае ведется укрупненно, путем определения расхода электрической энергии на шинах тяговой подстанции, со стороны постоянного, а иногда и переменного тока. Учет же электрической энергии, непосредственно на подвижном составе трамвая нигде не проводится. Внедрение такого учета может дать только по московскому трамваю, экономию электроэнергии порядка 15 млн. квт·ч в год.

Лабораторией городского электротранспорта Академии коммунального хозяйства, под руководством автора, проведена работа по проверке нового типа счетчиков электроэнергии в эксплоатационных условиях. В процессе экспериментальных исследований выявлен также удельный расход электроэнергии для новых четырехосных трамвайных вагонов. Расход электрической энергии измерялся для тяговых двигателей ПТ-35а, ДТИ-60 и ДК-255а.

Исследования проводились на четырехосных трамваях серии МТВ-82, оборудованных тихоходными и быстроходными тяговыми двигателями. Основные данные исследуемых трамвайных вагонов и двигателей приводятся в табл. 1. Следует отметить, что исследования удельного расхода электрической энергии для трамваев с быстроход-

Освещены результаты исследований, проведенных Академией коммунального хозяйства в эксплоатационных условиях по учету электроэнергии непосредственно на подвижном составе трамвая с помощью счетчиков специальной конструкции. Полученные результаты показали полную возможность введения повагонного учета расхода электроэнергии.

ными тяговыми двигателями проводятся впервые [Л. 1, 2]. Измерения проводились в Москве, в основном на трассе замкнутого кругового маршрута трамвая № 15 протяженностью около 17 км. Всего было сделано 5 440 полурейсов, в том числе: 4 150 на вагоне с двигателями ПТ-35а, 760 с двигателями ДТИ-60 и 530 с двигателями ДК-255а.

В отличие от предыдущих исследований при искусственной балластировке подвижного состава трамвая измерения проводились нами в нормальных условиях, при заполнении вагона пассажирами, что обеспечивало возможность более точного учета всех особенностей эксплоатации.

Схема включения счетчика энергии при проверке его постоянной и при опытных измерениях дана на рис. 1. Счетчик был выполнен на номинальный ток 500 а при напряжении 600 в, его рабочий ток 15 а при напряжении 30 в; механическая постоянная 5,33. Счетчик энергии, вместе с добавочным сопротивлением и шунтом монтировался в кабине вагоновожатого.

Определение удельного расхода электрической энергии проводилось как для нормальной эксплоатации вагона с пассажирами, так и без пассажиров, в условиях ночного движения.

В первом случае измерения велись как на укрупненных участках маршрута, включающих 3—5 остановочных пунктов с учетом среднего числа пассажиров, так и в суточном разрезе с ежедневной фиксацией показаний счетчика и пробега вагона. При ежесуточных измерениях

¹ По материалам доклада автора на Научно-техническом совещании Академии коммунального хозяйства им. Памфилова совместно с Автомобильно-дорожным институтом им. Молотова, в марте 1950 г.

Таблица 1

Тип вагона	Полный вес вагона, т		Число тяговых двигателей	Число позиций контроллера	Тип тягового двигателя	Рабочее напряжение, в	Часовые параметры			Относительный вес, кг/квт	Передаточное число при $D_K = 780$ м·и
	без пассажиров	с пассажирами					ток, а	скорость вращения, об/мин	мощность, квт		
МТВ-82	19,5	23,4	4	9	ПТ-35а	550	80	660	39,6	22,0	4,4
МТВ-82	19,5	23,4	4	9	ДТИ-60	550	112	810	55,0	17,5	5,07
МТВ-82	18,7	22,6	4	12	ДК-255а	300	210	1 650	54,0	9,3	8,11

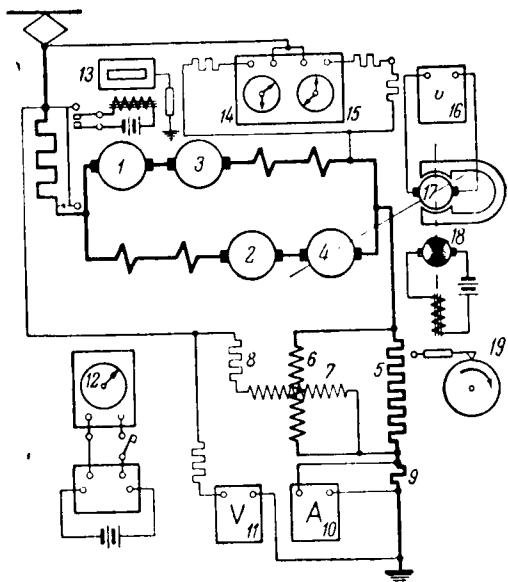


Рис. 1. Схема включения счетчика энергии и контрольных приборов на вагоне трамвая.

1—4—тяговые двигатели; 5—шунт счетчика на 500 а; 6—серийная обмотка счетчика; 7—якорь счетчика; 8—добавочное сопротивление к якорю счетчика 2000 ом; 9—шунт для контрольных измерений; 10—амперметр для контрольных измерений; 11—вольтметр для контрольных измерений; 12—электромагнитный счетчик числа пусков; 13—электрические часы для определения времени езды на последовательном и параллельном соединении тяговых двигателей; 16—спидометр; 17—таходинамо, как датчик спидометра; 18—датчик отмечатика пути; 19—быстроходный электромагнитный отмечатель пути.

среднего значения удельного расхода электроэнергии, согласно эксплоатационным наблюдениям, среднесуточное наполнение вагона принималось в 60 пассажиров на вагон, а пробег исследуемых вагонов учитывался по фактическим данным диспетчерского пункта, с учетом нулевых пробегов и маневровой эксплоатации.

Результаты измерений за время с 6 июля по 31 декабря 1949 г. даны в табл. 2. На основании

Таблица 2

Тип вагона	Тип тягового двигателя	Среднее расстояние между остановочными пунктами, м	Ходовая скорость, км/час	Удельный расход электроэнергии, втч/т км
МТВ-82	ПТ-35а	505	16,1	59,1
МТВ-82	ДТИ-60	505	16,1	59,3
МТВ-82	ДК-255а	505	16,1	70,5

приведенных цифр можно сделать вывод, что удельный расход электроэнергии у быстроходных двигателей больше и практически одинаков у двигателей ПТ-35а и ДТИ-60, что позволяет отказаться от применения ненадежных в эксплоатации тяговых двигателей ПТ-35а [Л. 3].

Расход электрической энергии на всем протяжении исследуемой трассы не остается постоянным, а колеблется в значительных пределах, например, для вагона, оборудованного тихоходными тяговыми двигателями, — в пределах от 44,2 втч/т км до 73 втч/т км, вследствие различ-

ного расстояния между остановочными пунктами (от 320 до 880 м).

Зависимость удельного расхода электроэнергии от времени суток не носит строго закономерного характера, что может быть объяснено изменением плотности уличного движения, числа вынужденных пусков и различной скоростью движения.

Характерным является сопоставление режима движения в часы малой нагрузки и в часы пик, когда существенное влияние на величину удельного расхода электроэнергии оказывают вынужденные задержки движения.

Как показали исследования с помощью регистрирующих приборов, в мае 1950 г., в эксплоатационных условиях имеет место картина, характеризуемая приведенными в табл. 3 средневзвешенными соотношениями, абсолютная величина которых может несколько изменяться в зависимости от маршрута трамвая при сохранении, однако, существенной тенденции к значительному увеличению числа и времени вынужденных остановок в часы пик по сравнению с режимом движения в часы малой нагрузки.

Таблица 3

Наименование элементов, характеризующих режим движения	Соотношение элементов эксплоатационного режима	
	при средней нагрузке, %	в часы пик, %
Общее время полурейса . . .	100	100
Время нахождения вагона в движении	83,3	78,0
Фактическое время стоянки на остановочных пунктах . . .	12,5	10,5
Время вынужденных остановок . . .	4,2	11,5
Фактическое время стоянки на остановочных пунктах по отношению к плановому . . .	136,0	140,0
Число пусков вагона по отношению к плану	200,0	294,0
Общее время остановок по отношению к плановому . . .	180,0	291,0
Время езды под током по отношению к общему времени полурейса	31,3	35,3
Время следования вагона на выбеге	52,0	42,5
Число вынужденных остановок по отношению к плановым	30,8	116,0
Время вынужденных остановок по отношению к времени плановых остановок . .	45,5	152,0
Изменение общего времени полурейса в часы пик по сравнению с временем полурейса в условиях нормального движения	100,0	123,0
Сравнительный удельный расход электроэнергии	100,0	170,0
Средняя продолжительность плановой остановки, сек . .	16,2	16,8
Скорость сообщения, км/час . .	15,5	12,6
Ходовая скорость, км/час . .	18,5	16,1

Расход электрической энергии не остается также постоянным и по дням наблюдений. Изменения эти зависят не только от режима ведения

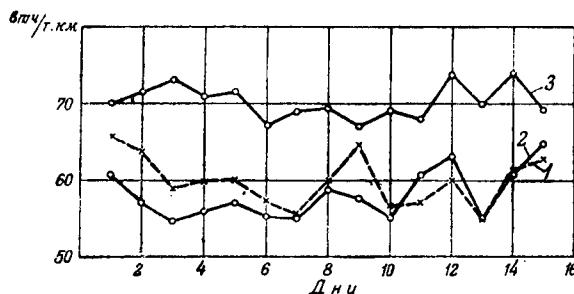


Рис. 2. График среднесуточного удельного расхода электроэнергии за часть периода исследований. Вагоны МТВ-82: 1—с двигателями ПТ-35а; 2—с двигателями ДТИ-60; 3—с двигателями ДК-255а.

поезда, но также от метеорологических условий, среднего наполнения вагона пассажирами, величины пусковых ускорений, тормозных замедлений и целого ряда других причин. Образец графика нагрузки за часть экспериментального периода для различных типов двигателей представлен на рис. 2.

Опытная эксплоатация счетчиков энергии на подвижном составе трамвая показала, что при умелом ведении поезда, без лишних пусков и торможений, с рациональным использованием выбега вагона отдельные вагоновожатые добиваются экономии электроэнергии, достигающей 20% по сравнению с расходом энергии другими вагоновожатыми.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности применения испытанных счетчиков энергии для повагонного учета электроэнергии. Полученные данные удельного расхода электроэнергии не могут, однако, еще рассматриваться как нормативы. Для получения обоснованных норм расхода электроэнергии должна быть проведена специальная работа, охватывающая различные условия эксплоатации и различные типы подвижного состава трамвая.

Следует считать целесообразным в отдельных городах, впредь до обеспечения массового выпуска промышленностью счетчиков энергии для трамвая, оборудовать ими один или несколько вагонов, и пускать их эксплоатацию на различных маршрутах города под управлением лучших вагоновожатых. Это мероприятие даст

возможность, с одной стороны, установить предварительные нормы расхода электроэнергии для различных маршрутов, а с другой стороны, позволит осуществить проверку работы всех вагоновожатых при прохождении ими контрольно-инструкционных поездок на вагонах, оборудованных счетчиками энергии.

Проведенные исследования показали стабильную работу на подвижном составе счетчиков энергии электродинамического типа, реконструированных Академией коммунального хозяйства. Применение на счетчиках экранированных серийных катушек предупредило размагничивание тормозных магнитов, что обеспечило точность показаний в пределах $\pm 3\%$ для случая прерывисто-кратковременной нагрузки с длительностью цикла до 0,5 сек. Качающиеся амортизированные траверсы щеткодержателей обеспечили равномерный износ коллекторов при безискровой их работе в условиях эксплоатации. Установка на опорных подшипниках счетчика энергии промежуточных стальных шариков в дополнение к агатово-рубиновым опорам вполне себя оправдала. Опытная эксплоатация вывела целесообразность заливки добавочных сопротивлений счетчика парафином, в целях устранения их гигроскопичности и полной герметизации.

В целях обеспечения постоянного учета расхода электрической энергии на подвижном составе трамвая перед промышленностью должна быть поставлена задача скорейшего освоения серийного выпуска специальных электродинамических счетчиков энергии постоянного тока для вагонов трамвая, учитывающих в своей конструкции результаты эксплоатационных исследований и замечания, сделанные Академией коммунального хозяйства.

Литература

- Ю. М. Галонен. Исследование работы электродинамических счетчиков энергии при двигательно-рекуперативной нагрузке. Электричество, № 1—2, 1944.
- Ю. М. Галонен. Удельный расход электроэнергии подвижного состава трамвая с компаундными и серийными двигателями. Электричество, № 4, 1944.
- Ю. М. Галонен. Анализ аварийности трамвайных тяговых двигателей. Труды ВНИТО городского электротранспорта, вып. 8, 1948.

[8. 7. 1950]



Защита устройств СЦБ от влияния электротяги переменного тока.

Кандидат техн. наук, доц. Н. З. ШАЦЕВ

Военно-транспортная академия

Защита устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на железнодорожном транспорте от влияния электротяги переменного тока должна иметь принципиальную особенность, отличающую ее от защиты устройств связи. В устройствах СЦБ, обеспечивающих безопасность движения поездов, не может быть допущено ни одного ложного срабатывания прибора, так как это может привести к крушению поезда; в то же время отказ в работе некоторых приборов не так опасен, хотя это и может привести к задержке поездов. По этой причине при рассмотрении помех надо учитывать максимально возможные, а не средние значения.

Однофазная электрическая тяга, которая, несомненно, будет внедрена на железных дорогах СССР, может создать помехи в следующих цепях СЦБ.

1. Однопроводные цепи полуавтоматической блокировки; длина цепи равна длине перегона; приемник энергии — блок-механизм, работающий от переменного тока.

2. Однопроводные цепи электрорежевзловой системы; длина цепи равна длине перегона; приемник энергии — электрозатвор, работающий на постоянном токе.

3. Двухпроводные линейные цепи автоматической блокировки; длина цепей на двухпутных участках доходит до 3 км, а на однопутных участках — до длины перегона; приемник энергии в большинстве случаев — электромагнитное реле постоянного тока.

4. Двухпроводные рельсовые цепи автоматической блокировки и электрической централизации длиной 1—3 км.

5. Питающая линия автоблокировки (в большинстве случаев трехфазная).

Основные мероприятия по защите линий электрорежевзловой системы и полуавтоматической блокировки, а также линейных цепей автоблокировки в основном совпадают с мероприятиями по защите линий связи [Л. 1].

Исследованы методы защиты от влияния электротяги однофазного тока на электрорежевзовую систему, полуавтоматическую блокировку, линейные и рельсовые цепи автоматической блокировки и цепи электрической централизации.

Наиболее реальными мероприятиями являются установка отсасывающих трансформаторов без добавочного провода и замена однопроводных цепей двухпроводными; но этого недостаточно. Типовой блок-механизм работает от переменного тока как $16\frac{2}{3}$ гц, так и 50 гц при напряжении 15—25 в. От применения блок-механизмов переменного тока на участках с электротягой переменного тока следует отказаться. Радикальным решением для полуавтоматической блокировки является переход на системы, имеющие приемник постоянного тока. К этим системам следует отнести в первую очередь полуавтоматическую блокировку системы Д. С. Трегера, работающую на постоянном токе и отличающуюся важной особенностью — приемники энергии normally выключены из линий и этим защищены в значительной мере от возможности ложных срабатываний [Л. 2].

Могут быть применены новые системы релейной полуавтоматической блокировки, с питанием линейных цепей от первичных элементов или от аккумуляторов, но без постоянно включенных выпрямителей, во избежание выпрямления переменного тока помех.

Затвор электрорежевзловой системы, как показали измерения, может сработать от переменного тока 50 гц при напряжении на затворе 300 в. Для выема жезла и, следовательно, для отправления поезда на занятый перегон достаточно лишь кратковременного импульса. Вероятность появления такого импульса не исключается даже при наличии обратного провода, так как надо учитывать в устройствах СЦБ совпадение наиболее неблагоприятных условий: обрыв и заземление одного из проводов, максимальные толчки тока при трогании нескольких поездов на участке и др. Не следует исключать маловероятную возможность выема жезла в момент короткого замыкания контактной сети.

Для защиты затвора электрорежевзловой системы следует включить последовательно с ним ка-

тушку со сталью, имеющую индуктивность 10—12 гн и небольшое активное сопротивление порядка 50—100 ом.

В качестве линейных реле автоматической блокировки должны быть применены реле постоянного тока типа КР или СКР. Применение реле переменного тока, например типа ДСР, нежелательно. Измерения показали, что реле типа КР начинает кратковременно размыкать тыловые контакты при напряжении на его зажимах 400—450 в переменного тока 50 гц, а при напряжении 600 в кратковременно замыкаются фронтовые контакты. В двухпроводных линейных цепях протяжением в 3 км такие напряжения не могут быть индуцированы и линейные реле специальной защиты не потребуют.

В линейных цепях большей длины (в двусторонней автоблокировке) линейные реле должны быть защищены последовательно включенной реактивной катушкой и параллельно включенным активным сопротивлением.

Зашите рельсовых цепей от помех электротяги переменного тока следует уделить больше внимания, ввиду важности и сложности этого вопроса. Важность защиты рельсовых цепей связана с тем, что на участке с электротягой, со значительными размерами движения, наиболее вероятно применение устройств СЦБ, включающих также рельсовые цепи, так как именно эти устройства наилучшим образом обеспечивают безопасность движения и увеличение пропускной способности. Сложность защиты рельсовых цепей связана с тем, что в рельсовых цепях необходимо защититься от воздействия всего тягового тока, который проходит по рельсам и превосходит в сотни раз рабочие токи путевых реле. Следует отметить при этом, что наиболее вероятное и эффективное мероприятие по защите линий связи — установка отсасывающих трансформаторов без добавочного провода — ухудшает условия работы рельсовых цепей, так как сосредотачивает в рельсах весь обратный тяговый ток.

Для выбора метода защиты рельсовых цепей необходимо определить максимальный ток в рельсах с учетом возможных толчков тока при одновременном трогании поездов. Расчеты показывают, что при напряжении в контактной сети 16 000 в максимальный тяговый ток $I_{\text{макс}}$ можно принять равным 500 а в рельсах одного пути. Для обеспечения работы рельсовых цепей возможно применение постоянного тока, и применение переменного тока с частотой, отличающейся от частоты тягового тока.

Применение постоянного тока для питания рельсовых цепей вынуждает использовать для возврата тягового тока лишь одну нитку пути. Для защиты аппаратуры рельсовой цепи от помех тягового тока необходима установка защитной аппаратуры (рис. 1), состоящей из реактора ($L_h R_h$), включенного последовательно с источником питания, реактора ($L_k R_k$), включенного последовательно с путевым реле, и омического сопротивления R_e , включенного параллельно путевому реле. Соответствующим под-

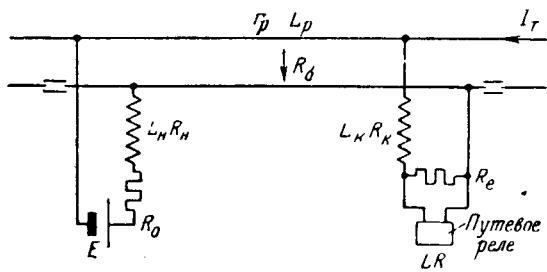


Рис. 1.

бором величин L_h , R_h , L_k , R_k , R_e можно добиться надежной защиты рельсовой цепи от помех. Так, при $I_{\text{макс}} = 500$ а, при частоте 50 гц и аккумуляторах, питающих рельсовую цепь типа АБН-72, для рельсовой цепи длиной до 1 000 м с путевым реле типа НР-1 $\div 2$ ом нужно: $L_h = 0,25$ гн, $R_h = 2 \div 3$ ом, $L_k = 0,6$ гн, $R_k = 2 \div 3$ ом, $R_e = 12$ ом. При той же аппаратуре рельсовых цепей, но при частоте тягового тока $16^{2/3}$ гц, потребная индуктивность L_h вырастает в три раза при том же R_h , а L_k — в 5—6 раз. Данные защитной аппаратуры рассчитаны в предположении, что противоположный конец рельсовой цепи закорочен поездом и утечки между рельсами нет. Эти условия являются наихудшими. Введение защитной аппаратуры резко уменьшает коэффициент полезного действия рельсовой цепи, и без того чрезвычайно низкий, до долей процента. Так, при коротких рельсовых цепях, для которых можно принять $\text{ch} \gamma l = 1$, $\text{sh} \gamma l = 0$,

$(\gamma = \sqrt{\frac{r_p}{R_6}})$, коэффициент полезного действия снижается в два раза, а для длинных рельсовых цепей, когда $\text{ch} \gamma l = \text{sh} \gamma l$ — в 3—4 раза. Это приводит к большим трудностям в осуществлении и к большим затратам в устройстве и эксплуатации длинных рельсовых цепей. Практически можно получить рельсовые цепи длиной 800—1 000 м, что достаточно для станционных приемо-отправочных путей, но явно недостаточно для перегонов, где в связи с повышением скорости поездов желательно иметь рельсовые цепи длиной до 3 000 м. Следует особо отметить, что представление лишь одной нитки для возврата тягового тока приводит к слишком большому падению напряжения в рельсах.

Немаловажным отрицательным качеством однониточных рельсовых цепей является то, что контроль лопнувшего тягового рельса обеспечивается лишь при повышенном сопротивлении балласта. Наличие защитной аппаратуры позывает общее сопротивление релейного конца цепи, что ухудшает условия контроля.

Применение переменного тока для питания рельсовых цепей позволяет устроить двухниточные рельсовые цепи с предоставлением обеих ниток для возврата тягового тока (рис. 2). При этом на работу каждой рельсовой цепи оказывают влияние помехи, вызванные следующими причинами.

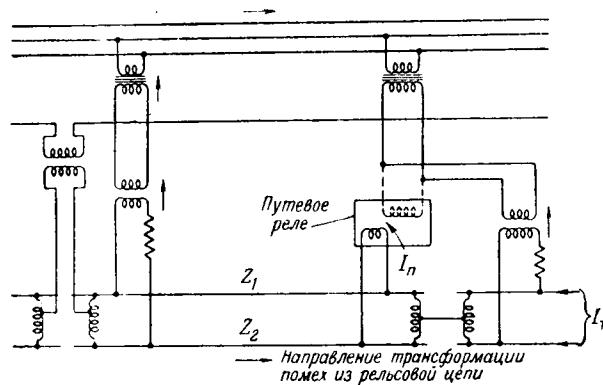


Рис. 2.

1. Неодинаковые сопротивления ниток пути Z_1 и Z_2 вызывают ответвление тягового тока в путевое реле.

2. Индуктивное влияние тяговой сети данного и соседнего пути на рельсовую цепь и на питающую линию вызывает появление тяговых токов в путевой и местной обмотках реле.

Эти причины приводят в свою очередь к трансформации помех через путевые и линейные трансформаторы в питающую линию автоблокировки и в другие уравновешенные рельсовые цепи.

Неуравновешенность рельсовой цепи, вызываемая обычно обрывом нескольких соединителей, оказывается сильнее при невысокой тяговой частоте. В то же время индуктивное влияние оказывается сильнее при более высокой частоте. Расчеты показывают, что при $I_{m, \max} = 500 \text{ а}, f_m = 16\frac{2}{3} \text{ гц}$ I_n доходит до 14 а, а при $f_m = 50 \text{ гц}$ I_n доходит до 8 а. Помимо того, на местной обмотке путевого реле, если она имеется, может появиться до 50 в помех.

При защите от помех необходимо учитывать форму тягового тока, которая в значительной степени зависит от типа двигателей. Применение вентильных двигателей приводит к наиболее сильному искажению формы тока. Например, опытный электровоз с ртутными выпрямителями, испытывавшийся на опытном кольце МПС, давал при некоторых условиях резко выраженную третью гармонику с амплитудой около 20% от основной и пятую гармонику с амплитудой до 10% от основной. Литературные данные по опыту эксплоатации электротяги переменного тока позволяют считать амплитуду третьей гармоники равной 6,25% от основной и указывают на вероятность появления второй гармоники.

Искажение формы тягового тока и появление высших гармоник оказывает влияние на выбор частоты тока для сигнальных целей. Следует также учитывать возможные колебания частоты и обеспечить, чтобы частота сигнального тока ни при каких условиях не совпадала с частотой, кратной частоте тягового тока. Можно рекомендовать при тяговом токе частоты $f_m = 16\frac{2}{3} \text{ гц}$ использовать для сигнальных целей частоты $f_c = 41 \text{ гц}$ или $f_c = 60 \text{ гц}$, а при частоте тягового тока $f_m = 50 \text{ гц}, -f_c = 80$ или 120 , или 180 гц . Если

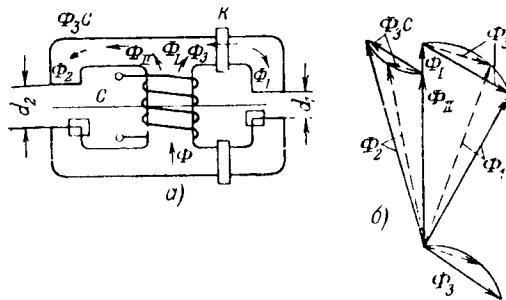


Рис. 3.

же представляется возможность для однофазной тяги применить низкую частоту, отличающуюся от $16\frac{2}{3} \text{ гц}$, то нужно для сигнальных целей применить техническую частоту 50 гц, а для тяги использовать частоту 13,5 или 20,0 гц.

Рассматривая вопрос о выборе путевого реле, необходимо учитывать, что оно не должно срабатывать как от основной, так и от высших гармоник помех.

Известно [Л. 2, 3], что при электрической тяге переменного тока нашли применение следующие частотные реле: дифференциальное реле с разветвленной магнитной цепью, дифференциальное реле с разветвленной электрической цепью, мостиковая схема и центробежное реле.

В дифференциальном реле с разветвленной магнитной цепью (рис. 3а) сектор C , соединенный с контактной системой, подвергается взаимопротивоположному воздействию двух пар полюсов с расщепленным магнитным потоком. Можно показать, что суммарный врачающий момент

$$M = F(\Phi_{1, \max}^2 - \Phi_{2, \max}^2),$$

где $\Phi_{1, \max}$ — амплитуда потока, проходящего через правый воздушный зазор d_1 , а $\Phi_{2, \max}$ — амплитуда потока, проходящего через левый зазор d_2 .

Зазор d_1 меньше зазора d_2 . Вращающий момент M равен нулю, если

$$\Phi_{1, \max}^2 - \Phi_{2, \max}^2 = 0 \text{ или } |\Phi_{1, \max}| = |\Phi_{2, \max}|.$$

Разница между $|\Phi_{1, \max}|$ и $|\Phi_{2, \max}|$ определяется, с одной стороны, различием между d_1 и d_2 и, с другой стороны, потоком Φ_3 , создаваемым током кольца K и зависящим от частоты. На рис. 3б дана векторная диаграмма потоков Φ_1 , Φ_{II} , Φ_2 , Φ_3 при различных частотах. Пунктиром показаны векторы, относящиеся к тяговым токам помех. При частоте $f = f_m$ обеспечивается $|\Phi_{1, \max}| = |\Phi_{2, \max}|$ и сектор уравновешен. При всех других частотах результирующий момент не равен нулю. Следовательно, не только ток сигнальной частоты, но и высшие гармоники тягового тока могут привести к срабатыванию реле, что весьма опасно. Это реле имеет одну катушку и получает всю энергию из рельсовой цепи, что определяет малую его экономичность.

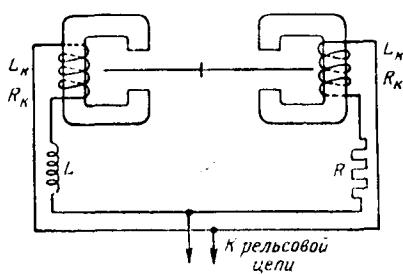


Рис. 4.

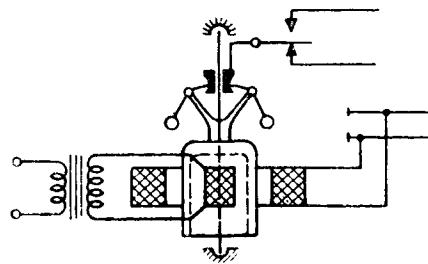


Рис. 6.

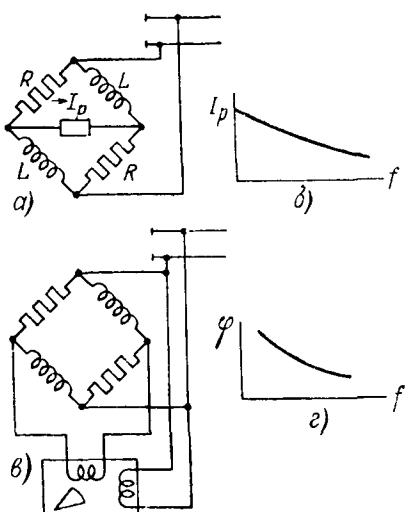


Рис. 5.

Оно может быть применено лишь в коротких стрелочных рельсовых цепях, где следует ожидать меньшие помехи и где приобретает значение небольшое время срабатывания этого реле.

Дифференциальное реле с разветвленной электрической цепью (рис. 4) обладает теми же свойствами, что и рассмотренное.

Вращающий момент реле равен нулю лишь при

$$\omega = \sqrt{\frac{R(R+R_k)}{L(L+L_k)}}.$$

L и R могут быть подобраны так, чтобы при тяговой частоте вращающий момент был бы равен нулю. Однако при частотах высших гармоник тягового тока это реле может ложно сработать, что исключает его применение в длинных рельсовых цепях.

Нельзя рекомендовать для достижения частотной селективности применение схемы моста, составленного из индуктивностей в двух противоположных плечах и омических сопротивлений в двух других плечах. Эта схема (рис. 5a) не обеспечивает равновесия в диагонали моста ни при какой частоте и не обладает желательной частотной селективностью (рис. 5b), так как ток в диагонали моста уменьшается при повышении частоты. Можно лишь предполагать использование такого моста с включением в диагональ одной из обмоток двухэлементного индукционного

реле, вторая обмотка которого подключена непосредственно к рельсовой цепи (рис. 5c). При этом защита от основной гармоники тягового тока может быть обеспечена достижением такого сдвига фаз между токами помех в обеих обмотках (рис. 5d), чтобы вращающий момент был равен нулю. Таким образом, можно защититься от основной гармоники тягового тока, но невозможно избежать срабатывания реле от высших гармонических составляющих.

Наиболее удачным типом путевого реле является центробежное реле, представляющее собой по существу асинхронный двигатель, питаемый двухфазным током (рис. 6). Статор имеет две обмотки, одна обмотка — путевая — (включена в рельсовую цепь, а другая — местная — присоединена к питающей линии. Эти обмотки создают вращающееся магнитное поле. Ротор — алюминиевый цилиндр — соединен с центробежным механизмом, который управляет контактной системой. Исследование опытного образца центробежного реле показало, что при наличии в обеих обмотках тока сигнальной частоты скорость вращения ротора достаточна для значительного подъема грузов центробежного механизма и замыкания фронтовых контактов реле. Наличие токов помех в обеих обмотках реле не может привести к замыканию фронтовых контактов, так как скорость вращения магнитного поля помех недостаточна для поднятия грузов центробежного механизма. Наличие токов помех только в одной из обмоток также не может привести к срабатыванию реле. Очень важной положительной особенностью центробежного реле является то, что высшие гармоники тягового тока не могут привести к ложному срабатыванию, так как наряду с образуемым ими вращающимся магнитным полем имеется значительно более мощное вращающееся поле основной гармоники тягового тока. Это более мощное поле и определит невысокую скорость вращения ротора.

Исключение ложного срабатывания и высокая экономичность центробежного реле обусловили его широкое применение. Тем не менее у этого реле имеются крупные недостатки. Опыт эксплуатации показывает [Л. 4], что помехи могут привести к снижению скорости вращения ротора до размыкания фронтовых контактов и, следовательно, к закрытию сигнала при свободной рельсовой цепи. Такое положение вынуждает устанавливать фильтр в путевой обмотке. Другим недостатком центробежного реле является

большое время разгона и замедления ротора (доходящее до 2—3 сек.), что неприемлемо для стрелочных рельсовых цепей.

Наличие серьезных недостатков во всех выше рассмотренных типах частотных реле требует рассмотрения других методов частотной селекции. Следует указать, что применение реле электромеханического резонанса в качестве путевого исключается, вследствие сравнительно небольшого срока службы контактной системы, влияния изменений температуры на частоту настройки, а также в связи с сильной зависимостью работы реле от колебаний частоты питающего тока.

Наиболее гибким методом частотной селекции является применение фильтров. Двухэлементное селекторное реле является весьма экономичным и наиболее пригодным для использования в рельсовых цепях.

Вращающий момент двухэлементного селекторного реле может быть выражен следующим образом:

$$M = c U_m U_n \sin \varphi,$$

где U_m — напряжение на местной обмотке реле, U_n — напряжение на путевой обмотке реле, φ — угол между токами в местной и путевой обмотках.

Для достижения частотной селективности можно идти по одному из трех путей — уменьшать токи помех в путевой обмотке, уменьшать токи помех в местной обмотке, уменьшать угол φ при частотах помех до величины, близкой к нулю. Установку фильтра в путевой обмотке нельзя рекомендовать, так как это увеличит потребление энергии в конце рельсовой цепи и приведет к очень большим потерям вследствие утечки между рельсами. Угол φ между токами помех в местной и путевой обмотках является величиной, в значительной степени зависящей от местоположения поездов на участке, и не поддается точному учету.

Наиболее рациональным является включение фильтра в цепь местной обмотки двухэлементного реле, для которой конструирование фильтра облегчается, так как возможно допустить значительное затухание для сигнальной частоты.

При конструировании фильтра необходимо учитывать специфику устройств СЦБ и обеспечить автоматический контроль пробоя конденсатора. Пробой конденсатора должен приводить к запиранию как рабочей частоты, так и частот помех.

При невысоких частотах элементы фильтра получаются очень громоздкими и дорогими, что приводит к требованию иметь в фильтре минимальное количество элементов. Другие требования к фильтру основаны на расчете помех и изображены на рис. 7 в виде необходимой кривой затухания.

На рис. 8 приведена простейшая схема фильтра, удовлетворяющая выше поставленным требованиям, с учетом того, что в путевой обмотке ток помех ограничен калиброванным

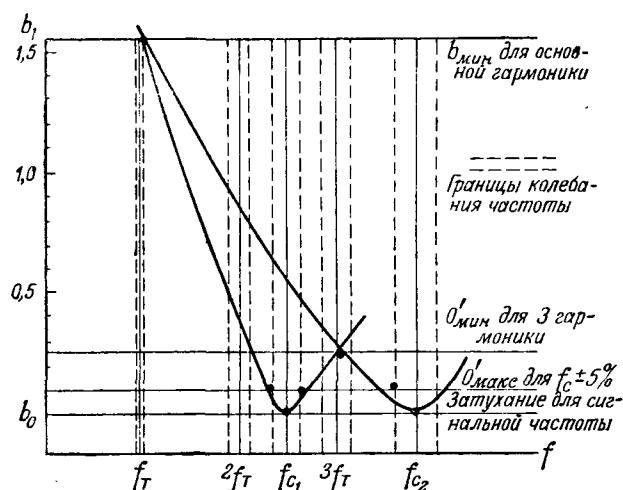


Рис. 7.

предохранителем в пределах 10 а из условия нагрева катушек. Настроив контур C_1 , L_p в резонанс при частоте f_c и подобрав R , можно достичь желаемой кривой затухания. На входе фильтра потребуется повышенное напряжение, которое можно получить от типового трансформатора OM . В случае частого перегорания предохранителя в цепи путевой обмотки следует ограничить ток помех резонансным контуром, включенным параллельно обмотке и настроенным на частоту f_m , что показано на рис. 8 пунктиром.

Такое устройство обеспечивает устойчивую работу рельсовой цепи большой длины без ложных срабатываний реле и без задержек поездов, вследствие размыкания фронтовых контактов.

Путевые дроссели при электрической тяге переменного тока получаются небольшими и требуют значительно меньше меди, чем при электротяге постоянного тока. Это связано с тем, что при высоком напряжении тяговые токи имеют сравнительно небольшую величину: 100—150 а на нитку пути при установленном режиме. Небольшие размеры путевых дросселей позволяют иметь общую магнитную цепь для двух катушек, что в некоторой мере способствует уравновешиванию тяговых токов в обеих нитках.

Заключение. При электрической тяге однофазного тока возможно применение всех современных устройств СЦБ, за исключением тех, в которых блок-механизмы переменного тока включены в цепь большой длины. Может быть применена электрожезловая система, полуавтоматическая блокировка системы Д. С. Трегера, релейная полуавтоматическая блокировка с ис-

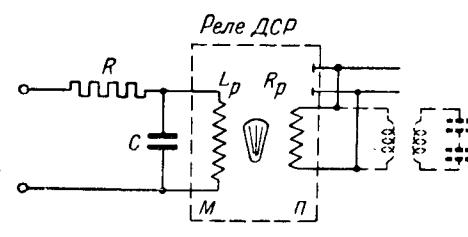


Рис. 8.

точниками питания постоянного тока, автоматическая блокировка и все устройства, включающие в себя рельсовые цепи.

Однопроводные цепи требуют замены двухпроводными. Не исключено применение станционной блокировки с блок-механизмами переменного тока при условии использования двухпроводных цепей.

Для питания рельсовых цепей может быть применен постоянный ток или переменный ток, имеющий частоту, некратную частоте тягового тока. Рельсовые цепи постоянного тока можно рекомендовать лишь для станционных путей, так как они могут быть выполнены небольшой длины и с предоставлением только одной нитки для возврата тягового тока. Рельсовые цепи переменного тока могут иметь большую длину. Из существующих типов путевых реле наиболее приемлемым является центробежное, которое, однако, не предотвращает задержек поездов под влиянием помех и не может быть применено в стрелочных рельсовых цепях.

Предлагаемое решение по устройству фильтра в местной обмотке двухэлементного реле

обеспечивает устойчивую и экономную работу рельсовых цепей. Устройство кодовых рельсовых цепей при электрической тяге переменного тока требует особого изучения.

Нужно рекомендовать для рассмотрения следующие варианты соотношения частот тягового тока f_m и сигнального тока f_c :

1. $f_m = 16^2/3$, $f_c = 60 \text{ гц}$,
2. $f = 50$, $f_c = 120 \text{ или } 180 \text{ гц}$,
3. $f_c = 50$, $f_m = 13,5 \text{ или } f_m = 20 \text{ гц}$.

Литература

1. М. И. Михайлов. Влияние контактной сети электротяги однофазного тока на цепи связи и защитные мероприятия. Электричество, № 7, 1949.
2. М. И. Вахин. Перегонные устройства. Трансжелдориздат, 1947.
3. Г. Мак-Креди. Сигнализация переменного тока Гострансиздат, 1932.
4. А. Е. Таттерсал. Основы современной железнодорожной сигнализации. Кубуч, 1933.

[12. 4. 1950]



Аппараты зажигания и питания люминесцентных ламп

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

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Люминесцентные лампы в виде ламп дневного света находят все большее и большее распространение. Они снабжаются специальными приспособлениями: последовательным балластным сопротивлением и аппаратом зажигания. Наиболее распространенным балластным сопротивлением является индуктивность.

Если абстрагироваться от нелинейности сопротивления лампы, считая напряжения и токи синусоидальными, то можно начертить векторную диаграмму для процесса горения лампы (рис. 1).

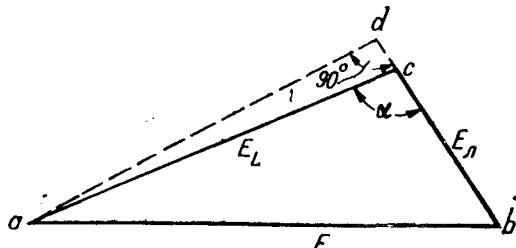


Рис. 1.

Описывается различные системы зажигания и питания люминесцентных ламп, в том числе разработанные и опробованные автором. Приводятся данные о преимуществах систем, не требующих вакуумного реле времени («стартера»).

Сопротивление лампы имеет резко выраженную падающую характеристику. Поэтому при относительно малых изменениях напряжения питания E (рис. 1) ток лампы резко изменяется. Очевидно, чем больше отношение напряжения на дросселе к напряжению на лампе $\frac{E_L}{E_a}$, тем стабильнее ток и горение лампы.

Номинальные напряжения и ток лампы обычно заданы и имеются допустимые пределы для длительного отклонения тока от номинального. Для ламп дневного света мощностью 15 вт эффективный номинальный ток составляет 0,3 а, которому соответствует эффективное напряжение на лампе 60—65 в (разброс от лампы к лампе). Для ламп 30 вт ток равен 0,33 а и соответственное эффективное напряжение 115—125 в. Из условия износа электродов нельзя допустить длительный режим со значением тока ниже приблизительно 0,225 а. Повышение тока выше 130% номинала также не должно допускаться из усло-

вий перегрева и в интересах экономичности освещения.

Практикой установлено оптимальное отношение $E_L : E_A$ порядка 1,5. Это означает, что вольтамперная мощность дросселя в 1,5 раза более мощности лампы. С этой необходимостью приходится мириться. Конечно, нужно учитывать, что срок службы дросселя много больше, чем лампы. Все же постоянно наблюдается тенденция уменьшать вольтамперную мощность и габариты дросселя по тем соображениям, что лампа «и так горит». В действительности ухудшение условий эксплоатации ламп (недопустимые колебания тока) не оправдывается такой «экономией».

Прежде чем говорить о системах зажигания, приведем характеристики зажигания ламп. Напряжение зажигания лампы зависит от тока накала нитей, температуры окружающей среды и также от влажности воздуха. Оно меняется от лампы к лампе. Зависит также от близости проводников (общизвестна роль проводящей полоски на поверхности лампы). В табл. 1 приведены данные для 10 ламп мощностью 15 вт при температуре 15° — 17° С без проводящей поверхности вблизи лампы.

Таблица 1

Эффективное напряжение зажигания на лампе (в) при разных эффективных значениях тока накала i_n

$i_n, а$	0,3	0,35	0,45
№ лампы			
1	400	—	—
2	420	270	130
3	400	250	140
4	370	230	140
5	360	220	135
6	440	300	150
7	420	270	145
8	400	255	145
9	380	240	140
10	420	270	140

Нужно отметить, что при плавном подъеме напряжения ток накала плавно растет лишь до 0,35 а, затем он испытывает скачок до значения 0,45 а, что сопровождается появлением белого свечения накалов (точка ионизации). Одновременно резко падает напряжение зажигания.

При понижении температуры воздуха до 10° С напряжение зажигания возрастает процентов на 25 против указанных в таблице значений. В общем нужно считать, что для надежного зажигания ламп мощностью 15 вт эффективное напряжение должно быть 200 в. Для ламп мощностью 30 вт расчетное эффективное напряжение зажигания не ниже 320 в.

Известна схема зажигания с помощью ионно-биметаллического теплового реле — стартера (рис. 2).

При включении лампы возникает разряд через неоновый промежуток N реле, подогревающий биметаллический контакт K . В случае лампы мощностью 30 вт расчетное минимальное амплитудное напряжение на промежутке составляет

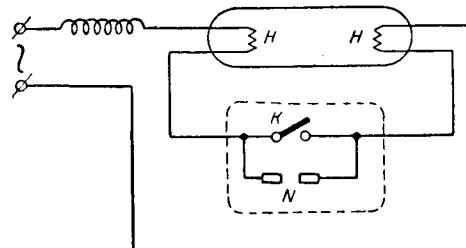


Рис. 2.

$205 \cdot 1,41 = 290$ в. Контакт в результате нагрева замыкается и включает ток накала нитей H . Одновременно напряжение на неоновом промежутке падает до нуля и он гаснет. Биметаллический контакт некоторое время остается замкнутым за счет притока тепла от теплоемких частей. Это и есть «время накала». Затем контакт охлаждается и размыкается, в цепи лампы создается кратковременное перенапряжение, лампа зажигается. На неоновом промежутке — на лампе — устанавливается пиковое напряжение 240—260 в. Пик напряжения, как показывают осциллографы, очень острый и неустойчивый. При этом пиковом напряжении неоновый разряд не должен возникать.

На практике это пусковое устройство является источником неприятностей. Неполадки возникают по следующим причинам:

1. Достаточно узкий диапазон для амплитуды напряжения зажигания (при 285 в обязательно зажигание, при 265 в зажигание запрещено, см. выше). При массовом производстве ламп это несложно обеспечить.

2. Жесткие требования к биметаллическому контакту по условиям обеспечения времени накала в определенном допустимом диапазоне. Промежуток может начать зажигаться или сразу после погасания неонового разряда, или затягивать накал.

3. Амплитуда зажигания получается вследствие перенапряжений. Пик напряжения маломощен и неустойчив. Часто лампа зажигается лишь после нескольких повторных замыканий биметаллического контакта («повторное зажигание»), а это понижает срок службы лампы, так как лампа может выдержать лишь определенное число импульсов зажигания, всегда сопровождаемых распылением поверхности электрода.

4. Предъявляются высокие требования к качеству материалов пускового приспособления и его выполнению. При плохой отрегулировке стартер меняет свои характеристики со временем и плохо работает.

5. Когда стартер «разлаживается», тогда лампа начинает периодически вспыхивать. В случае массовой установки ламп в больших помещениях, где быстро сменить и наладить освещающую точку нельзя, подобное мигание, длившееся часами, производит неприятное впечатление.

В связи со сказанным нами совместно с Е. И. Герасимовым разработаны эффективные системы бесстартного зажигания. Системы могут конструктивно сильно различаться.

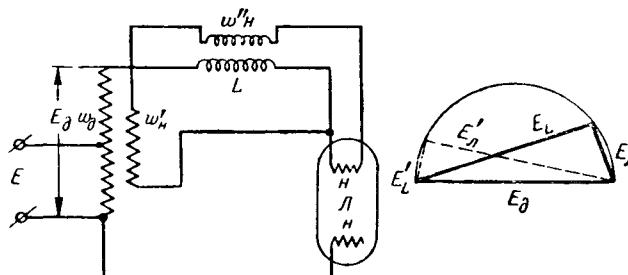


Рис. 3.

ся, но все они работают по следующей схеме (рис. 3).

Повысительный трансформатор (или автотрансформатор) питает дроссель L и лампу L , включенные последовательно.

Мощность лампы при горении

$$P_L = E_A i_A = E_A \cdot \frac{E_L}{\omega L}.$$

Когда лампа не горит, вектор напряжения на лампе совпадает с вектором напряжения E_d . На сердечниках автотрансформатора и дросселя расположены накальные обмотки w_n и w'_n , соединенные последовательно друг с другом и с нитью накала. До зажигания лампы мощность тратится лишь на накал. Тогда в обмотках накала векторы напряжений направлены так же, как векторы напряжений E_d и E'_L соответственно. Индексы "прим" указывают на "режим накала". Если напряжения накала приведем к напряжению E (коэффициент трансформации $w_d:w'_n$), то получим векторную диаграмму, показанную на рис. 3 пунктиром. Направление вектора напряжения на лампе E'_A сдвинуто на известный угол относительно вектора E_d . Мощность накала составляет $E'_A \cdot \frac{E_L}{\omega L}$. Эта мощность может быть того же порядка, что и упомянутая выше мощность лампы при горении, так как произведения $E_A \cdot E_L$ и $E'_A \cdot E'_L$ одного порядка.

На рис. 3 в целях упрощения показано соединение для одной нити. Рассуждение остается в силе при наличии еще одной пары накальных обмоток для другой нити.

Мы видим, что напряжение на лампе при режиме накала E'_A значительно выше, чем напряжение E_A при горении, что и требуется.

Напряжение на нити накала равно разности напряжений накальных обмоток, а напряжение на лампе равно разности основных обмоток, расположенных на тех же сердечниках. Поэтому напряжение накала после зажигания также падает примерно в отношении $\frac{E'_A}{E_A}$. Поясним это.

В аппарате существуют только два потока: главный Φ_e , перпендикулярный напряжению E , и поток рассеяния Φ_L , перпендикулярный E_L .

Напряжение на лампе

$$\dot{E}_A = j(m_1 \dot{\Phi}_e + m_2 \dot{\Phi}_L),$$

напряжение накала

$$\dot{e}_n = j(n_1 \dot{\Phi}_e + n_2 \dot{\Phi}_L).$$

Необходимо добиваться возможного повышения отношения

$$\frac{|E'_A|}{|E_A|} = \frac{|\dot{\Phi}_e + \mu \dot{\Phi}_L|}{|\dot{\Phi}_e + \mu \dot{\Phi}_L|},$$

где

$$\mu = \frac{m_2}{m_1}.$$

С другой стороны, чтобы избежать длительных потерь на накал уже при горении лампы нужно стремиться к снижению e_n , т. е. к возможному повышению отношения

$$\frac{|e'_n|}{|e_n|} = \frac{|\dot{\Phi}_e + \lambda \dot{\Phi}_L|}{|\dot{\Phi}_e + \lambda \dot{\Phi}_L|},$$

где

$$\lambda = \frac{n_2}{n_1}.$$

Исходя из этих соображений, подбираются числа витков. Естественно, получается, что значения μ и λ близки друг к другу, так как каждое близко к одному и тому же оптимальному значению. Следовательно,

$$\frac{|E'_A|}{|E_A|} \approx \frac{|e'_n|}{|e_n|}.$$

Это общее правило для системы бесстартерного зажигания, основанных на явлении перераспределения потоков после зажигания.

Отношение $\frac{E'_A}{E_A}$ порядка 3–4. Изменение напряжения накала происходит в том же отношении, и этого достаточно, так как мощность снижения примерно пропорциональна квадрату этого отношения. Потери на накал при зажигании составляют 10 вт. При горении в цепи накала тратится мощность порядка 1 вт. Частично эта мощность участвует в светоотдаче вследствие утечек через плазму.

Были испробованы различные конструктивные формы. Наилучшие результаты дала схема автотрансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки расположены на разных стержнях, снабженных магнитным шунтом с регулируемым зазором (рис. 4).

Одна накальная нить присоединяется к отводам 4–3, другая к отводам 5–6. Сеть подводится к зажимам 1–2. По этой системе выпущено уже несколько сот светильников, которые удовлетворительно работают в эксплуатации.

Основные характеристики аппарата сведены в табл. 2.

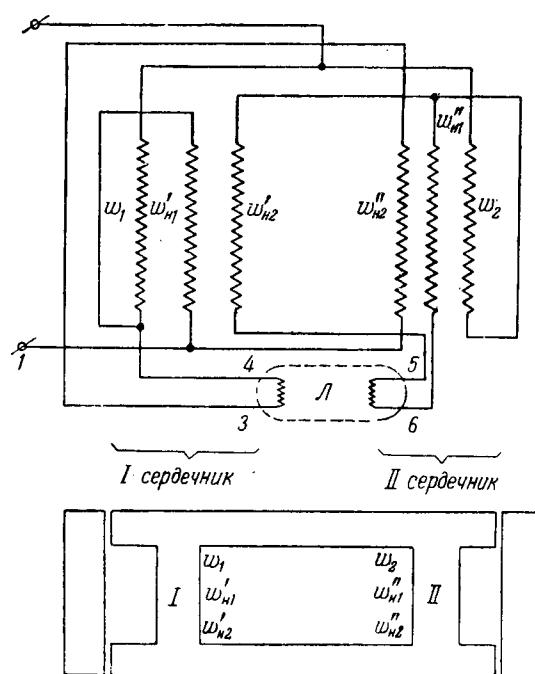


Рис. 4.

Вес и стоимость потребляемого аппарата примерно на 75% выше, чем дросселя, работающего со стартером. Но так как при сравнении стоимостей следует также учесть стоимость нескольких стартеров, которые будут использованы за срок службы аппарата, то предложенная система не оказывается более дорогой. В то же время срок службы ламп повышается. При включении лампа зажигается сразу после небольшой задержки в долю секунды на процесс накаливания. Никакого повторного зажигания не наблюдается, что уменьшает износ электродов.

Как сказано выше, перед зажиганием на лампе должно быть создано напряжение значительно более высокое, чем при горении (для лампы 30 вт, 320 в). Специальными опытами установлено, что если к аппарату, описанному выше, присоединить не одну, а две включенные последовательно лампы и создать на каждой лампе условия накала, аналогичные описанным выше для одной лампы, то обе лампы надежно зажигаются. Это объясняется тем, что эмиссия нитей всегда неодинакова, вследствие чего падение напряже-

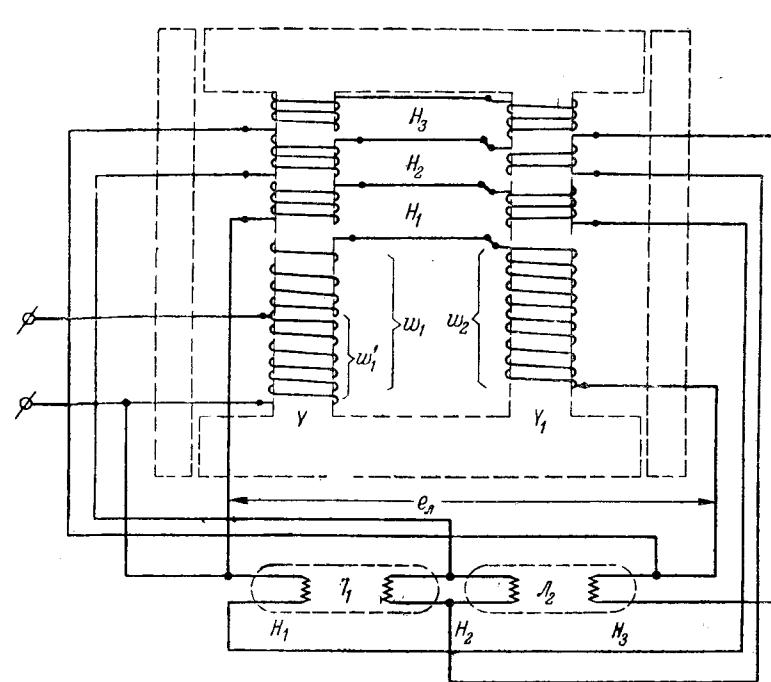


Рис. 5.

ния на лампах до зажигания резко неравномерно. Еще более улучшаются условия зажигания, если параллельно одной из ламп поставить сопротивление 50—100 ком.

При реализации этой схемы выяснилось, что при последовательном включении ламп размеры аппарата повышаются мало, в то же время стоимость и потери распределяются на две лампы.

Схема соединений показана на рис. 5. Магнитопровод того же типа, что и описанный выше. Главная обмотка w_1 сердечника Y включается на сеть напряжения $E = 220$ в автотрансформаторно. Нужно иметь в виду, что при последовательном горении двух ламп спад напряжения на лампах при зажигании относительно мал: приблизительно с 400 в на $2 \times 110 = 220$ в в то время, как при включении одной лампы напряжение изменяется скачком с 320 в на 110 в. При данном включении путем подбора витков удается обеспечить достаточное уменьшение тока накала¹.

На втором сердечнике Y_1 расположена обмотка w_2 . Соединение обеих обмоток последовательное. Коэффициент трансформации

$$\frac{E_A}{E} = \frac{w_1 + w_2}{w_1} = 1,6.$$

Каждая из нитей накала питается последовательно соединенными обмотками с малым числом витков, расположенными на разных сердечниках. До зажигания э. д. с. этих обмоток складываются, после зажигания э. д. с. взаимно уничтожаются.

¹ Интересно отметить, что при трехфазном питании можно так соединить блок из четырех ламп, что токи накалов при горении равны практически нулю

Таблица 2

Эксплоатационные характеристики (лампа 30 вт)

Напряжение сети, в	Ток лампы, а	Среднее значение напряжения на лампе, в	Эффективное значение тока из сети, а	Мощность лампы, вт	Потребляемая мощность, вт	Потери в аппарате, в
215	0	320	—	0	—	—
215	0,33	113	0,55	31	42,5	11,5
190	0,265	121	0,46	—	37,3	—
200	0,29	116	0,5	—	37,7	—
220	0,345	112	—	—	44,5	—

Аппарат выпускается с блоком, состоящим из двух ламп. В выполненной конструкции $\cos \phi$ и к. п. д. такие же, как для ламп стартерной системы. Зависимость эффективного тока (*a*) ламп от напряжения питания (*b*) такова:

<i>E</i>	200	215	225
<i>i_a</i>	0,27	0,33	0,39

Как видно, соотношения получаются более благоприятными, чем для стартерной системы. Зажигание надежно вплоть до температуры 10° С при питающем напряжении 195 в, чего нет при стартерной системе. Стоимость аппарата та же, что и двух дросселей стартерной системы. Таким образом, стоимость стартеров, используемых за срок службы аппарата, полностью экономится. Габарит дросселя несколько больше, чем двух дросселей стартерной системы.

Опишем еще одну систему, «дроссель-конденсатор», которая дала хорошие результаты (рис. 6). Дроссель *L* настроен в резонанс с емкостью *C*. Когда лампа не горит, через нити накала протекает резонансный емкостный ток и разогревает их. Напряжение на лампе высокое. При лампе 15 вт и напряжении питания 110 в на емкости 8 мкф (375 ом) возникает напряжение около 220 в, емкостный ток составляет около 0,5 а, что достаточно для накала. Через несколько периодов вследствие наличия на лампе эффективного напряжения около 200 в и накалившихся нитей лампа зажигается. В тот же момент напряжение на емкости спадает до 50 в, а на лампе до нормальных 55 в. Обмотка *w'* служит для улучшения условий горения — она «срезает» ма-

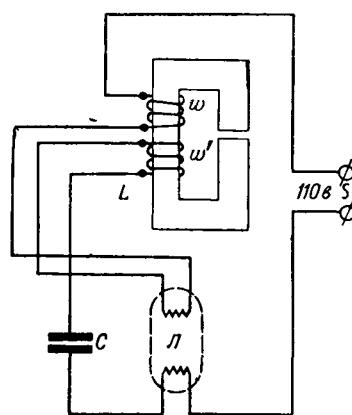


Рис. 6.

лые пики восстанавливающегося напряжения на лампе при погасаниях дуги, происходящих 50 раз в секунду. Остающийся емкостный ток во время горения (остаточный ток накала) составляет около 0,125 а. Общие потери при горении всего 3 вт. Система прошла успешно лабораторные испытания.

Можно применять конденсаторы с галоваксальным наполнением, которые имеют небольшие размеры ($40 \times 40 \times 50$ мм).

Коэффициент мощности выше даже, чем в стартерной системе. При стартере кажущаяся мощность для лампы 15 вт составляет $0,3 \times 115 = 35$ вт. В системе с конденсатором кажущаяся мощность $0,23 \times 115 = 26$ вт².

² Описанные системы заявлены. Заявки 404787/III, 406869/III, 361628, 364881.

[5. 6. 1950]



Из опыта работы

О типе кабеля для электротракторов

Инж. Н. И. КЛОКОВ

Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства

Электропахота в ближайшей перспективе должна получить широкое применение в сельском хозяйстве. На необходимость широкого внедрения электропахоты в земледелии в районах обводнения и особенно на вновь орошаемых землях указывают постановления Совета Министров СССР о строительстве новых крупных гидроэлектростанций и каналов.

Одной из важнейших технических задач, быстрое и правильное решение которой в известной мере определит интенсивность внедрения электропахоты, является вопрос создания надлежащей конструкции электрического кабеля для подвода электроэнергии от линии к двигателям. Опыт эксплоатации электротракторов в 1948, 1949 и 1950 гг. показывает, что задача токоподвода к электротрактору посредством гибких резиновых кабелей полностью еще не решена и применяемый сейчас для этой цели кабель не удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

Особенности эксплоатации кабелей на электротракторах. Эксплоатация кабелей электрических тракторов осуществляется в весьма тяжелых условиях. В процессе движения электротрактора в сторону от источника питания, кабель расстиляется по полю, разматываясь с барабана, установленного на электротракторе, а при движении в обратном направлении подбирается, снова наматываясь на барабан. Сматывание происходит под действием натяжения, вызванного движением электротрактора. Наматывание осуществляется посредством специального двигателя, врачающего барабан. При обеих операциях кабель подвержен действию растягивающих усилий, в среднем порядка 60 кг. В моменты рывков, при переходе с режима размотки на режим намотки и наоборот или при движении по неровному рельефу растягивающие усилия достигают 250 кг и более. Переходя через систему поддерживающих и направляющих роликов, кабель подвергается изгибам по минимально допустимым для кабеля ра-

Питание электротрактора осуществляется при напряжении 1000 в многожильным гибким кабелем, работающим в весьма тяжелых условиях. Описываются характерные повреждения применяемых сейчас кабелей, выявляются причины повреждений и даются рекомендации по созданию кабеля рациональной конструкции.

диусам. На электротракторах ЭТ5-1 000 и МТЭ-1 по пути от приемной головки стрелы до барабана кабель изгибаются и выпрямляется четыре раза. Изгибы происходят в разных плоскостях. В некоторых случаях к совместному действию растяжения и изгиба прибавляется еще и кручение.

Помимо динамических нагрузок, кабель подвергается также нагреву проходящим током. От трения по земле поверхность шланга изнашивается. Действие солнечных лучей ускоряет процесс старения резины шланга. На рис. 1 показан электротрактор ЭТ5-1 000 и участок кабеля, подбираемый во время работы, на бугристом поле.

Применяемые кабели. В эксплуатации электротракторов применяется кабель типа ГРШС, который предназначен для работы в условиях шахт, — он хорошо сопротивляется ударам, смятию и истиранию, но не рассчитан для работы на

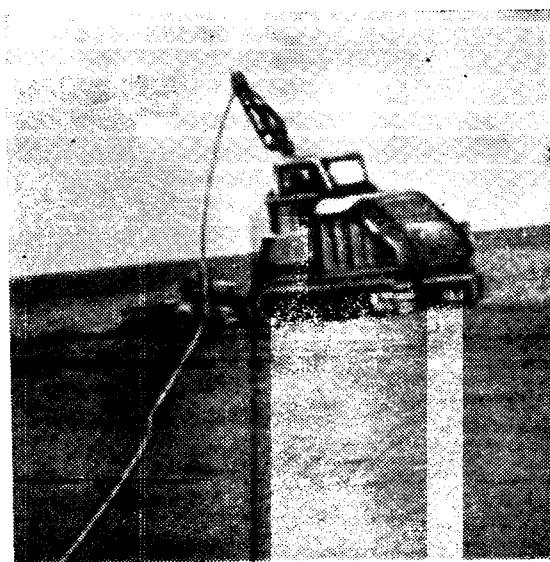


Рис. 1. Электротрактор ЭТ5-1000 при движении по бугристому участку поля и подбираемый им кабель.

Таблица 1

Марка кабеля	Диаметр кабеля, мм	Конструкция жил и диаметр проволоки	Характерные особенности конструкции	Средняя выработка на ЭТ5-1000 до первого повреждения, га	Примечание
ГРШС-4×10 (А)	30—33	(7×7); 0,52; правильная крестовая скрутка	Жилы изолированы способом горячей опрессовки. Изоляция плотно приварена к стренгам жилы. Изолированные жилы обмотаны прорезиненной тканевой лентой и оббиты вокруг сердечника. Вулканизация кабеля произведена в миткале. Жилы между шлангом и сердечником при деформации кабеля почти лишены подвижности.	10—15	
ГРШС-4×10 (Б)	27—31	(7×7); 0,52; правильная крестовая скрутка	Конструкция отличается от предыдущей формой сердечника, уменьшенным шагом скрутки стренг и жил. Шланг изготовлен из более твердой резины.	6—10	Единичные образцы выработали до первого повреждения 30—50 га
ГРШС-4×10 (В)	29—33	(7×7); 0,52; правильная крестовая скрутка	Жилы изолированы способом холодной опрессовки. Вулканизация жил произведена в тальке. Вулканизация шланга произведена в свинцовой оболочке. При изгибах кабеля жилы имеют возможность перемещаться между шлангом и сердечником.	150—200	
ГРШС-4×10 (Г)	30—35	(7×27); 0,26; проволоки стренг скручены пучком	Жилы изолированы способом горячей опрессовки. Изоляция жилы плотно приварена к проволокам наружных стренг. Жилы обмотаны тканевой лентой и плотно зажаты между шлангом и сердечником. При изгибах кабеля жила между шлангом и сердечником лишена подвижности. Шланг изготовлен из мягкой резины.	3—5	

Буквы в скобках поставлены для ссылок.

растяжение, перегибы и кручение — он слишком тяжел. На электротракторах кабели этого типа работают недостаточно долго. Лучшие образцы обеспечивают работу электротракторов в течение одного-двух сезонов.

В табл. 1 приведены некоторые конструктивные сведения о применявшимся на электротракторах ЭТ5-1 000 в 1948—1950 г. кабелях и среднее количество га пахоты, выработанных ими до первого повреждения. По способу заделки жил между шлангом и сердечником эти кабели можно разделить на две основные группы: кабели с жестко закрепленными жилами (А, Б и Г) и кабели, в которых жилы не имеют жесткого соединения со шлангом и сердечником (В).

Характерные повреждения кабелей. Образец характерного повреждения кабелей А и Б показан на рис. 2. Причиной повреждения является разрыв одной из четырех жил кабеля. Электри-

ческая дуга, образовавшаяся в месте разрыва, прожгла шланг. Вскрытие поврежденного участка кабеля показывает, что у места разрыва жила имеет резкий перегиб и лишена возможности перемещаться в осевом направлении. Разрушение проволок жилы в месте повреждения происходило в одной плоскости и носило характер надреза или полома (рис. 2, б). Наибольшее число повреждений приходится на участки кабеля, подверженные наиболее сильному воздействию рывков и кручений.

Средняя выработка кабелей типа В (табл. I) значительно выше. Причиной повреждения кабелей этого типа обычно является разрушение и деформация центральной стренги жилы и ее центральной проволоки. Разрушение центральной проволоки наблюдалось во всех четырех жилах кабеля и происходило вследствие неравномерного распределения растягивающих усилий между проволоками, образующими жилу (табл. 2). Разрыв центральной проволоки центральной стренги приводил к прокалыванию изоляции жил при деформации кабеля и к короткому замыканию между фазами (рис. 3). В ряде случаев замыкание сопровождалось прожиганием наружного шланга и переходило в трехфазное короткое замыкание.

Реже причиной замыкания между фазами являлось выпучивание проволок наружного повива центральной стренги в виде петли. Обычно петли не могут прорвать изоляции. Они образуют клубки и вздутия под изоляцией (рис. 3, б).

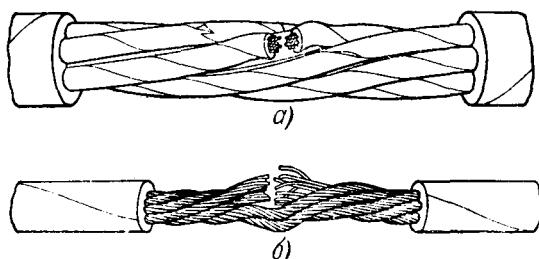


Рис. 2. Характерное повреждение кабеля вследствие излома жилы.
а — кабель; б — жила в стадии разрушения.

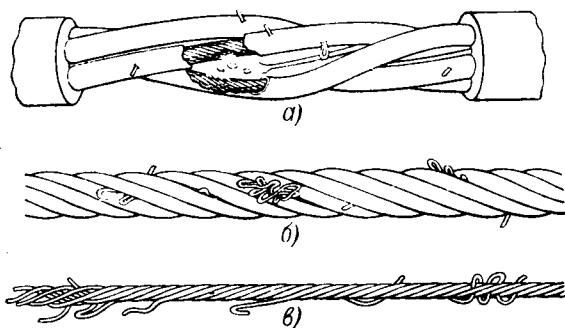


Рис. 3. Характерное повреждение кабеля вследствие разрушения центральной стренги.
а — кабель; б — поврежденная жила с выбившимися проволоками центральной стренги; в — центральная стренга с поврежденными проволоками.

Таблица 2

Наименование проволок жил кабеля	Радиус ролика, мм	Нормальные напряжения, кг/мм ²		
		σ_z , кг/мм ²	σ_s , кг/мм ²	σ , общ., кг/мм ²
Центральная проволока центральной стренги	150	17,8	27,6	45,4
	135	19,5	27,6	47,1
	110	23,1	27,6	50,7
Проволоки наружного повива центральной стренги и центральные проволоки стренг наружного повива	150	10,7	1,38	12,08
	135	11,64	1,38	13,02
	110	13,8	1,38	15,18
Наружные проволоки стренг наружного повива	150	6,4	0,74	7,14
	135	7	0,74	7,74
	110	8,3	0,74	9,04

Обрывы жил в виде поломов, вследствие потери подвижности, наблюдались в кабелях группы В значительно реже. Чаще всего это происходило в местах починки кабеля с применением горячей вулканизации. Случаи обрыва отдельных жил без прожигания изоляции и шланга также редки. Образец характерного повреждения кабеля типа В приведен на рис. 3,а. Наблюдения показывают, что в большинстве случаев повреждения такого рода происходят на участках, где кабель подвержен максимальному воздействию рывков, постоянно действующему растяжению и периодически меняющемуся по направлению закручивания.

Повреждения кабелей типа Г (табл. 1) и процесс их образования по своему характеру весьма схожи с повреждениями кабелей А и Б (рис. 2). Причинами повреждений почти во всех случаях являлся обрыв одной из жил вследствие полома ее проволок. Кабель преимущественно повреждается у места закрепления. Однако были случаи повреждения в конце кабеля, со стороны барабана (150—200 м от входа). Более половины всех случаев повреждений происходило без прожигания наружного шланга. Объясняется это тем, что кабель имеет увеличенную толщину изоляции и шланга.

Судя по характерным повреждениям кабеля, основной их причиной является разрушение про-

воловок отдельных жил.

Рассмотрим виды нагрузок, воспринимаемых жилами, и характер происходящих во время работы деформаций. При огибании кабеля вокруг ролика часть жил претерпевает сжатие, а часть растяжение. Можно предположить, что жилы кабелей типов А, Б и Г, прочно связанные с оболочкой, во время деформаций подвергаются большим растяжению и сжатию, тогда как кабели типа В в противоположность первым трем имеют возможность перемещаться вдоль оболочки и меньше страдают от деформаций.

Жилы кабелей типа А и Б у места повреждения обычно лишены подвижности и имеют вздутие или резкий перегиб. Образование вздутия или резкого перегиба может быть объяснено тем, что при работе на сжатие, в момент набегания на ролик, защемленная жила выпучивается и затем сжимается под действием сил реакции со стороны ролика. Проволоки жилы получают остаточную деформацию у места защемления. Жила, получившая вздутие или перегиб, более натянута в работе, чем другие жилы. При натяжении участка кабеля с защемленной и выпученной жилой растягивающие усилия воспринимаются этой жилой больше, чем остальными жилами, и она выпрямляется. Таким образом, деформации от сжимающих и растягивающих усилий, возникающих при изгибах кабеля, сосредоточиваются в плоскости перегиба жилы, где она и разрушается. Наблюдаемые во время работы непрерывные удлинения и сокращения выставленного на поле кабеля также ускоряют процесс разрушения, особенно в местах с резкими перегибами жил. Удлинение кабеля происходит под действием рывков, вызываемых колебаниями стрелы электротрактора во время движения его по неровностям поля, а сокращение — при слабине, за счет действия сил упругости резины кабеля и жил. Непрерывно происходящие удлинения и сокращения кабеля вызывают перемещения оборванных проволок центральной стренги, что приводит к проколам изоляции, образованию петель и к коротким замыканиям (рис. 3,а).

Причины повреждений жил кабеля вследствие разрушения проволок центральных стренг объясняются тем, что они сравнительно короче и их относительные удлинения больше.

Аналогия конструкций жил кабеля и стальных канатов двойной крестовой свивки дает возможность предположить, что теоретические выводы и формулы для расчета канатов могут быть применены для определения напряжений в проволоках жил кабелей. Напряжение наиболее растянутых проволок жил кабеля, огибаемых вокруг роликов, может быть определено из следующего выражения:

$$\sigma = \sigma_s + \beta \frac{d}{R} E_0,$$

где σ — напряжение, вызываемое силой натяжения кабеля;

β — коэффициент, учитывающий скрученность проволок;

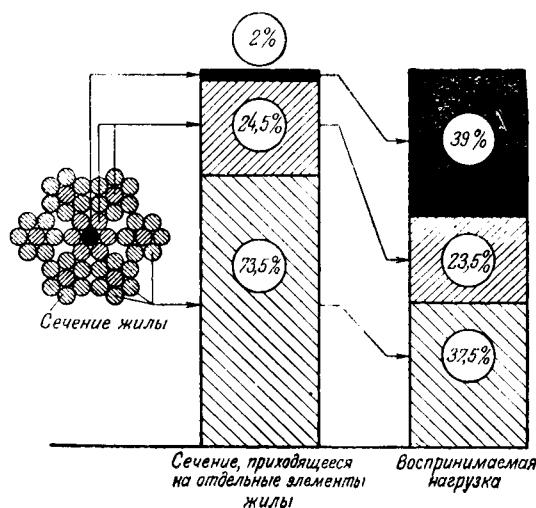


Рис. 4. Соотношение площадей поперечного сечения проволок одинаковой кривизны и воспринимаемых ими нагрузок.

d — диаметр проволоки, мм;

R — радиус изгиба жил, мм;

E_0 — модуль упругости для меди.

При определении σ_s учитывается, что центральные проволоки центральных стренг и центральные проволоки стренг наружного повива и, наконец, наружные проволоки наружных стренг имеют разную кривизну, поэтому и при чатяжении кабеля нагрузка между ними распределяется неравномерно. Распределение нагрузок между проволоками жилы при растяжении кабеля показано на диаграмме (рис. 4).

Результаты подсчетов напряжений, действующих в проволоках жил кабелей А, Б и В во время работы электротрактора при нормальном режиме, приводятся в табл. 2 (натяжение кабеля при расчете принято 60 кг).

Из данных таблицы видно, что даже при нормальных условиях эксплуатации, без учета вредного влияния закручивания и рывков, испытываемых кабелем, центральные проволоки центральных стренг подвергаются напряжениям, превышающим временное сопротивление разрыву, и, следовательно, должны разрушаться.

Значительно меньшим нагрузкам подвергаются проволоки наружного повива центральной стренги. Напряжения, возникающие в них, ограничены с пределом текучести. Однако во время рывков или чрезмерных натяжений напряжения могут превысить предел текучести, вызвать остаточную деформацию и быть причиной разрушения проволоки. Напряжения, возникающие в проволоках наружного повива, лежат ниже предела текучести.

Характер повреждений жил кабелей подтверждает правильность полученных заключений (рис. 3).

Одним из факторов, обуславливающих преждевременное повреждение кабеля является кручение его вокруг собственной оси. Причинами кручения кабеля могут быть: прокатывание кабеля

Силы, действующие на кабель в различных зонах

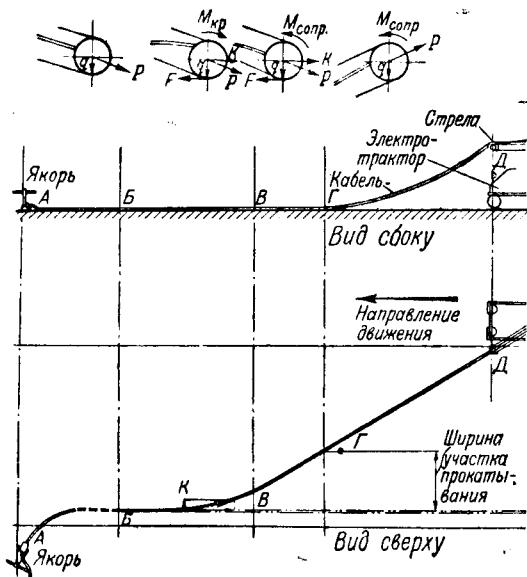


Рис. 5. Схема закручивания кабеля от прокатывания его по полю.

по полю, а также повороты электротрактора относительно стрелы. Кручение кабеля при прокатывании его по полю происходит при наматывании кабеля на барабан в случаях, когда кабель лежит в стороне от направления движения электротрактора.

Наблюдения за процессом закручивания кабеля показывают, что участок кабеля от места, не вступившего в фазу закручивания, до приемной головки стрелы разделяется на четыре участка (рис. 5).

На участок кабеля АБ, лежащий на поле в состоянии покоя, действует только сила натяжения кабеля P и сила тяжести q . На участке БВ появляется, к тому же, поперечная составляющая K , под действием которой кабель перемещается по земле. При перемещении кабеля в поперечном направлении вследствие действия сил трения шланга кабеля о поверхность почвы возникает крутящий момент M_{kp} . Кабель закручивается в сторону направления прокатывания. Нарастание угла закручивания происходит до тех пор, пока момент сопротивления кабеля кручению сделается равным M_{kp} . Участок кабеля, на котором $M_{kp} = M_{copr}$, перемещается без перекатывания.

На участке ВГ, вследствие уменьшения реакции сил тяжести, кабель начинает раскручиваться; кабель, перемещаясь поперек поля, вращается в обратную сторону под действием M_{copr} , обусловленного упругостью кабеля.

Участок кабеля ГД провисает. На этом участке кабель продолжает раскручиваться, однако некоторое остаточное закручивание может передаваться на барабан.

Длина четвертого участка зависит от степени натяжения кабеля; протяженность второго и третьего участка — от длины прокатываемого кабеля и пути качения. В случаях, когда длина чет-

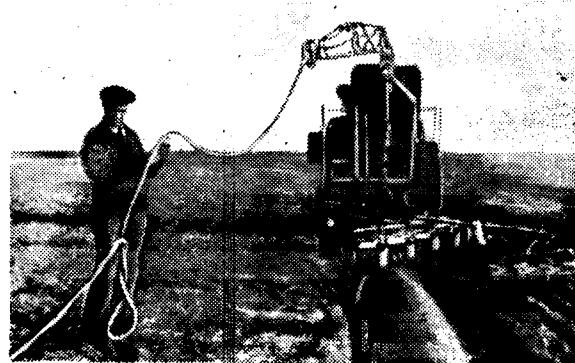


Рис. 6. Закручивание кабеля у места крепления.

вертого участка значительно меньше двух предыдущих, наблюдается явление скручивания, показанное на рис. 6. Эти скручивания свободно переходят к месту закрепления кабеля.

Если закручивание направлено в сторону скрутки жил, то возрастают растягивающие напряжения в жилах и, особенно, в проволоках центральной стренги. Когда закручивание направлено в сторону, обратную скрутке, то жилы, стремясь выпрямиться и встречая сопротивление шланга, сжимаются. Стренги наружного повива жил, представляющие собой винтовые линии, сжимаются и закручиваются вокруг своей оси; центральные стренги и в особенности, центральные проволоки этих стренг, не имея возможности сжиматься—выпучиваются, образуя петли и клубки. Образованию петель и клубков в этом случае способствуют непрерывно происходящие растяжение и сокращение кабеля во время работы. Наиболее четко эти явления наблюдаются на кабеле типа В.

Заключение. Исходя из рассмотренных ранее условий работы кабелей на электрическом тракторе и учитывая опыт их эксплуатации, можно сделать следующие рекомендации по улучшению конструкции кабелей для электропахоты.

1. Конструкции жил кабелей с центральными стренгами и центральными проволоками в них нужно заменить жилами, состоящими из проволок одной длины и формы (рис. 7). Соблюдение этого условия обеспечит равномерное распределение нагрузок между проволоками жилы, возникающих при растяжении и кручении кабеля.

2. Для электротракторных кабелей более приемлем холдный способ наложения изоляции на жилы. При холдном способе наложения тол-

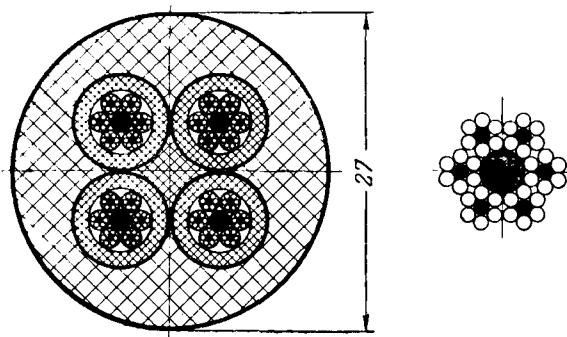


Рис. 7. Сечение рекомендуемой конструкции кабеля и жилы

щина изоляции жилы по всей длине ее и попечному сечению имеет меньше отклонений от номинальной величины, а изолированная жила сохраняет круглую форму, что создает условия для более свободного перемещения ее между шлангом и сердечником. Жилы, изолированные холдным способом, более эластичны.

3. Миткаль, являясь жестким (нерастягивающимся) элементом конструкции, при изгибах кабеля разрывается на участках, расположенных со стороны шланга, чем нарушается равномерность жесткости жилы. Обрывы миткаля способствуют защемлениям жилы между шлангом и сердечником. Миткаль не дает увеличения прочности жилы ни при каких видах нагрузки и является лишним элементом конструкции.

4. Размеры центрального сердечника следует сократить до минимума, им должно заполняться только свободное пространство между жилами. Соблюдение этого условия даст возможность изготавливать кабели меньших диаметров.

5. Шланги для электротракторных кабелей следует изготавливать из жесткой резины. В этом случае кабель будет лучше сопротивляться закручиванию от прокатывания. При изгибах и прочих деформациях кабеля жесткий шланг облегчает условия работы жил.

6. Для наблюдения за правильной эксплуатацией кабеля необходимо по всей длине шланга наносить контрольную линию и производить разметку его по длине.

В заключение нужно отметить, что одновременно с разработкой улучшенных конструкций кабелей необходимо всеми мерами облегчить условия их эксплуатации на электротракторе. Такие возможности имеются.

[29. 7. 1950]



О нецелесообразности применения частично замкнутых сетей¹

Инж. Ф. Д. МОКРИЦКИЙ

ДнепроПроект

В истории развития городских сетей Советского Союза можно отметить неоднократные попытки внедрения замкнутых сетей. Однако этот вид сетей не получил практического признания и в настоящее время во всех наших городах сети эксплуатируются как простые радиальные. Исключение составляет Ленинград, в отдельных районах которого применена частично замкнутая сеть.

В последнее время среди инженерно-технических работников вновь возник интерес к замкнутым сетям, объясняемый предложением В. Л. Айзенберга осуществлять частично замкнутые сети при помощи таких простых аппаратов, как плавкие предохранители. В опубликованных материалах резко оттенены преимущества замкнутых сетей, но почти без внимания оставлены их недостатки, в силу чего первое знакомство с имеющейся литературой может создать впечатление о бесспорной целесообразности перехода к замкнутым сетям, в то время как в действительности дело обстоит далеко не так. Более глубокое изучение вопроса позволяет убедиться в нецелесообразности применения в городах частично замкнутых сетей.

Основной причиной, приведшей к возникновению замкнутых сетей, было стремление повысить бесперебойность и надежность питания потребителей, получающих электроэнергию от сетей низкого напряжения. На рис. 1 представлены принципиальные схемы частично замкнутой и радиальной сетей. Можно установить, что только при повреждении отходящей линии распределительной сети среднего напряжения или же трансформаторного пункта схема замкнутой сети имеет преимущества перед радиальной, так как потребители, питающиеся от сети по первой схеме, будут продолжать питаться, в то время как радиальная сеть низкого напряжения остается обес-

Показано, что частично замкнутые сети обладают в отношении бесперебойности электроснабжения практически несущественными преимуществами перед радиальными и не гарантируют непрерывности питания ответственных потребителей. В то же время расход средств, оборудования и цветных металлов на сооружение замкнутых сетей на 20—30% больше, чем радиальных. Сделан вывод о нецелесообразности перехода к частично замкнутым сетям.

Во всех остальных аварийных случаях замкнутая сеть, в смысле бесперебойности питания потребителей, не имеет никаких преимуществ перед радиальной. Действительно, повреждение магистрали сети низкого напряжения, ответвлений от нее и вводов обязательно приведет к отключению группы потребителей.

Для оценки практического значения преимущества замкнутой сети можно разбить всех потребителей на две группы, по степени надежности обеспечения энергией

1. Особо ответственные потребители, не терпящие никаких перерывов в электроснабжении: здания общественного назначения, в которых возможны скопления больших количеств людей, большие магазины, узлы связи, радиотрансляционные узлы, театры, кино, операционные больницы, здания правительственный учреждений и др.

2. Все прочие потребители.

В связи с тем, что схема замкнутой сети не гарантирует полной бесперебойности питания, для обеспечения потребителей первой категории необходимы дополнительные мероприятия, гарантирующие непрерывную подачу электроэнергии. Такими мероприятиями могут быть: устройство двух вводов, питающихся от разных магистралей или же разных трансформаторных пунктов, установка аккумуляторных батарей и др. Отсюда можно сделать вывод, что замкнутая сеть, в части питания потребителей первой категории, не имеет никаких преимуществ перед радиальной.

В этом смысле некоторые дополнительные преимущества имеет жестко замкнутая сеть, при которой даже повреждение магистрали низковольтной сети не приводит к обесточению потребителей.

Количественным показателем бесперебойности электроснабжения может служить аварийный не-доотпуск электроэнергии, отнесенный ко всей электроэнергии, отдаваемой сетью. В данном слу-

В порядке обсуждения

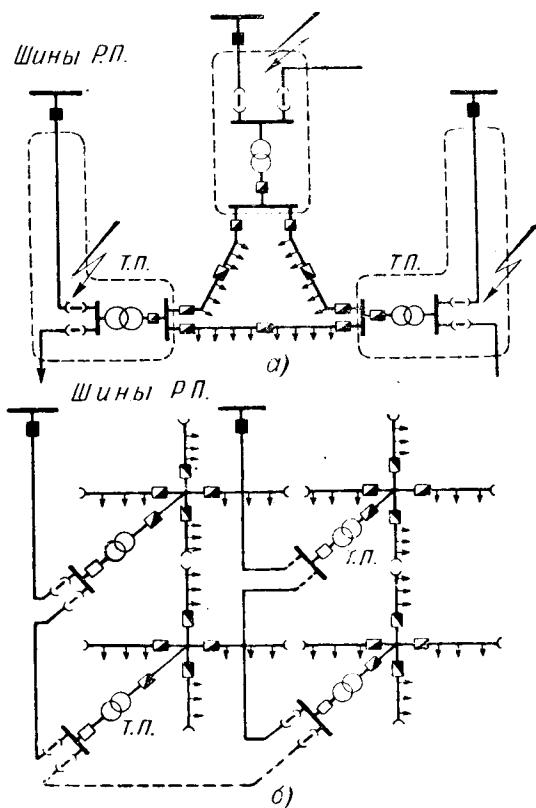


Рис. 1. Схемы сетей.

а — замкнутая сеть; *б* — радиальная сеть с ручным переключением. Повреждение в зонах, ограниченных пунктом, не приводит к нарушению электроснабжения.

Чаще нас интересует уменьшение недоотпуска электроэнергии, которое можно ожидать при переходе от радиальных сетей к частично замкнутым. Для его подсчета принимаются следующие данные:

Среднее годовое количество аварий на 100 км кабельной сети 6—10 кв—3 аварии.

Максимальная нагрузка линии распределительной сети — 800 квт.

Длина линии распределительной сети — 1 км.

Среднее годовое количество аварий, приходящееся на 100 трансформаторных пунктов, — 4 аварии.

Максимальная нагрузка трансформаторного пункта — 200 квт.

Годовое число часов использования максимума — 2 500 час.

Длительность ликвидации аварии — 1 час.

Ожидаемое уменьшение недоотпуска электроэнергии определяется из следующего выражения:

$$\frac{800 \cdot 3 \cdot 2500 \cdot 100}{8760 \cdot 800 \cdot 100 \cdot 2500} + \frac{200 \cdot 2500 \cdot 100 \cdot 4}{8760 \cdot 200 \cdot 100 \cdot 2500} = 0,0008\%.$$

Такое уменьшение аварийного недоотпуска никакого практического значения иметь не может и потребителями не будет ощущаться. Этому небольшому преимуществу могут быть противопоставлены некоторые свойства замкнутых сетей, отрицательно сказывающиеся на электроснабжении потребителей. Так, в радиальных сетях аварии легко локализируются на поврежденных эле-

ментах, в замкнутых же имеется большая вероятность распространения аварий на неповрежденные участки, что должно рассматриваться как свойство, понижающее бесперебойность электроснабжения.

Переходя к экономической стороне вопроса, рассмотрим некоторые положения, неправильно принятые в основу построения частично замкнутых сетей. Одним из существенных недостатков замкнутых сетей является необходимость питания трансформаторных пунктов, входящих в один и тот же замкнутый «треугольник» низковольтной сети, от разных линий распределительной сети среднего напряжения, вследствие чего длина последней резко возрастает. С целью устранения этого недостатка, органически присущего замкнутым сетям, предлагается вместо обычной петлевой сети применять разветвленную сеть без резервных перемычек между разными линиями.

В практических условиях к распределительным сетям подключаются не только трансформаторные пункты, питающие сеть низкого напряжения, но и подстанции сосредоточенных потребителей, получающих электроэнергию от высоковольтной сети и нуждающиеся в двухстороннем питании. Следовательно, в большинстве случаев необходимо будет прибегнуть к устройству перемычек между разными линиями.

В числе преимуществ схем сетей среднего напряжения, применяемых при замкнутых сетях, можно встретить такие, как уменьшение токов короткого замыкания, уменьшение числа питательных линий и связанная с этим экономия ячеек, оборудования и даже цветных металлов. При рассмотрении схем, изображенных на рис. 2, а, б, в, перечисленные преимущества не только не подтверждаются, но и устанавливается наличие существенных недостатков. Схема рис. 2, а предусматривает питание района замкнутой сети от одной распределительной подстанции, шины которой разделены на три секции. К каждой секции подходит по одной питательной линии. В эксплуатационном отношении схема наиболее удобна, но экономически невыгодна, так как требует большого количества ячеек. Дополнительным недостатком данной схемы является повышенная мощность распределительных подстанций, в связи с чем возрастает их радиус действия и расход кабеля на осуществление распределительной сети.

Схема рис. 2, б имеет смысл только при параллельной работе питательных линий, при которой токи короткого замыкания в сети возрастают на 60—80 %. Кроме того, схема не обеспечивает должной бесперебойности, так как при повреждении шин распределительной подстанции или при отключении их для ремонта вся сеть, питающаяся от них, должна остаться отключенной. Схема явно нецелесообразна и применяться не должна.

Схема рис. 2, в предусматривает питание от одной подстанции с секционированной системой шин. При отключении питательной линии питание восстанавливается автоматическим включением секционного выключателя. При повреждении одной секции шин или при отключении ее

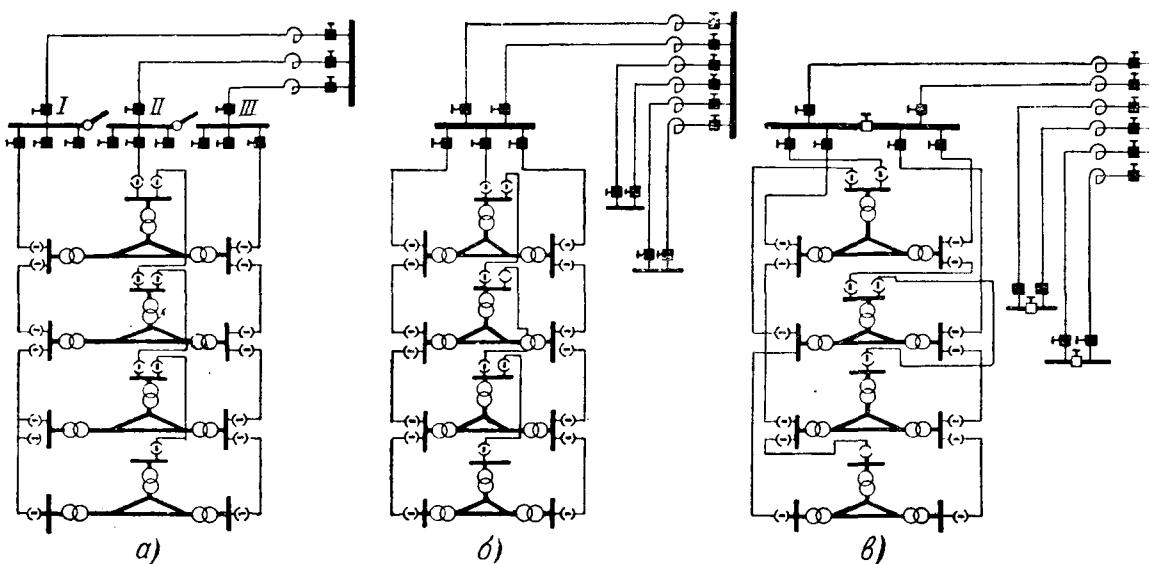


Рис. 2. Схемы замкнутых сетей среднего напряжения.

a — шины разделены на три секции; *б* — питательные линии работают параллельно; *в* — при отключении питательной линии автоматически включается секционный масляный выключатель.

для ремонта, несмотря на наличие замкнутой сети, половина всех потребителей окажется обеспеченной. В связи с введением дополнительных условий, которым должна соответствовать схема распределительной сети, протяженность сети должна быть больше, чем при других схемах. Сомнение вызывает возможность осуществления автоматических переключений в питательной сети при замкнутой схеме, так как от начала аварии до момента включения секционного выключателя должно пройти около трех секунд. Этот промежуток времени может оказаться достаточным для перегорания предохранителей трансформаторов, получивших нагрузку в 100 и более процентов. Необходимо экспериментально проверить возможность автоматического включения резерва в замкнутых сетях.

Другие схемы, предусматривающие питание низковольтной сети от линий, подключенных к разным распределительным подстанциям, также не могут рекомендоваться потому, что при полном погашении сети восстановление ее питания чрезвычайно затруднено.

В результате можно прийти к выводу, что все рассмотренные выше схемы по своим техническим и экономическим качествам уступают простым радиальным сетям.

С целью удешевления и упрощения замкнутых сетей Б. Л. Айзенберг находит возможным не устанавливать масляных выключателей и предохранителей с высокой стороны сетевых трансформаторов, очевидно, в предположении, что отключение трансформаторов от коротких замыканий будет осуществляться защитой линий распределительной сети. Такое упрощение сети не может быть допущено ввиду недостаточной чувствительности защиты. Трансформаторы как при замкнутых сетях, так и при радиальных должны оборудоваться предохранителями от коротких замыканий с высокой стороны.

Предполагается, что трансформаторы в замкнутых сетях в нормальном режиме должны быть загружены на 70—80% своей номинальной мощности; в аварийном режиме допускается их перегрузка на 20—25%.

Допустим, что один из группы параллельно работающих трансформаторов отключился, а один из оставшихся перегрузился на 20—25%. Отключение первого трансформатора не может быть обнаружено раньше, чем при очередном осмотре. За этот промежуток времени либо перегруженный трансформатор потерпит аварию, либо перегорят предохранители, защищающие его от перегрузки. То и другое приведет к отключению всех параллельно работающих трансформаторов целого района.

Надежная работа замкнутой сети может быть обеспечена только при условии загрузки трансформаторов в нормальном режиме не более, чем на 60—65%, а в аварийном — на 100%, что приводит к увеличению их установленной мощности.

Сечение кабелей низковольтных сетей, работающих замкнуто, в большинстве случаев выбирается по допустимой плотности тока при аварийном режиме. При этом предполагается, что расчетная нагрузка магистрали должна быть в два раза больше нагрузки нормального режима.

На рис. 3 изображена замкнутая сеть по схеме треугольников. Нагрузка магистрали в нормальном режиме равна нагрузке одного квартала. При отключении одного трансформатора нагрузка магистрали увеличивается в три раза. При радиальной же схеме сети, построенной с учетом возможности осуществления ручных переключений, расчетная нагрузка магистрали была бы только двукратной, а сечение кабеля в полтора раза меньшим.

Сторонники замкнутой сети, сравнивая их с другими видами, исходят из равных условий выбора и построения конфигурации низковольт-

ных сетей, забывая при этом, что выбор конфигураций для замкнутой сети ограничивается рядом следующих дополнительных условий:

1. Конфигурация сети должна быть, преимущественно, в виде треугольников и в редких случаях может соответствовать какой-либо другой фигуре, количество же других фигур ограничено.

2. Нагрузки сторон треугольников должны быть по возможности равны между собой. Неравенство нагрузок приводит к дополнительному увеличению сечения кабелей и установленной мощности трансформаторов.

3. Сопротивления кабелей, образующих стороны треугольника, не должны отличаться друг от друга больше, чем на 50%.

При проектировании конфигурации сети часто придется отступать от общих принципов построения рациональных сетей, что повлечет за собой дополнительный расход цветного металла и худшее его использование. Примером может служить низковольтная сеть, изображенная на рис. 31 книги Б. Л. Айзенберга «Замкнутая электрическая сеть без сетевых автоматов».

По местным условиям в проекте сети имеются случаи питания потребителей не от ближайших источников и не по кратчайшим путям.

Сделаем выводы, характеризующие экономическую сторону вопроса применения частично замкнутых сетей:

1. Протяженность распределительной сети среднего напряжения при переходе к замкнутым сетям возрастает на 30—40%.

2. Установленная мощность трансформаторов в замкнутых сетях должна быть больше на 20—30%, чем в радиальных.

3. Сечение низковольтных кабелей замкнутой сети в среднем выше на 30 и более процентов, чем радиальной сети при прочих равных условиях. В некоторых случаях может возрасти и протяженность сети при переходе к замкнутой схеме.

4. В связи с тем, что при замкнутых сетях отключение линий распределительной сети не сигнализируется, необходима прокладка специальных контрольных кабелей между распределительными подстанциями и диспетчерским пунктом.

Таким образом, переход от радиальных сетей к замкнутым во всех элементах схемы приводит к дополнительному расходу цветных металлов, оборудования и денежных средств. Общая сумма капитальных затрат при этом должна возрасти, примерно на 20—30%. Не прибегая к детальным подсчетам потерь электроэнергии, можно прийти к выводу, что они в обоих видах сетей

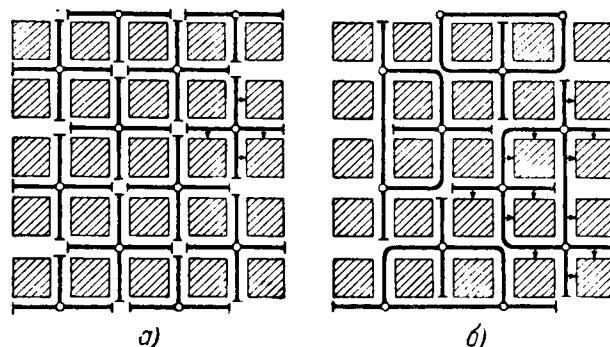


Рис. 3. Сопоставление низковольтной радиальной сети с замкнутой.
а — радиальная сеть; б — замкнутая сеть.

будут примерно одинаковыми. В эксплуатации замкнутых сетей не предвидится никаких преимуществ, кроме небольшого улучшения режима напряжения, вследствие большей эластичности сети, которому противопоставляются ожидаемые серьезные осложнения, связанные с дополнительным тщательным наблюдением за предохранителями, за нагрузками, за их распределением при разных режимах.

В результате может быть сделан вывод, что ни экономическими, ни техническими соображениями не может быть оправдано применение замкнутых сетей.

Теперь, в результате высокой организованности эксплуатации, аварийность настолько уменьшилась, что она практически не ощущается потребителями, в силу чего отпала необходимость в применении замкнутых сетей.

Располагая таким мощным средством предупреждения аварий, как профилактическое испытание изоляции, мы вправе ставить вопрос не о построении замкнутых сетей, в которых бы аварии самоликвидировались, а о таких сетях, в которых бы они совсем не возникали.

Дальнейшее развитие городских сетей должно пойти по пути совершенствования радиальных сетей, как наиболее простых и экономичных. В питательных сетях должно широко применяться уже оправдавшее себя на практике автоматическое включение резерва. В распределительных сетях среднего и низкого напряжений резервирование должно осуществляться путем ручных переключений. Дальнейшее повышение бесперебойности питания должно достигаться совершенствованием эксплуатации, улучшением качества кабелей, оборудования и их монтажа.

[4. 3. 1950]



Расчет пусковых сопротивлений для двигателей постоянного тока

Доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ

Харьковский электротехнический институт

Пусковые аппараты массового применения рассчитывают в предположении одинаковых пиковых токов, а также токов переключения. При независимом возбуждении расчет легко выполняется аналитическим методом, при последовательном и смешанном возбуждении обычно приходится прибегать к разбивке пусковой диаграммы. Однако можно предложить для всех случаев единообразный метод, непосредственно приводящий к цели при заданном числе ступеней n .

Пиковый ток I_1 , равный пусковому, может быть выбран по условиям пуска, ускорений и ограничений тока и момента. Поэтому его значение является исходной величиной. Ток переключения I_2 определится расчетом, однако нижний его предел ограничен нагрузкой I_{2p} , а верхний — пиковым значением тока. При известном навыке легко наметить вероятные границы I_a и I_b , в пределах которых лежит ток I_2 :

$$I_{zn} \leq I_a \leq I_2 \leq I_e \ll I_b \quad (1)$$

В пределах между I_a и I_e характеристику холостого хода с достаточной точностью можно заменить прямой линией. При переходе с одного положения пускового реостата на последующее предположим сохранение скорости во время коммутационного процесса и наличие только активного сопротивления. В таком случае придем к уравнению:

$$\frac{U - R_k I_2}{U - R_{k+1} I_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{I_0 + I_2}{I_0 + I'_1}, \quad (2)$$

связывающему основные величины.

Здесь U — приложенное напряжение;

R_k — полное сопротивление цепи якоря на k -том положении:

Φ_1 — поток при токе I_1 ; аналогично для индекса 2.

ый метод расчета параметров постоянного, так и смешанного возбуждения.

Ток I_0 определяет расстояние от начала координат до пересечения спрямляющей линии

Введем коэффициенты:

$$\frac{I_1}{I_2} = \lambda \frac{I_1}{I_0} = \kappa \frac{I_1'}{I_1} = \zeta \leq 1. \quad (3)$$

Заменим в (2) U равным ему R_1I_1 и преобразуем его:

$$\frac{\lambda R_1 - R_k}{R_1 - R_{k+1}} = \frac{\lambda + x}{1 + x\zeta}. \quad (4)$$

Уравнение (4) является рекуррентной формулой, позволяющей определить полное сопротивление на k -том положении по $(k+1)$ -му положению.

Обозначим:

$$\alpha = \frac{\lambda + \kappa}{1 + \kappa\zeta}, \quad \beta = \frac{\lambda\zeta - 1}{1 + \kappa\zeta}, \quad \kappa = (\zeta\alpha - 1)\kappa. \quad (5)$$

В таком случае для пуска n ступенями $R_{n+1} = R_s$ (невыключаемое сопротивление):

$$\left. \begin{aligned} R_n &= \alpha R_s + \beta R_1, \\ R_{n-1} &= \alpha R_n + \beta R_1 = \alpha^2 R_s + (\alpha + 1)\beta R_1 \\ R_1 &= \alpha R_2 + \beta R_1 = \alpha^n R_s + (\alpha^{n-1} + \alpha^{n-2} + \dots + \alpha + 1)\beta R_1 = \alpha^n R_s + \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1}(\alpha - 1)x R_1. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При заданном I_1 известно также R_1 . Обозначим через p отношение $R_2 : R_1$. В таком случае (6) напишется:

$$p\alpha^n + \frac{\alpha^n - 1}{\alpha - 1}(\zeta\alpha - 1)x - 1 = 0. \quad (7)$$

В уравнении (7) все величины, кроме a , известны. Если нагружочный ток велик и I_2 лежит в насыщенной части характеристики или число ступеней относительно велико, т. е. разность

между I_1 и I_2 ограничена, то без особой по-грешности можно принять $\zeta = 1$. В таком случае уравнения (7) и (5) упрощаются и приводят к решению:

$$\alpha = \sqrt[n]{\frac{x+1}{x+p}}; \quad \lambda = \alpha(x+1)-x. \quad (8)$$

При неизменном возбуждении $\Phi = \text{const}$, $I_0 = \infty$, $x = 0$. Следовательно,

$$\gamma = \alpha = \sqrt[n]{\frac{1}{p}} = \sqrt[n]{\frac{R_1}{R_x}}, \quad (9)$$

т. е. соотношения для двигателя независимого возбуждения является частным случаем общего уравнения (7) или (8).

Пример. Рассчитать пуск двумя ступенями для серийного двигателя типа КПД-500/496 $U = 220$ в, $I_n = 295$ а при 25% ПВ, $n = 660$ об/мин, $P_n = 58$ квт при $I_1 = 600$ а = $= 2,03 I_n$.

По естественной характеристике, имеющейся в каталоге, строим граничную:

$$n_e = \frac{U}{C\Phi} = \frac{U}{U-RI} n. \quad (10)$$

Далее из соотношения:

$$\frac{I_0 + I_1}{I_0 + I_a} = \frac{\Phi_1}{\Phi_a} = \frac{n_{e1}}{n_{ea}} \quad (11)$$

находим, полагая $I_a = 350$ а,

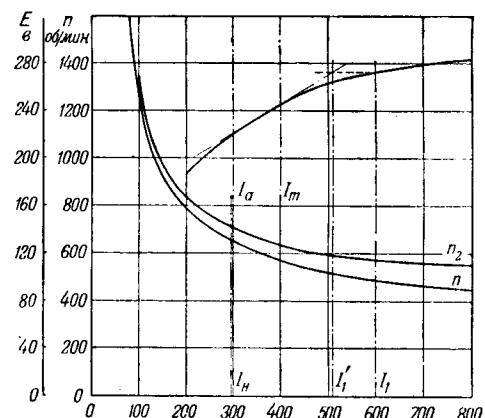
$$I_0 = \frac{I_1 n_{e1} - I_a n_{ea}}{n_{ea} - n_{e1}} = \frac{600 \cdot 578 - 350 \cdot 675}{675 - 578} = 1140.$$

Упрощенный расчет ($\zeta = 1$).
 $= 600 : 1140 = 10:19$.

Полагаем $p = 0,1$. Согласно (8):

$$\alpha = \sqrt{\frac{1+1,9}{1+0,1 \cdot 1,9}} = 1,56; \quad \lambda = 1,56 \left(\frac{10}{19} + 1 \right) - \frac{10}{19} = 1,86; \quad I_2 = I_1 : \lambda = 600 : 1,86 = 323 \text{ а};$$

$$R_1 = \frac{I_n}{I_1} R_n = \frac{295}{600} R_n = 0,49 R_n.$$



В соответствии с (6) и (5) получим

$$R_2 = \alpha R_n + (\alpha - 1)x R_1 = \left(1,56 \cdot 0,1 + 0,56 \frac{10}{19} \times \frac{295}{500} \right) R_n = 0,33 R_n.$$

Уточненный расчет. Полагаем, что ток переключения лежит в пределах $300 < I_2 < 400$ а. На рисунке проводим через соответствующие точки прямую и находим $I'_1 = 510$ а для $I_1 = 600$ а. Далее, согласно (11):

$$\frac{I_0 + 400}{I_0 + 300} = \frac{\Phi_e}{\Phi_a} = \frac{E_{re}}{E_{ra}} = \frac{247}{222},$$

откуда $I_0 = 588$ а; $x = 600 : 588 = 1,02$; $\zeta = 510 : 600 = 0,85$; $1 - \zeta = 0,15$; $x\zeta = 0,867$; $(1 - \zeta)x = 0,153$. В соответствии с (6) для $n = 2$

$$\alpha = \frac{(1 - \zeta)x + \sqrt{(1 - \zeta)^2 x^2 - 4(\zeta x + p)(x + 1)}}{2(\zeta x + p)} = \frac{0,153 + \sqrt{0,153^2 + 4 \cdot 0,967 \cdot 2,02}}{2 \cdot 0,967} = 1,53.$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \alpha(1 + x\zeta) - x = 1,53 \cdot (1 + 0,867) - 1,02 = 1,84, \\ \beta &= (\zeta\alpha - 1)x = (0,85 \cdot 1,53 - 1) \cdot 1,02 = 0,306, \\ R_2 &= \alpha R_n + \beta R_1 = (1,53 \cdot 0,1 + 0,306 \cdot 0,49) R_n = 0,31 R_n. \end{aligned}$$

Уточненный расчет привел к небольшим правкам, так как все токи лежат в области больших насыщений.

[19. 7. 1949]

◆ ◆ ◆

К расчету электромагнитов постоянного тока

Кандидат техн. наук И. Я. ЛЕХТМАН

Москва

Постановка задачи.

При проектировании новых электромагнитных устройств и механизмов перед конструктором воз-

никает сложная задача определения ряда геометрических и электрических параметров будущей конструкции. Решение этой задачи обычно распадается на ряд этапов: 1) выбор принципиальной схемы магнитной цепи; 2) составление первого ориентировочного эскиза конструкции; 3) предварительный расчет основных параметров (усилие или момент, потребляемая мощность и т. д.); 4) если основные параметры, найденные расчетным путем, находятся в близком соответствии с техническими условиями, то производится уточненный расчет, учитывающий ряд побочных факторов (насыщение стали, рассеяние, иногда — вихревые токи) и вносятся соответствующие корректизы в конструкцию; 5) если основные параметры, найденные расчетным путем, далеки от требуемых значений, то конструкция подвергается существенной переработке и затем весь ход расчета повторяется до тех пор, пока конструктор не добьется желаемых результатов.

Чем удачнее выбран первый вариант конструктивного решения электромагнита, тем с меньшей затратой времени и труда может быть завершено проектирование механизма в целом. В этом по существу сложном процессе проектирования играют большую роль такие обстоятельства, как производственный опыт, знакомство с существующими электромагнитами разных типов, умение обобщить данные существующих электромагнитов в виде полуэмпирических формул и т. д.

Начальный период проектирования труден тем, что очень велико число свободных параметров. Дополнительные условия, связывающие параметры друг с другом, облегчают проектирование. Здесь предпринята попытка найти такую обобщенную зависимость, связывающую четыре основных параметра, характеризующих срабатывание электромагнита: 1) силу срабатывания; 2) ход; 3) время срабатывания; 4) коэффициент запаса — с пятым параметром: электрической

Предлагается упрощенная формула, позволяющая по заданной силе, величине хода и времени срабатывания определить ориентировочное значение мощности, потребляемой обмоткой электромагнита постоянного тока.

мощностью, потребляемой обмоткой в режиме длительного включения. Обобщенная зависимость получена для электромагни-

тов клапанного и броневого типа при некоторых допущениях, влияние которых учитывается поправочным коэффициентом. Эта зависимость позволяет, таким образом, сразу получить ориентировочное суждение о мощности обмотки электромагнита, а отсюда, зная допустимый перегрев, перейти к определению требуемой поверхности охлаждения, т. е. к геометрическим размерам будущей конструкции.

Вывод приближенной формулы. Сила, действующая на якорь электромагнита (грамм),

$$F = \frac{10^8}{2.9810} \cdot I \frac{d\Psi}{d\delta}, \quad (1)$$

где I — ток, a ;

Ψ — потокосцепление, в сек;

δ — зазор, см [Л. 1,2].

Если пренебречь сопротивлением стальных участков магнитопровода по сравнению с сопротивлением воздушного зазора (что обычно допустимо при опущенном якоре), то начальное потокосцепление Ψ до начала движения якоря можно считать прямо пропорциональным току в обмотке:

$$\Psi_n = L_n I, \quad (2)$$

где L_n — начальное значение индуктивности обмотки (при $\delta = \delta_n$).

Так как при токе, меньшем тока трогания, сталь еще не насыщена, можно не учитывать потоков рассеяния и считать индуктивность обратно пропорциональной зазору:

$$L_n = \frac{k_1}{\delta_n}, \quad (3)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий число витков обмотки и площадь воздушного зазора.

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем:

$$F_n = \frac{10^8}{2.9810} \cdot I^2 \frac{k_1}{\delta_n^2}. \quad (4)$$

Пусть якорь удерживается в отпущенном состоянии некоторой механической силой F_{mp} , например, пружиной или внешней нагрузкой. Тогда якорь сможет начать движение лишь при условии

$$F_n \geq F_{mp}.$$

Этому моменту соответствует ток трогания в обмотке $I = I_{mp}$.

Процесс нарастания тока в обмотке при неподвижном якоре выражается экспоненциальным уравнением [Л. 1,2]

$$I = I_y (1 - e^{-\frac{R}{L_n} t}), \quad (5)$$

где $I_y = \frac{U}{R}$.

При $t = t_{mp}$ ток достигает значения I_{mp} .

Время

$$t_{mp} = \frac{L_n}{R} \ln \frac{k_{cp}}{k_{cp}-1}, \quad (6)$$

где $k_{cp} = \frac{I_y}{I_{mp}}$ называется обычно коэффициентом запаса.

Подставляя (3) в (6), получаем:

$$t_{mp} = \frac{k_1}{\delta_n R} \ln \frac{k_{cp}}{k_{cp}-1}. \quad (7)$$

Составим выражение для некоторого условного коэффициента A :

$$A = \frac{F_{mp} \delta_n}{t_{mp}}. \quad (8)$$

Коэффициент A имеет размерность мощности (сила, помноженная на расстояние и деленная на время), однако следует подчеркнуть, что это отнюдь не реальная механическая мощность, развиваемая электромагнитом, так как t_{mp} — время, протекающее с момента включения до начала движения; F_{mp} — начальная сила, удерживающая якорь до начала движения; δ_n — путь, проходимый якорем после начала движения. Тем не менее, условный коэффициент A оказывается пропорциональным вполне реальной величине — мощности, потребляемой обмоткой после окончания переходных процессов P_y (ватты).

Действительно, подставляя (4) и (7) в (8) и учитывая, что $P_y = I_y^2 R = k_{cp}^2 I_{mp}^2 R$, получаем:

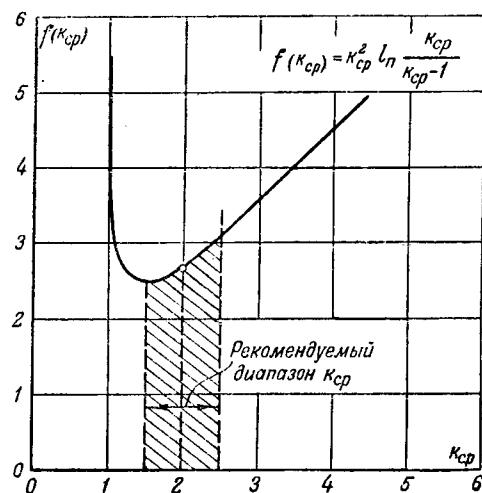
$$A = \frac{10^7}{2.981} \cdot \frac{P_y}{k_{cp}^2 \ln \frac{k_{cp}}{k_{cp}-1}} [\text{г.см/сек}]. \quad (9)$$

Выразим величину начального зазора через рабочий ход якоря δ_p :

$$\delta_n = k_\delta \delta_p \quad (9')$$

и время трогания через полное время срабатывания

$$t_{mp} = k_t t_{cp}. \quad (9'')$$



Тогда уравнение (9) может быть записано в иной форме:

$$P_y = \frac{k_\delta}{k_t} \cdot \frac{2.981}{10^7} k_{cp}^2 \ln \frac{k_{cp}}{k_{cp}-1} \frac{F_{mp} \delta_p}{t_{cp}}. \quad (10)$$

Формула (10) и является искомым выражением связи между основными параметрами срабатывания и мощностью обмотки. Из этой формулы следует несколько выводов.

1. Мощность обмотки электромагнита должна быть тем больше, чем больше требуемое усилие и ход и чем меньше заданное время срабатывания.

2. Мощность обмотки мало зависит от передаточного отношения между якорем и механизмом, приводимым в действие, так как в формулу (10) входит произведение силы на путь¹.

3. Наконец, из формулы (10) следует вывод об оптимальном значении коэффициента запаса. Действительно, если проанализировать выражение $k_{cp}^2 \ln \frac{k_{cp}}{k_{cp}-1} = f(k_{cp})$, являющееся общим сомножителем в формуле, нетрудно заметить, что при $k_{cp} \rightarrow 1$ и при $k_{cp} \rightarrow \infty$ функция $f(k_{cp})$ стремится к бесконечности. При $k_{cp} = 1,4$ функция $f(k_{cp})$ проходит через минимум. На рисунке представлен график этой функции, показывающий, что найденный оптимум не является очень острым. Так, при изменении k_{cp} от 1,07 до 2,5 функция $f(k_{cp})$ изменяется лишь на 30%. Выбор слишком малого коэффициента запаса может привести к ненадежности работы (например, при пониженном напряжении), поэтому можно рекомендовать выбор k_{cp} в диапазоне: 1,5–2,5. Этот вывод совпадает с результатами исследований М. И. Витенберга [Л. 3], рекомендующего выбирать k_{cp} порядка 1,8–2,2 с целью получения наибольшего быстродействия реле при за-

¹ Строго говоря, при разных передаточных отношениях кинематики меняется и коэффициент k_δ , так как минимальный зазор определяется обычно из условий надежного отпускания.

данной мощности, потребляемой от источника питания.

Принимая среднее значение $k_{cp} \approx 2$, находим $f(k_{cp}) \approx 2,75$. Подставляя это значение в формулу (10), получаем упрощенное, однако более удобное выражение для ориентировочного определения минимально необходимой мощности обмотки

$$P_y \approx a 5,5 \cdot 10^{-4} \frac{F_{mp} \delta_p}{t_{cp}}, \quad (11)$$

где a — поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент a учитывает не только соотношение между рабочим ходом и полным зазором ($k_\delta = \frac{\delta_n}{\delta_p}$) и между временем трогания и полным временем срабатывания ($\frac{1}{k_t} = \frac{t_{cp}}{t_{mp}}$), но также и влияние вихревых токов и рассеяния. Все перечисленные факторы заставляют увеличивать фактическую мощность обмотки, поэтому коэффициент a всегда больше единицы.

Для нескольких электромагнитов, исследованных экспериментально, коэффициент a был найден с помощью соотношения

$$a = \frac{P_{y\phi}}{P_{yp}}, \quad (12)$$

где $P_{y\phi}$ — фактическая мощность, потребляемая обмоткой;

P_{yp} — расчетное ее значение по формуле (10) при значении k_{cp} , соответствующем фактическому коэффициенту запаса.

Таблица

Параметры	Номера образцов			
	1	2	3	4
Конструкция магнито-проводка	Клапан-ного типа	Броневого типа		
Сила трогания F_{mp} , г . . .	600	5 000	20 000	41 500
Рабочий ход δ_p , см	0,15	0,18	0,6	0,7
Время срабатывания t_{cp} , сек	0,015	0,015	0,03	0,04
Коэффициент запаса k_{cp}	4,5	2,0	1,3	1,65
Фактическая мощность обмотки $P_{y\phi}$, вт	7,7	36	261	410
Расчетная мощность по формуле (10) P_{yp} , вт . . .	6,0	33	200	362
Поправочный коэффициент, a	1,28	1,09	1,24	1,13

В таблице приводятся основные данные этих электромагнитов. Все они выполнены из высококачественной стали, но отличаются как по габаритам, так и по конструктивному выполнению:

один из них — клапанного типа и три — броневого. Величина поправочного коэффициента a доходит до 1,28. Общей характерной особенностью рассмотренных электромагнитов является вид механической нагрузки (сила противодействия мало зависит от хода) и сравнительно небольшая масса движущихся деталей, связанных с якорем.

Естественно, что для других вариантов конструктивного выполнения и при других условиях нагрузки поправочный коэффициент может сильнее отличаться от единицы. Например, для некоторых телефонных реле, у которых усилие в конце хода значительно превышает усилие в начале движения, коэффициент a получается порядка 3—4. Настоящая работа не имеет целью дать «универсальную» формулу, пригодную для всех случаев, а лишь намечает то направление, в котором целесообразно вести обобщение данных по существующим электромагнитам с целью облегчить проектирование новых конструкций.

Заключение. Произведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Между основными параметрами, характеризующими срабатывание электромагнита постоянного тока: силой, ходом и временем, и между мощностью, потребляемой обмоткой, существует зависимость, могущая быть выражена приближенной формулой (11), причем для ориентировочного расчета мощности не нужно задаваться конструктивными размерами.

2. По условию обеспечения требуемых параметров срабатывания при минимальном потреблении мощности существует некоторое оптимальное значение коэффициента запаса (по току), ориентированно лежащее в диапазоне 1,5—2,5.

3. Предлагаемая формула облегчает процесс проектирования новых электромагнитов, так как накладывает дополнительные связи на основные параметры электромагнита и позволяет быстро оценить требуемую поверхность охлаждения, т. е. геометрические размеры.

4. Поправочный коэффициент a , входящий в формулу (11), составляет величину, превосходящую единицу. В первом приближении он равен отношению полного зазора к рабочему ходу, помноженному на отношение полного времени срабатывания к времени трогания. Более детальное уточнение этого коэффициента лучше проводить экспериментально для определенных типовых конструктивных форм.

Автор считает своим долгом отметить, что Б. С. Сотсков просмотрел рукопись и дал весьма полезные рекомендации и указания.

Литература

1. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения Госэнергоиздат, 1946.
2. Б. С. Сотсков. Элементы автоматики и телемеханики. Реле. Оборонгиз, 1938.
3. М. И. Витенберг. Расчет телефонных и кодовых реле. Энергоиздат, 1947.



Из истории электротехники

Книга „План электрификации РСФСР“

К истории ее издания и распространения¹

Д. М. ВОЙТИНСКАЯ

Центральная политехническая библиотека. Москва

В настоящее время, когда внимание всей страны привлечено к сооружению величественных строек коммунизма—гидроэнергетических сооружений на Волге, Аму-Дарье и Днепре, особенно интересно вернуться к работе, которая явилась первым звеном в подготовке и осуществлении великих ленинско-сталинских государственных хозяйственных планов Советского Союза.

За истекшие годы плачу ГОЭЛРО была посвящена обширная литература. К славной дате тридцатилетия плана ГОЭЛРО приурочена передовая статья настоящего номера журнала². Самая же книга «План электрификации РСФСР» уже давно является библиографической редкостью. Выпущенная незначительным тиражом в 1 500 экз., она была роздана делегатам VIII съезда Советов. Из-за сложности обстановки еще неоконченной гражданской войны и хозяйственной разрухи, книга в основном осталась на руках и не дошла до библиотек. Лишь немногие крупные библиотеки СССР имеют теперь полное издание этой книги, причем почти нигде не сохранилось обращение к читателям, наклеенное на титульном листе:

«Ввиду крайней незначительности числа экземпляров этой книги убедительно просят товарищей, получивших ее, передать книгу по прочтении в местную библиотеку, чтобы по этой книге могли учиться рабочие и крестьяне» (рисунок).

«План электрификации РСФСР» является документом большого значения для изучения истории советского периода, его экономики, техники и технической политики. Как исторический документ он уже включен в программы по истории техники во втузах.

В связи с знаменательной датой — 30-летием издания этой книги — своевременно напомнить историю ее создания как одного из интереснейших образцов литературного наследия первых лет советской эпохи.

Как известно, первая стадия работы ГОЭЛРО должна была закончиться выпуском коллективной работы: сводного труда — доклада, в котором должны были быть обобщены материалы специальных отраслевых групп ГОЭЛРО, работавших над изучением плана развития электрификации промышленности, сельского хозяйства и транспорта, а также материалы районных групп, занимавшихся созданием планов отдельных районов, составлявших в то время территорию РСФСР³. В связи с включением доклада ГОЭЛРО в программу работ VIII съезда Советов В. И. Ленин дал специальное указание — выпустить 1 500 экз. доклада к съезду, назначенному на декабрь 1920 г., для раздачи делегатам, которые должны были ознакомиться с ним сами и, по возвращении на места, широко популяризовать его среди населения.

Не говоря об огромной ответственности и сложности составления доклада, самый выпуск печатных материалов в то время был практически трудным. Времени до съезда оставалось мало. Типографии работали в тяжелых условиях, не было топлива, не было света, рабочие не были обеспечены продовольствием. Приходилось не только искать типографию и бумагу, но нужно было заботиться

также о пайках типографским рабочим, чтобы обеспечить своевременный выпуск книги. 6 районных планов общим объемом около 370 стр. пришлось печатать в четырех различных типографиях Москвы и Петрограда (4-й, 20-й, 29-й, 36-й гос. типографиях). Цветная схематическая карта печаталась отдельно в 1-й Образцовой типографии. И все же печатание шло медленно. Ленин ежедневно следил за ходом работы, давал указания и советы, предложил установить премии для печатников продовольствием и товарами ширпотреба.

Одновременно с заботой об издании печатных материалов Ленин уделял особое внимание оформлению карты для иллюстрации доклада в зале Большого театра. Писал ее молодой художник Родионов. Теперь почти невозможно представить, с каким трудом приходилось в то время доставать самые простые материалы. Владимиру Ильичу приходилось лично писать распоряжения, чтобы во-время были доставлены холст и краски, чтобы была обеспечена нормальная обстановка для работы художников и членов Комиссии, ответственных за современный выход издания и своевременную подготовку всех материалов к съезду. Так, 18 декабря он предписывает коменданту Большого театра: «Предлагаю не препятствовать и не прекращать работ художника Родионова, инж. Смирнова и монтеров, приготовляющих по моему заданию в помещении Большого театра к VIII-му съезду Советов карты по электрификации. Работу кончат в воскресенье. Отнюдь их не прогонять»⁴.

В таких исключительных условиях была создана и выпущена из печати книга, название которой было утверждено на заседании ГОЭЛРО 7 декабря: «План электрификации РСФСР. Доклад 8-му съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России». Книга была своевременно напечатана и роздана делегатам съезда как сводный материал к докладу ГОЭЛРО.

Эту замечательную книгу Владимир Ильич Ленин во время своего доклада о деятельности Совета Народных Комиссаров на VIII съезде Советов (22 декабря 1920 г.) показывал с трибуны делегатам съезда, называя ее второй программой партии. «Она нам нужна, как первый набросок, который перед всей Россией встанет, как великий хозяйственный план, рассчитанный не меньше, чем на десять лет и показывающий, как перевести Россию на настоящую хозяйственную базу, необходимую для коммунизма»⁵.

Книга была издана Государственным техническим издательством в декабре 1920 г. В состав тома включены: 1) Введение к докладу VIII съезду Советов Гос. комиссии по электрификации; 2) Схематическая карта электрификации России и пояснительная записка к ней; 3) Планы электрификации 8 отдельных районов (см. таблицу).

Первая часть тома имеет название: «План электрификации РСФСР. Введение к докладу VIII съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России». В надзаголовке: Научно-технический Отдел ВЧХ. На титульном листе выше заглавия одним концом приклеен небольшой (разм. 4 × 8,5 см) листочек с приведенным выше текстом обращения, адресованного делегатам съезда.

Эта часть книги является сводным обзором многочисленных работ сотрудников ГОЭЛРО, излагает принципиальную программу плановой электрификации, дает картину состояния народного хозяйства до и после первой

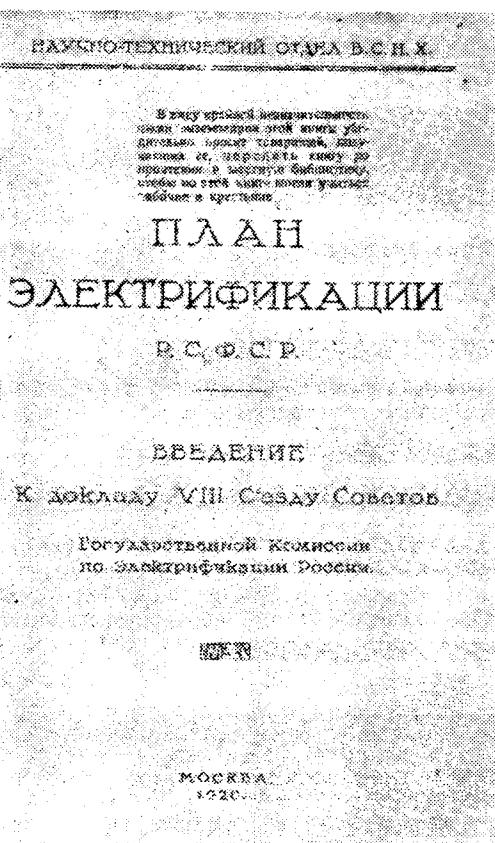
¹ План электрификации РСФСР. Доклад 8-му съезду Советов Государственной комиссии по электрификации России. М., Гос. тех. изд-во. 1920. 230 + 74 + 118 + 66 + 43 + 26 + 49 + 24 + 37 стр. (РСФСР. Научно-технический отдел Высшего совета народного хозяйства).

² Академик А. В. Винтер. Первый в мире государственный план электрификации».

³ Северный, Центрально-промышленный, Приволжский, Южный, Уральский, Кавказ, Туркестан и Зап. Сибирь (Крым, Зап. Россия и Восточная Сибирь не могли быть охвачены в связи с военными действиями).

⁴ Ленинский сборник, XXXIV, стр. 390.

⁵ В. И. Ленин. Соч., изд. 4-е. т., 31, стр. 483.



мировой войны и намечает план его восстановления и развития. Книга открывается предисловием, составленным председателем Комиссии Г. М. Кржижановским и ее секретарем М. А. Смирновым; в предисловии указан состав Комиссии, вкратце охарактеризован круг ее деятельности и лица, принимавшие особо активное участие в ее работе, а также перечислены авторы отдельных глав сводного обзора (Г. М. Кржижановский, И. Г. Александров, Г. О. Графтио, К. А. Круг и др.). Введение состоит из следующих глав: А. Электрификация и план народного хозяйства. Б. Электрификация и топливоснабжение. В. Электрификация и использование водных сил. Г. Электрификация и сельское хозяйство. Д. Электрификация и транспорт. Е. Электрификация и промышленность. К этой же части относится «Схематическая карта электрификации России», выполненная в красках и снабженная пояснительной запиской. В заключение приложена «Общая опись материалов Государственной Комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО)» в количестве свыше 200 наименований (статистических материалов, записок, карт, диаграмм и др.). Общий объем «Введения», включая пояснительную записку, составляет 230 страниц. Тираж и место печатания не указаны. С точки зрения полиграфического оформления книга носит отпечаток тяжелого положения промышленности в годы гражданской войны и хозяйственной разрухи. Не случайно поэтому книга представляет собой сброшюрованный том отдельных работ не только с различной нумерацией страниц, но даже напечатанных на разной бумаге, разных форматах.

Несмотря на все трудности, связанные с печатанием книги, при ее оформлении была поставлена задача — максимально облегчить читателям работу над этой книгой и ее практическое использование. Так, например, на полях вынесены основные положения текста, заменяющие тезисы конспекта; жирным шрифтом набраны основные мысли, на которые следует обратить особое внимание; логические части глав разделяются специальным полиграфическим знаком. Эти детали в оформлении и упомянутая уже на克莱ка на титульном листе свидетельствуют о том, что книга была рассчитана на самый широкий круг читателей.

Вслед за «Введением» в том включены 8 самостоятельных выпусков по электрификации отдельных районов.

Каждый из них является извлечением из работ соответствующих районных комиссий, о которых говорилось выше, и представляет собой сжатый обзор сведений о состоянии района, послуживших основой для составления плана электрификации, разработанный план развития электрификации района, рассчитанный на 10—15 лет, и план использования существующих станций, иллюстрированный соответствующими картами. К каждому выпуску приложен список работ, послуживших материалом для составления плана электрификации данного района. Как уже указывалось, эти работы печатались по отдельности, но при издании всего тома были объединены вместе. Так как в настоящее время полный комплект книги, состоящий из «Введения» со всеми приложениями и восьми районных планов, является библиографической редкостью, в составленной нами таблице дано краткое описание этих работ.

Уделяя большое внимание устной и печатной пропаганде идеи электрификации среди широких масс трудящихся, Владимир Ильин требовал от работников ГОЭЛРО с самого начала их работы устройства популярных лекций, составления популярных брошюр и газетных статей, которые бы освещали вопросы электрификации по материалам плана ГОЭЛРО. В одном из писем накануне съезда В. И. Ленин в числе практических мероприятий кампании по пропаганде электрификации предлагает: «...написать срочно несколько популярных брошюр... и переделать «книгу»... в ряд более популярных очерков для обучения в школе и чтения крестьянам»⁶.

Мастерским образом популяризации «Плана электрификации РСФСР» является статья Ленина «Об едином хозяйственном плане»⁷.

В письме к В. И. Ленину по поводу плана ГОЭЛРО И. В. Сталин, в числе немедленных практических мероприятий для его осуществления предлагал обязать «Правду», «Известия», особенно «Экономическую жизнь» заняться популяризацией «Плана электрификации»⁸.

В решении VIII съезда Советов была поставлена задача: «...принять все меры к самой широкой пропаганде этого плана и ознакомлению с ним самых широких масс города и деревни. Изучение этого плана должно быть введено во всех без изъятия учебных заведениях республики; каждая электрическая станция и каждый сколько-нибудь сносно поставленный завод и совхоз должны стать центрами ознакомления с электротехническим, с современной промышленностью и центрами пропаганды плана электрификации и систематического преподавания его»⁹.

Через полгода после VIII съезда Советов Ленин в проекте «Наказа от Совета Труда и Обороны местным советским учреждениям» включает в перечень обязательных вопросов, на которые должны быть даны точные ответы в отчетах местных органов, следующие вопросы: «Есть ли в местной губернской и уездной библиотеке «План электрификации РСФСР», доклад VIII Съезду Советов? Сколько экземпляров? Если нет, значит, местные делегаты VIII Съезда Советов люди нечестные, подлежащие изгнанию из партии и удалению со всех ответственных постов, либо бездельники, которые должны быть обучены тюремным заключением исполнению своего долга (на VIII Съезде Советов были разданы 1 500—2 000 экземпляров для местных библиотек). Какие меры прияты во исполнение постановления VIII Съезда Советов о широкой пропаганде плана электрификации? Сколько статей в местных газетах об этом? Сколько докладов?... В скольких учебных заведениях введено, согласно решению VIII Съезда Советов, преподавание плана электрификации?...»¹⁰.

Задачи пропаганды плана ГОЭЛРО Ленинставилшироко, предлагая ознакомить с ним пролетариат и других стран. В одном из писем в июне 1921 г. он пишет: «Не знаю, все ли сделано для ознакомления членов III конгресса Коммунистического Интернационала с планом электрификации. Если не все, надо в 1—2 недели сделать обязательно. Должна быть выставлена (в кулуарах конгресса) 1) карта электрификации с кратким текстом на 3-х языках 2) тоже — районные карты 3) баланс электрификации 4) карту важнейших местных, маленьких, новых станций.

⁶ Ленинский сборник, XXXIV, стр. 295.

⁷ В. И. Ленин. Соч., изд. 3-е, т. 26, стр. 168—174.

⁸ И. В. Сталин. Соч., т. 5, стр. 51.

⁹ В. И. Ленин. Соч., изд. 4-е, т. 31, стр. 499.

¹⁰ В. И. Ленин. Соч., изд. 3-е, т. 26, стр. 379—380.

Сведения о выпусках-планах электрификации отдельных районов

№ п/п.	Заглавие	Территория, входящая в состав района (по адм. делению на 1920 г.)	Место издания и печатания	Объем
1	„Основания проекта электрификации Северного района“	Петроград и Петроградская обл., Олонецко-Мурманской, Архангельско-Вологодская, Новгородская, Псковская и Витебская области	Пг., 4-я Гос. тип.	74 стр. с картами
2	„Электрификация Центрально-промышленного района“	Московская, Тверская, Ярославская, Костромская, Нижегородская, Владимирская, Пензенская, Рязанская, Тульская, Калужская, Орловская, Смоленская, Минская (часть), Могилевская, Курская, Тамбовская, Гомельская и Иваново-Вознесенская губернии	М., 20-я Гос. тип.	118 стр. с картами
3	„Электрификация Южного района“	Воронежская, Харьковская, Полтавская, Черниговская, Подольская, Волынская, Херсонская, Екатеринославская, Таврическая губерния и область войска Донского	М., 29-я Гос. тип.	66 стр. 3 вкл. л. карт.
4	„План электрификации При-волжского района“	* Казанская, Симбирская, Самарская, Саратовская и Астраханская губернии	М., 36-я Гос. тип.	46 стр. 1 вкл. л. карт.
5	„Электрификация Уральского района“	Вятская, Пермская, Уфимская, Оренбургская губерния и Уральская область	М., тип. не указана	26 стр. 1 вкл. л. карт.
6	„Электрификация Кавказского района“	Северный Кавказ и Закавказье, Ставропольская губ., Кубанская, Терская, Дагестанская область, Бакинская, Елизаветпольская, Тифлисская, Кутанская, Эриванская, Черноморская губерния, Карская, Батумская область, Сухумский округ	М., тип. не указана	49 стр. 1 вкл. л. карт.
7	„Электрификация Западной Сибири“	Тобольская, Томская, Алтайская губ., Акмолинская, Семипалатинская и Тургайская области	М., 36-я Гос. тип.	24 стр. 1 вкл. л. карт.
8	„Электрификация Туркестанского района“	Закаспийская, Самаркандская, Ферганская, Сырдарьинская и Семиреченская области, Хива и Бухара	М., 36-я Гос. тип.	37 стр. 1 вкл. л. карт.

Должна быть краткая (16—24 стр.) брошюра на 3-х листах, конспект «Плана электрификации»¹¹.

Решения VIII съезда Советов и огромный интерес, проявленный к вопросам электрификации со стороны широких масс, вызвали появление в 1921 г. довольно значительного количества популярной литературы на эту тему, выхodившей преимущественно в местных изданиях. В Петрограде, Ростове н/Д, Казани, Воронеже, Рязани, Саратове, Владимире отдельными брошюрами были изданы почти все главы «Введений» к докладу. В числе массовых агитационных изданий был выпущен плакат — «Об электрификации России» — призыв к увольняемым с военной службы красноармейцам претворить в жизнь в своей дальнейшей работе после возвращения по домам решения VIII съезда Советов об электрификации.

Составление научной и в то же время доступной для трудящихся книги, излагающей технические и экономические вопросы электрификации, было поручено И. И. Скворцову-Степанову. За его работой непосредственно следил Ленин, заботясь о том, чтобы были обеспечены все условия для успешного труда автора, вся необходимая литература, консультации. В марте 1922 г. И. И. Скворцов-Степанов закончил книгу, которую Владимир Ильич оценивал настолько высоко, что счел нужным снабдить ее своим предисловием: «От всей души рекомендую настоящую работу тов. Степанова вниманию всех коммунистов. Автору удалось дать замечательно удачное изложение труднейших и важнейших вопросов... Теперь, с появлением в свет настоящего «пособия для школ» тов. Степанова, надо добиться — и мы добьемся! — того, чтобы в каждой уездной библиотеке (а затем и в каждой волостной) было по несколько экземпляров этого «пособия»; — чтобы при

каждой электрической станции в России (а их свыше 800) не только была эта книга, но и устраивались обязательно общедоступные народные чтения об электричестве и об электрификации РСФСР и о технике вообще; — чтобы каждый народный учитель в каждой школе прочел и усвоил это «пособие»... и не только прочел, понял и усвоил сам, но умел бы пересказывать это просто и понятно ученикам школы и крестьянской молодежи вообще»¹². В течение 1922—1925 гг. вышли три издания этой единственной в своем роде книги¹³. Ее издание положило начало появлению сравнительно большого количества массовой литературы по электротехнике и электрификации, особенно в 1923—1925 гг. В издательствах «Новая деревня», «Красная новь» и др. вышел ряд брошюр для крестьянства, доступно написанных, небольшого формата с иллюстрациями, популяризирующих вопросы электрификации сельского хозяйства. Эта литература сделала в свое время большое политico-просветительное дело. При этом нельзя забывать, что началом и источником всей массовой литературы, популяризирующей идеи электрификации, явился основной труд — «План электрификации РСФСР».

Учитывая историческое значение этой книги, своевременно поставить вопрос о ее переиздании, в порядке публикации научного наследства с необходимыми комментариями. Новое издание облегчит широкое использование в научной работе этого выдающегося труда, являющегося первым звеном единого научного ленинско-сталинского плана строительства экономической основы коммунизма.

¹¹ В. И. Ленин. Соч., изд. 3-е, т. 27, стр. 195—196.

¹² И. Степанов. Электрификация РСФСР в связи с переходной фазой мирового хозяйства. Предисловие В. Ленина и Г. Кржижановского, М. Гос. изд-во, 1922, XVI, 392 стр. с илл. и карт. То же, М.—Пг. Главн. управл. Гос. изд-ва, 1923, XIV, 352 стр. То же, 3-е изд., М.—Л., Гос. изд-во, 1925, 276 стр. с илл. и карт.

¹³ Ленинский сборник, XX, стр. 218—219.



О двух важных этапах в истории электроавтоматики

Кандидат техн. наук А. В. ХРАМОЙ

ИАТ Академии наук СССР

Объединяя огромное разнообразие электромеханических, электромагнитных и электронных методов и средств технического контроля, управления и регулирования, современная электроавтоматика является важным элементом социалистической техники и приобретает все более и более широкое распространение в народном хозяйстве Союза ССР.

История развития этой области техники до сих пор не привлекла в должной мере внимания историков отечественной техники. Многие работники современной электроавтоматики часто не подозревают, что ряд основных технических средств, которыми они оперируют в своей повседневной деятельности, фактически являются нашими отечественными изобретениями. Немало электроавтоматических приборов и аппаратов было в свое время привезено в Россию в качестве «достигний зарубежной техники», а на самом деле в подавляющем большинстве эти приборы и аппараты были заимствованы тем или иным путем у русских изобретателей и ученых, либо изготовлены по русским проектам в мастерских и заводах, принадлежавших зарубежным предпринимателям и инженерам: Уитстону, Брге, Сименсу, Шуккерту, Фарко, Фроману, Тиррилю и др.

Проведенные в последнее время, на основе архивных и других материалов, исследования дают еще одно яркое доказательство моши творческого гения русского народа и, в частности, выясняют исторические корни электроавтоматики, позволяя установить бесспорный приоритет отечественных изобретателей и ученых в разработке, изготовлении и применении отдельных автоматических приборов и комплексных электроавтоматических систем.

Первые реле, датчики, автоматические переключатели, распределители, регуляторы, устройства синхронной связи, следящие системы, счетно-решающие устройства, а также такие элементы электроавтоматических приборов, как, например, фотоэлементы и т. д., были созданы в России в различных областях техники в процессе экспериментальных научных исследований выдающимися русскими физиками и электротехниками.

Так, например, изобретателем первого электрического реле был русский ученый П. Л. Шиллинг. Это реле составляло существенную часть сигнального вызывного прибора в телеграфе, изобретенном и построенном им в 1830—1832 гг. Воспринимающим звеном этого реле был мультиплексор с магнитной стрелкой, реагирующий на появление тока в цепи. Исполнительным звеном реле служил врачающийся рычаг с грузиком. При повороте стрелки грузик падал на выступ задержки часовового механизма, приводящего в действие сигнальный звонок.

Первый электрический распределитель (устройство, автоматически переключающее электрические цепи в заданном порядке) изобрел в 1845 г. К. И. Константинов. Он же является изобретателем первого электромагнитного регулятора скорости вращения (1853 г.).

Первое устройство синхронной связи разработал и применил выдающийся деятель военной техники В. Ф. Петрушевский в дальномере, построенном им в конце 60-х годов прошлого века и испытанном на батареях Кронштадтской береговой артиллерии. Это устройство состояло из «несложных часовых механизмов, регулируемых простыми электрическими приспособлениями» (Центральный государственный военно-исторический архив. Фонд 506, оп. 1, дело 619, л. 28).

Как будет показано ниже, А. П. Давыдов изобрел в 1877 г. следящую систему и в 1881 г. первый счетно-решающий прибор.

Первый электрический регулятор прерывистого типа изобретен артиллерийским офицером М. Н. Кармановым в 1880 г., почти на четверть века опередившим вибрационный регулятор Тирриля. Первый электроакустический датчик изобрел в 1880 г. Р. Р. Вреден, один из активных членов Русского технического общества. В 1883 г. он впервые разработал и осуществил конструкцию устройства защиты телефонной аппаратуры от действия сильных токов. Интересно отметить, что на принципе,ложенном в основу этого первого реле электрической защиты, построен ряд современных реле защиты электрических сетей.

Изобретателем первого фотоэлемента и первой фотоэлектрической схемы, положившей, по существу, начало современной электронной автоматики, был А. Г. Столетов, открывший в 1888 г. «актино-электрический» эффект.

Не имея возможности в рамках статьи сколько-нибудь полно охарактеризовать весь этот широкий фронт пионерских работ русских изобретателей и ученых в данной области, мы остановимся лишь на двух этапах развития электроавтоматики в XIX в.—этапах, связанных с именами К. И. Константина и А. П. Давыдова, до сих пор почти не освещенных в современной литературе.

- 1) создание первой в мире электроавтоматической системы (предназначенной для определения скоростей полета снаряда в произвольных точках его траектории);
- 2) создание первой в мире электроавтоматической системы централизованного управления многими объектами (в данном случае орудиями для стрельбы по движущимся целям).

Первый этап (1843—1860) охватывает работы К. И. Константина, связанные с созданной им впервые электроавтоматической системой: прибор для автоматического измерения времени горения трубок пустотелых снарядов (1843), электробаллистическая установка для определения скоростей полета снаряда (1844), прибор для проверки точности работы электробаллистической установки (1845), автоматический переключатель цепей (распределитель) (1845), электромагнитный телеграф для электробаллистического прибора (1848), автоматический наблюдатель за равномерностью вращения хронометрического цилиндра в ракетном баллистическом маятнике (1849), электромагнитный регулятор скорости вращения (1853), а также ряд других работ, как то: аппарат для управления стрельбой из орудий на расстоянии (1856), электрическая схема автоматического управления гидравлическим прессом для набивки ракет (1860).

На рис. 1 дано изображение схемы одного из перечисленных приборов — прибора для автоматического переключения электрических цепей в заданном порядке, послужившего отправным началом для проектирования приборов, на которых базируются современные автоматические телефонные станции и другие разнообразные устройства и системы автоматики и телемеханики. Описанный распределитель был забыт историками техники, но, несомненно, что на него было обращено сугубое внимание зарубежными предпринимателями, которые не замедлили воспользоваться чертежом и описанием (опубликованным в 1846 г. в Артиллерийском журнале [Л. 1]).

На рис. 2 изображен ракетный баллистический маятник, который дал в руки исследователям, конструкторам и строителям боевых ракет незаменимое орудие. При помощи этого прибора проектирование и изготовление ракет переводилось из области искусства и интуиции в область науки и точного инженерного расчета. Как известно, К. И. Константинов впервые в истории развития ракеты

определен при помощи этого прибора не только движущую силу ракеты, но также закон изменения этой силы во времени от начала до конца горения ракеты.

Установленную в приемнике P (рис. 2) ракету зажигали, движущая сила ракеты отклоняла маятник на некоторый угол. По величине угла и весу ракеты определяли ее движущую силу. Для того чтобы определить закон изменения этой силы во времени, К. И. Константинов пристроил к баллистическому маятнику цилиндр A так, что ось его параллельна плоскости качания маятника. Цилиндр приводился в движение маховиком при помощи рукоятки B . Параллельно цилиндру по рельсам D и E двигалась тележка F , которая была связана при помощи стержня G с маятником таким образом, что величины перемещения тележки были прямо пропорциональны синусам углов отклонений маятника. На тележке была установлена игла α . Игла α чертила кривые, изображенные в развернутом виде на рис. 2 (справа), а именно AX , когда маятник в покое и Abc , когда маятник под воздействием движущей силы ракеты отклоняется на некоторый угол. Точка b представляет положение маятника в конце первого полуразмаха (опыт показал, что «вся движущая сила ракет всегда развивается в первом полуразмахе...»).

Существенно важным условием, обеспечивающим правильность показаний ракетного баллистического маятника, была равномерность вращения цилиндра A . Рабочий, приводивший в движение колесо B , не всегда внимательно прислушивался к сигнальному звонку «акустического регулятора» (справа в верхнем углу рис. 2). Нужно было найти более надежный способ контроля равномерности вращения цилиндра. Сначала К. И. Константинов поставил наблюдателя, снабдив его секундомером с отметчиком, но скоро пришлось заменить этого наблюдателя самодействующим устройством. Автоматический наблюдатель или контролер был устроен следующим образом. Как видно на рис. 2, на ось махового колеса насажен переключатель N , который при каждом обороте махового колеса замыкает электрическую цепь электромагнитного реле, на чертеже не показанного. Якорь этого реле, нажимая на отметчик секундомера, наносит точку на шкалу секундомера. Таким образом, получается графическое изображение равномерности вращения цилиндра: каждый оборот обозначается на шкале точкой, а расстояние между двумя смежными точками показывает время, в течение которого произошел один оборот цилиндра. «Равенство этих расстояний между собой показывает равномерность вращательного движения цилиндра — писал К. И. Константинов (там же).

Описанное устройство, этот «электрический наблюдатель», является, насколько нам известно, первым самодействующим регистрирующим прибором автоматического контроля, основанным на применении электричества. К сожалению, историки нашего электроприборостроения еще не уделили должного внимания этому изобретению К. И. Константинова и не выявили его роли в создании электрических приборов автоматического контроля.

Работая над усовершенствованием своего ракетного баллистического маятника, К. И. Константинов убедился в том, что «было бы крайне нужно производить вращательное движение цилиндра посредством механического движения с беспрерывным регулятором (разрядка наша — А. Х.) потому, что приводящие в движение цилиндр рабочие тревожатся, отвлекаются горением ракеты и не поддерживают достаточно равномерность движения по указаниям регулятора» [Л. 2].

Такого рода автоматический регулятор К. И. Константинов предложил в 1853 г. (рис. 3). В этом регуляторе в верхней части оси ab установлена стальная трубка cd , в которую вставлены три стеклянные одинакового диаметра трубы — одна по линии оси ab , а две на равных от нее расстояниях. В эти трубы, равно как и в трубку cd , налита ртуть. При вращении оси ab уровень ртути под влиянием центробежной силы будет опускаться в трубку r и подниматься в трубках o и q . В трубку r вставлен стальной стержень m , устанавливаемый при помощи муфты s ; в трубку o входит стальной стержень n . Верхняя вертикальная часть этого стержня вращается свободно в медной трубке, укрепленной посредством муфты r . При настройке регулятора стержень m погружается в ртуть трубки r , а стержень n устанавливается над уровнем ртути в трубке o на расстоянии «не менее половины погружения среднего стержня в ртуть» [Л. 3].

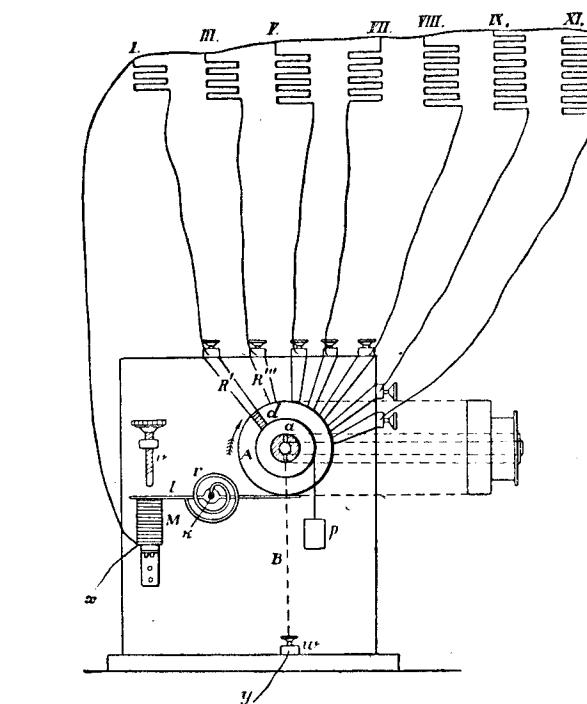


Рис. 1. Автоматический переключатель цепей (распределитель).

A — деревянный двойной валик, вращающийся при помощи груза p вокруг стальной оси, укрепленной в доске B ; d — медная пластинка на поверхности большого круга валика A , связанная с осью валика посредством медной втулки; l — рычаг; M — электромагнит; r — уравновешивающая пружина; v — ограничитель движения рычага l ; R , R'' — медные пружины, прикрепленные к доске B и прилегающие к большому кругу валика A ; w — зажим, соединяющий ось валика с цепью электромагнита, приводящего в действие рабочий орган.

вается над уровнем ртути в трубке o на расстоянии «не менее половины погружения среднего стержня в ртуть» [Л. 3].

По мере увеличения скорости вращения ab стержень mm будет выходить из ртути, налитой в трубку, а стержень n , наоборот, приближаться к уровню ртути в трубке o . Пока стержень mm соприкасается с ртутью в трубке r , возбуждается электромагнит E' , который притягивает к себе рычаг L_1 , вращающийся вокруг точки f_1 , и, таким образом, освобождает колесо R , приводимое «механическим движителем».

Затем наступает момент, когда оба стержня будут вне контакта с ртутью, что соответствует нормальной скорости вращения; при этом оба электромагнита E и E' будут в покое. Дальнейшее увеличение скорости вращения приведет к контакту стержня n с уровнем ртути в трубке o и, следовательно, к возбуждению электромагнита E , в результате чего усиливается давление рычага L на колесо R .

К. И. Константинов предлагал применить этот регулятор «вместо конического маятника в паровых машинах, причем электромагниты E и E' могли бы быть употреблены для производства нужного механического действия к управлению ходом паровой машины, т. е. для регулирования выпуска пара и даже для увеличения или уменьшения самого расширения пара под поршнем. Подобный прибор был бы чувствительнее употребляемого ныне в паровых машинах конического маятника» [Л. 3].

Надо подчеркнуть, что этот прибор К. И. Константинова, несомненно, сыграл важную роль в истории развития автоматического регулирования. Спустя четверть века после опубликования описания электромагнитного регулятора К. И. Константинова в печати, заграницей появились электромагнитные регуляторы паровых машин, которые впоследствии импортировались в Россию как «новинки западноевропейской техники».

Теперь становится ясным, что приоритет в области применения электричества к регулированию паровых машин принадлежит замечательному русскому изобретателю и ученному К. И. Константинову.

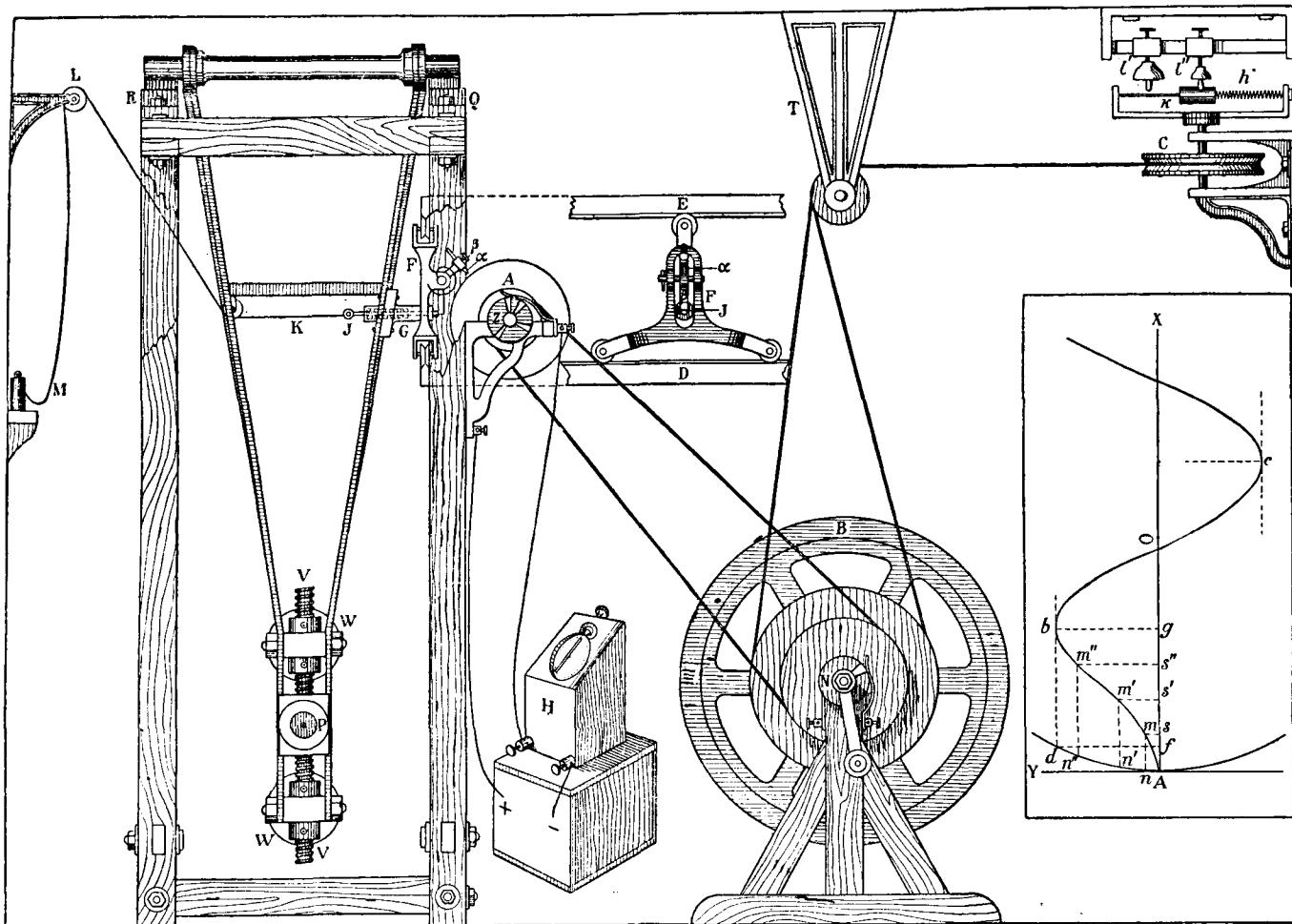


Рис. 2. Электрический наблюдатель в ракетном баллистическом маятнике.

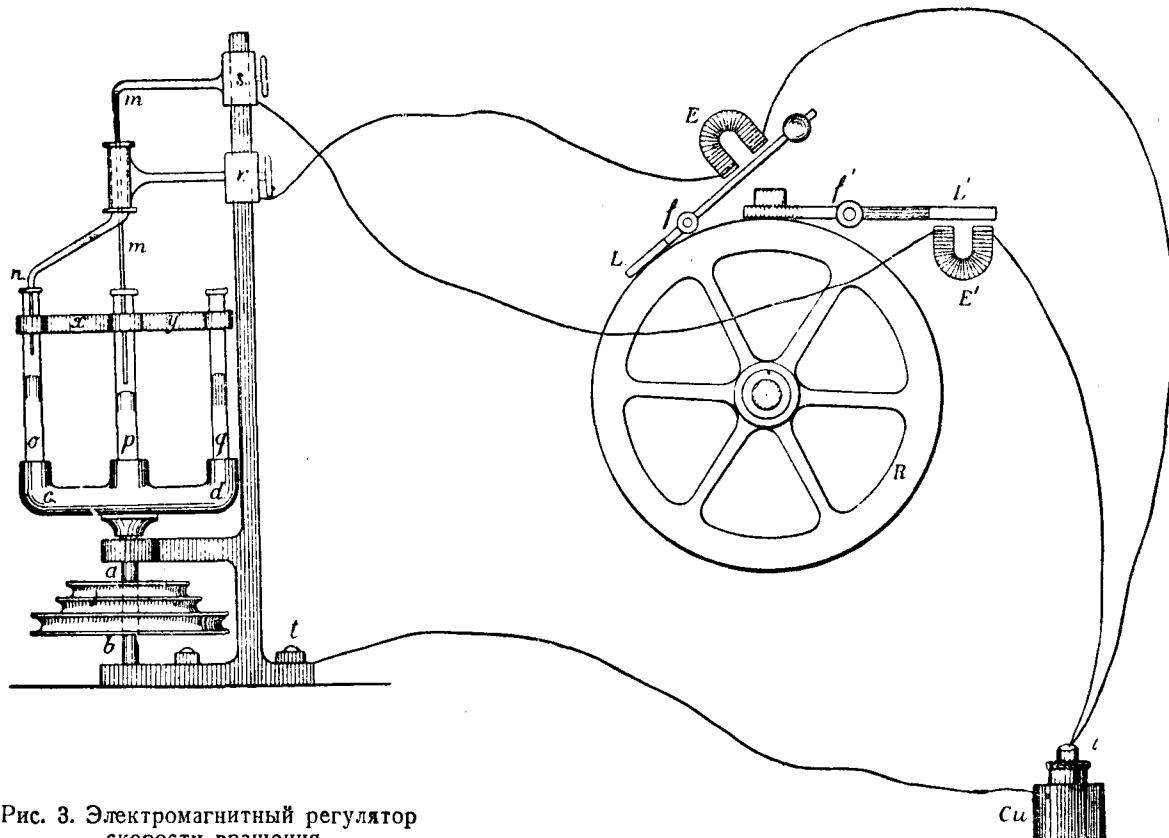


Рис. 3. Электромагнитный регулятор скорости вращения.

В 1860 г. К. И. Константинов разработал схему электрического регулирования и управления гидравлическим прессом для набивки ракет. Эта схема обеспечивала, во-первых, постоянную величину давления, во-вторых, наперед заданный период времени, в течение которого это давление должно было поддерживаться, и в-третьих, необходимые защитные блокировки. Для этой схемы К. И. Константинов предложил ряд оригинальных приборов и в том числе электрический таймер, играющий, как известно, в современной автоматике важную роль. «Для возможности продолжения по произволу большего или меньшего нажатия пресса необходимо было бы прибегнуть к хронометрическому расположению (т. е. устройству — А. Х.), которые, будучи освобожденными от действия магнита, приходило бы в действие в конце определенного времени, установленного наперед по произволу» [Л. 2, стр. 166—167]. Константинов знал, что эта его первая в истории техники попытка применить электроавтоматические приборы для автоматизации технологических процессов значительно опережает эпоху и поэтому вряд ли может рассчитывать на осуществление. «Ныне,— заключает описание своей схемы К. И. Константинов,— мы говорим о возможности применения электричества к ракетным прессам для регулирования их действия только потому, чтобы заявить наши права на применения, которые не без будущности для этой эпохи, когда порождение электричества и обхождение с ним будут более доступны технологии, чем ныне» (там же, стр. 167).

Лекции К. И. Константина о боевых ракетах, в которых подробно освещались вопросы электрического управления и регулирования процесса набивки ракет, были опубликованы в 1861 г. в Париже. Появление этих лекций на французском языке, а затем и на других иностранных языках, привело фактически к тому, что зарубежные фирмы быстро восприняли принципы и методы электроавтоматики, пропагандируемые нашим выдающимся соотечественником, и через несколько десятилетий в Россию ввозили электроавтоматические приборы, фактически созданные на основе изобретения русского инженера.

Рядом с К. И. Константиновым стоит другая незаслуженно забытая фигура крупнейшего русского изобретателя электротехники Алексея Павловича Давыдова. Если Константинов создал первую в мире электроавтоматическую систему в виде электробаллистической установки [Л. 5], то А. П. Давыдов создал первую в мире электроавтоматическую систему централизованного управления многими объектами.

Первые работы А. П. Давыдова относятся к минному делу. С 1854 г. он трудится над созданием электромагнитной мины и быстро добивается крупных успехов. Его электромагнитная мина с 26-фунтовым зарядом признана лучшей по сравнению с миной акад. Якоби с 2-пудовыми зарядами. Электромагнитное реле, а затем «реле-соединитель», изобретенные А. П. Давыдовым, значительно подвинули технику электромагнитных мин. 14 апреля 1867 г. в Государственном Совете (в департаменте государственной экономии) был сделан доклад о минах А. П. Давыдова. В резолюции по этому докладу было постановлено «в вознаграждение отставного поручика А. П. Давыдова за право на употребление русским правительством изобретенных им, Давыдовым, подводных мин назначить изобретателю к единовременной выдаче 50 тыс. руб. и сверх того, пожизненное солдершение по 2 000 руб. в год с оставлением за ним, Давыдовым, права передачи упомянутых изобретений в другие государства» [Л. 6].

Работа А. П. Давыдова над электромагнитной миной была только началом его неутомимой, длившейся около полу века творческой деятельности, большую часть которой он посвятил созданию систем автоматической стрельбы, этих первых в истории техники электроавтоматических систем централизованного управления многими объектами. Первые испытания отдельных элементов этой системы (электромагнитного замка, специального кренометра с электрическими контактами) производились осенью 1865 г. на броненосном фрегате «Севастополь». Два года спустя система «гальванической стрельбы» А. П. Давыдова была испытана на броненосной батарее «Не тронь меня». Испытания показали, что система удовлетворяет трем основным требованиям прицельной стрельбы судовой артиллерии: своевременность выстрела, надлежащее вертикальное наведение и надлежащее горизонтальное наведение.

10*

Принятая военно-морским флотом в 1877 г. система А. П. Давыдова состояла из следующих основных узлов: гальванический кренометр, обеспечивающий необходимый угол возвышения орудия соответственно расстоянию до цели и устраняющий влияние качки на точность вертикального наведения; гальванический индикатор, позволяющий регулировать горизонтальное наведение и устрашающий «влияние хода и поворотливости» на меткость стрельбы; рулевой аппарат — устройство синхронной связи для передачи рулевому данных о величине курсового угла: «электромагнитный замок» (исполнительный механизм для производства выстрела); устройство для контроля правильности «положения орудия относительно постамента и той точности, с которой определяется относительно начального положения угол, придаваемый орудиям для ставления данного угла возвышения» (поворотный кренометр); центральная станция для управления всей системой (для осуществления операций по управлению и сигнализации в центральной станции было 80 пружинных контактов).

Приводим краткое описание системы А. П. Давыдова, заимствованное из Морского сборника: «Индикатор, кренометр и орудия связаны между собой гальванической цепью проводников, снабжаемых гальваническим током от батарей Лекланше... Гальваническая цепь имеет три главных перерыва, из которых два у индикатора и один у кренометра. Один из перерывов гальванической цепи системы замыкался автоматически, когда сосредоточенные прицельные линии орудий в горизонтальном наведении придут в совпадение с направлением поражаемого предмета; второй перерыв замыкается по воле управляющего стрельбой в то время, когда им признается необходимость выстрела или залпа, наконец третий перерыв у кренометра замыкается автоматически, когда судно свою качкой приводит сосредоточенные прицельные линии орудий в совпадение с направлением поражаемого предмета в вертикальном наведении. Очевидно, что выстрел или залп может произойти только при одновременном заполнении этих трех перерывов...» [Л. 7].

Выстрел производился при помощи «электромагнитного замка». Один из первых вариантов этого устройства, примененный во время испытаний на фрегате «Севастополь» в 1865 г., показан на рис. 4. Вот как описал его подпоручик Жданов, участник первых испытаний системы Давыдова на фрегате «Севастополь» в 1865 г.

«Электромагнитный замок *a*, состоящий из небольшого электромагнита *b*, который во время замыкания тока, идущего от гальванической батареи по проволокам *m* и *n*, притягивает небольшую железную пластинку (якорь) *c*, освобождая рычаг *k*, с которого в точке *l* соскальвала взвешенная пружина *d*, а эта последняя выдергивала обыкновенной вытяжной трубки терку *f*, которая надевалась на идущий от пружины крючок *e*, отчего и производился выстрел» [Л. 9, лист 3].

После того как система стрельбы А. П. Давыдова была принята на вооружение и установлена на нескольких десятках кораблей Балтийского и Черноморского флотов, неутомимый изобретатель продолжал плодотворно работать над дальнейшим совершенствованием своей системы. Так, например, 28 января 1877 г. А. П. Давыдов предложил «для возможности в момент выстрела по движущейся цели совместить точность горизонтального наведения с вертикальным» ввести автоматический способ приданния углов возвышения орудиям (см. записку Комиссии адмирала Шанца, а также записку генералу Фельдцехмейстеру от 1881 г., в которой Давыдов предлагал «сделать приспособление к орудийным станкам для автоматического непрерывного придания орудиям всевоз-

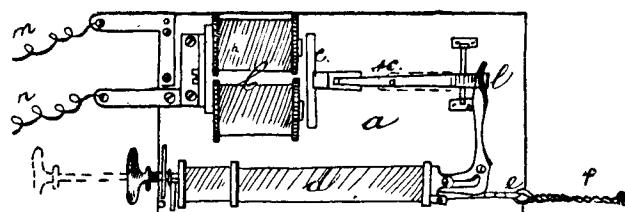


Рис. 4. Электромагнитный замок А. П. Давыдова.

можных углов возвышения согласно всевозможным передвижениям неприятеля). В ответ на записки А. П. Давыдова канцелярия Артиллерийского комитета «почтила его уведомлением о том, что суммы на осуществление предполагавшихся в записке приборов не могут быть отпущены артиллерийским ведомством».

А. П. Давыдов изготовил на свои средства эти приборы и показал в 1882 г. на специальной выставке в Морском музее действующую модель орудийного станка, снабженного изобретенной им следящей системой, автоматически изменяющей угол возвышения орудия в соответствии с перемещением движущейся цели. Когда же А. П. Давыдов, ссылаясь на удачный опыт, обратился еще раз в Артиллерийский комитет, то канцелярия комитета сообщила изобретателю, что «не признается полезным испытать его приборы» [Л. 10].

Далее А. П. Давыдов изобрел и ввел в автоматическую систему стрельбы для рейдовой обороны устройство, позволяющее давать необходимое упражнение в стрелков. Это по современной терминологии счищо решающее устройство значительно повышало качество системы, так как теперь «точное упражнение выстрелов зависело не от соображений человека, а от природы вещей, т. е. от времени полета снарядов и скорости хода неприятельского судна. Упражнение этого совершается автоматически и не требует никаких вычислений или других комбинаций со стороны управляющего прибором» [Л. 11].

Эффективность автоматической системы стрельбы превзошла все ожидания. В 1880 г. в Ревеле с батареи «Нетронь меня» было произведено сравнительное испытание прицельной стрельбы обычным способом и стрельбы при помощи системы А. П. Давыдова. Было установлено, что эта последняя требует для производства выстрелов в 6 раз меньше времени, чем стрельба обычным способом, и что автоматическая система дает 72% попаданий, тогда как стрельба обычным способом — всего лишь 19% попаданий [Л. 11].

Внедрение автоматической системы сосредоточенной стрельбы А. П. Давыдова сопровождалось рядом важных мероприятий на флоте, из которых прежде всего отметим создание в 1878 г. специального артиллерийского офицерского класса и школы для «нижних чинов» — класса гальванеров в Кронштадте. Это было первое в мире специальное учебное заведение, имевшее целью подготовку кадров по электроавтоматике. Официально на это учебное заведение возлагалась подготовка «личного состава, способного управляться приборами автоматической системы стрельбы в различных условиях».

Вторым важным мероприятием была организация в Кронштадте в 1878 г. специальной мастерской по ремонту, регулировке и монтажу электроавтоматических приборов. Эта мастерская вместе с мастерской А. П. Давыдова составила первую в истории производственную базу для серийного производства и монтажа электроавтоматических систем. Заведующим артиллерийским классом, в составе которого было 20 офицеров, был назначен Аполлон Семенович Кротков, морской офицер, выдающийся специалист морской артиллерии, член Морского технического комитета и «Заведующий гальванической (автоматической) стрельбой на флоте».

Первый курс «Аппараты автоматической стрельбы» читал окончивший Морскую и Михайловскую артиллерийские академии Николай Николаевич Азаров, впоследствии изобретатель автоматической самоустановливавшейся минометной системы.

Другие курсы читали крупные специалисты — артиллеристы С. О. Валицкий и др. Курс электричества вел известный русский физик Федор Фомич Петрушевский, ассистентом его был Александр Степанович Степанов, впоследствии изобретатель ряда приборов, применяемых в минном деле.

Для нас особый интерес представляет курс Н. Н. Азарова «Аппараты автоматической стрельбы», так как это был первый в мире систематический курс лекций, посвященный теории и практике электроавтоматических уст-

ройств. Курс этот был разбит на 2 части. Первая была посвящена теории устройства аппаратов, описанию, установке, а также способам поверки и испытания их. Во второй части курса рассматривались вопросы применения аппаратов на судах в соответствии с боевыми условиями.

Для практических работ в классе была построена под руководством А. Г. Кроткова качающаяся и вращающаяся башня. Ее устройство позволяло менять как время колебания, так и углы наклона и скорости вращения башни. В башне были установлены приборы автоматической стрельбы, при помощи которых стреляли по движущемуся щиту. Устройство щита было таково, что ведущий стрельбу мог менять по произволу скорость и направление движения щита.

Артиллерийский офицерский класс за первую четверть века своего существования (1878—1903) выпустил 365 квалифицированных офицеров артиллеристов, владевших теорией и техникой автоматической стрельбы из морских орудий. Это был первый отряд специалистов по электроавтоматике, получивших специальную подготовку. Среди окончивших эту школу было немало лиц, которые впоследствии сыграли заметную роль в отечественном приборостроении, как то: Н. Немцов, Н. Ильков, Н. Лушков, А. Куприянов и др.

Возвращаясь к судьбе выдающегося русского изобретателя А. П. Давыдова, приходится констатировать, что, несмотря на чрезвычайное значение его работ, он не получил полного признания и более того, в 90-х годах прошлого века подвергся преследованию со стороны группы влиятельных чиновников артиллерийского ведомства, поддерживающих конкурента А. П. Давыдова штабс-капитана де-Шартера.

Мы остановились на двух важных начальных этапах развития электроавтоматики, связанных в основном с именами К. И. Константина и А. П. Давыдова.

Изложенные факты свидетельствуют о том, что родиной электроавтоматики была Россия.

Литература

1. К. И. Константинов. Об усовершенствовании электробаллистического прибора. Артиллерийский журнал, стр. 48—63, № 5, 1846.
2. К. И. Константинов. О боевых ракетах. Лекции, читаемые автором в Михайловской артиллерийской академии в 1860 г. и изданные на французском языке в Париже в 1861 г. Перевод с французского Колюнов, СПБ, 1864, 316 стр. + альбом чертежей на 32 листах. Цит. стр. 184 и др.
3. К. И. Константинов. Новые приборы для уравнения вращательного движения, производимого ручными способами или механическим движением. Артиллерийский журнал, стр. 133—147, № 2, 1854. 3 листа чертежей. Цит. стр. 145, 146, 147.
4. Труды Первого всероссийского электротехнического съезда, СПБ, т. III, стр. 421, 1901.
5. А. В. Храмовой, К. И. Константинов — пионер электроавтоматики. Электричество, стр. 82—84, № 2, 1950.
6. Краткое изложение изобретенного Давыдовым способа воспламенения пороха, для ускорения по произволу процесса горения заряда и применение этого изобретения к подводной мине или торпеде. СПБ, стр. 82, 1869.
7. Голицын-Головкин. Приемы при автоматической стрельбе посредством приборов системы Давыдова. Морской сборник, стр. 145—158, № 9, 1878.
8. А. Кротков. Исторический очерк развития гальванической стрельбы в нашем флоте. Морской сборник, стр. 65—95, № 3, 1881.
9. «Об опытах применения электричества к действию из орудий на флоте». Центральный государственный архив Военно-морского флота. Фонд Морского технического комитета, дело № 19 за 1869 г.
10. Записки Русского технического общества, вып. 4, стр. 301—308, 1881.
11. Центральный государственный архив Военно-морского флота. Фонд 427, оп. 2, дело № 27.



Дискуссии

К статье В. Г. Холмского „Применение регулируемых трансформаторов различных типов в городских электрических сетях“

(Электричество, № 4, 1950)

Инж. Б. С. МЕШЕЛЬ

г. Киев

Возможность применения глухих вольтодобавочных трансформаторов обоснована в статье В. Г. Холмского уравнениями¹:

$$\delta U_{BH} \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_T - k(\Delta U_B + \Delta U_T + \Delta U_H), \quad (1)$$

$$\delta U_{BH} \leq \Delta U_{om}^B - \delta U_n'' - \delta U_T + \Delta U_B + \Delta U_T + \Delta U_H, \quad (2)$$

$$\Delta U_n \leq \delta U_n'' + \delta U_T + \delta U_{BH} - \Delta U_{om}^H - \Delta U_T. \quad (3)$$

Из этих уравнений можно усмотреть, что величина допустимой надбавки глухого вольтодобавочного трансформатора δU_{BH} и вообще возможность его применения определяется отношением минимальной нагрузки к максимальной k и возможными пределами регулирования напряжения при максимуме $\delta U_n''$ и при минимуме $\delta U_n'$, так как остальные величины, входящие в уравнения (1)–(3), регламентированы.

Естественно, что выбор значений k , $\delta U_n''$, $\delta U_n'$ при решении столь существенного вопроса должен быть обоснован данными обследования режимов действующих сетей. По поручению Главэнерго МКХ УССР, автор, которому принадлежит инициатива применения вольтодобавочных нерегулируемых и регулируемых устройств в сетях сельского и коммунального хозяйства, руководил обследованием городских, сельских и поселковых сетей, поставленных с целью выяснения возможности и целесообразности применения этих устройств².

Обследования привели к результатам, изложенным ниже.

Для линий, питающих преимущественно нагрузку жилых домов районов малоэтажной застройки, в которых применение глухих вольтодобавочных трансформаторов экономически целесообразно, значение k ночного минимума в большинстве случаев практически равно нулю. Если положить в (1) $k=0$, получим значения δU_{BH} и ΔU_n , приведенные в знаменателях таблицы. В числителях даны эти значения, полученные Холмским для $k=0,25$.

Сопоставление этих величин показывает, что применение вольтодобавочных трансформаторов даже при наличии встречного регулирования практически исключается для всех случаев, кроме как для участков, близко расположенных к источнику питания, в которых положение ответвлений трансформаторов установлено на минус 5% ($\delta U_T = 0$).

В процентах		Без вольтодобавочных трансформаторов		С вольтодобавочными трансформаторами			
		в процентах		в процентах			
$\delta U_n'$	$\delta U_n''$	δU_T	ΔU_n	δU_T	δU_{BH}	ΔU_n	$\delta U_{BH}'$
0	0	5	8	5	2,5 1,0	10,5 9,0	—
0	+5	0	8	0	7,5 5,0	15,0 14,0	+3,0
0	+5	5	13	5	5,0 1,0	18,0 14,0	-1,0
0	+10	0	13	0	10,0 6,0	23,0 19,0	-1,0

¹ Нумерация формул наша.

² В обследовании и обработке материалов участвовали Бондаренко, Крачак, Ламм, Лернер и Черняховский.

Однако, кроме ночного минимума бытовой нагрузки, имеется дневной минимум, наблюдаемый в осенне-зимний период, для которого по данным обследования коэффициент k может быть принят (в среднем) около 0,2 в. Этот минимум совпадает с максимумом силовой нагрузки предприятий, водопровода и электротранспорта. В итоге получается нагрузка, близкая, а в некоторых случаях равная максимальной, при которой, по условиям встречного регулирования, надбавка напряжения источника питания должна быть принята для дневного минимума $\delta U_n' = +5$. При подстановке $k=0,2$ в (2) получаем значения надбавок вольтодобавочного трансформатора $\delta U_{BH}'$, обусловленные дневным минимумом.

Полученные отрицательные значения $\delta U_{BH}'$ показывают, что надбавки основных трансформаторов, ответственные которых установлены в нулевом положении ($\delta U_T = -+5\%$), уже приводят к недопустимому повышению напряжения. Глухие вольтодобавочные трансформаторы при этом окажутся не только лишними, но и вредными.

Таким образом, следуя полностью методике т. Холмского, но учитывая реальные режимы, получаем результаты прямо противоположные, опровергающие возможность применения глухих вольтодобавочных трансформаторов.

Рассмотренный случай позволяет сделать тот вывод, что сама методика анализа режимов городской сети, предложенная т. Холмским, основана на том неверном допущении, что суммарная нагрузка города изменяется одновременно с нагрузкой бытовой низковольтной сети. Это привело к неправильному выводу, что режим напряжения источника питания можно подчинить графику бытовой нагрузки. Это было справедливо тогда, когда нагрузки сетей в основном определялись освещением. В настоящее время график бытовой нагрузки, как правило, лишь частично совпадает с графиком суммарной нагрузки. Приведенный выше случай совпадения дневного бытового минимума с суммарным максимумом можно считать повсеместным.

В ряде случаев, при наличии трехсменных предприятий, возможно совпадение ночного бытового минимума со значительной силовой нагрузкой. Это приводит к необходимости поддерживать напряжение источника питания $\delta U_n' > 0$, что служит дополнительным аргументом против применения глухих вольтодобавочных трансформаторов.

Исключив перечисленные, отнюдь не случайные, а основные факторы, Холмский свел многообразные режимы городской сети к одному, надуманному, примитивному режиму, не отражающему действительность.

Несмотря на массовые обследования по перечисленным причинам удалось выбрать всего лишь только один район, в котором можно было временно установить вольтодобавочные трансформаторы без ущерба для потребителей. Установка их оказалась возможной только потому, что в этом районе потребители вследствие трудностей начала послевоенного периода в районах временной оккупации использовали ночью электроэнергию для отопления жилищ.

Опыт работы убедил меня, автора предложения, товарищ, работающих со мной, эксплоатационный персонал сетей и Главэнерго, что глухие вольтодобавочные трансформаторы могут найти применение в исключительно редких случаях — при временном, благоприятном сочетании ряда случайных обстоятельств.

Представляется рациональным внедрение автоматически управляемого вольтодобавочного трансформатора, который в настоящее время находится в стадии промышленного освоения.

Повторение попыток опытного и тем более промышленного внедрения глухих вольтодобавочных трансформаторов явно нецелесообразно. Так же нецелесообразна пропаганда этих устройств.



Заметки и письма

О РАБОТАХ КРОНА ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТЕНЗОРНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ К ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

В тридцатых годах в американской печати появился ряд статей и книг Г. Крона, содержавших попытку приложения тензорного исчисления к прикладной электротехнике. На лиц, недостаточно знакомых с тензорным аппаратом математики и вместе с тем предрасположенных к низкопоклонству перед американскими сенсациями, статьи Крона произвели незаслуженное впечатление. Не были свободны от этого и некоторые отдельные ученые в СССР. Между тем, эти «научные работы» Крона представляют, по существу, рекламу фирмы, «шефом» и, вероятно, акционером которой является Крон.

Нетрудно показать, что формулы тензорного исчисления в концепции, принятой Кроном, состоят, в основном, из нулей (!), некоторым из которых он радиющей торжественности присваивает имя Кристоффеля.

Прежде всего следует отметить, что тензорное исчисление, получившее широкое применение в физике, относится, подобно векторному исчислению, к категории не вычислительных, а преобразующих аппаратов математики. Оно при умелом использовании, способно привести к ценным обобщениям формулировок законов физики и положений техники. Тензорное исчисление позволяет геометризировать физические процессы и явления путем условного представления физических величин, не имеющих прямой геометрической интерпретации, некоторыми геометрическими образами, что иногда помогает математической обработке физических явлений. Тензорное исчисление, подобно векторному, сокращает аналитическое выражение, т. е. условную математическую запись физических процессов и явлений. Вместе с тем тензорное исчисление выгодно отличается от векторного в том отношении, что между окончательной формулой векторного исчисления и разрешающими уравнениями лежит еще операция проектирования векторного уравнения на координатные оси, чего нет в тензорном исчислении: здесь уравнения записываются непосредственно в составляющих физических величин по выбранным координатным осям, которые (составляющие) собственно только и имеют конкретное физическое содержание. Координаты, принимаемые в тензорном исчислении, не являются координатами в том смысле, в каком это понятие применяется в геометрии: это, обыкновенно, непосредственно те физические величины, которые способны «координировать», т. е. определять свойство или состояние объектов, участвующих в изучаемом физическом процессе или явлении. Такова система, ставшая, можно сказать, классической в тензорном исчислении.

Эта система принята и Кроном, но результат применения Кроном этой системы в своих работах, как сейчас будет показано, приводит буквально к насыщению предложенных им формул нулями, однако настолько завуалированными, что при поверхностном рассмотрении они не заметны.

В самом деле, рассмотрим концепцию Крона. Общеизвестно, что при выборе прямолинейной и прямоугольной системы координат квадрат расстояния точки с «текущими» координатами x, y, z от начала координат определяется формулой:

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2. \quad (1)$$

Если оставить оси прямолинейными, но не прямоугольными, и установить различные масштабы по осям X, Y, Z , то формула (1) примет более сложный вид:

$$l^2 = g_{xx}x^2 + g_{yy}y^2 + g_{zz}z^2 + g_{xy}xy + g_{yz}yz + g_{zx}zx, \quad (2)$$

где g_{ks} — коэффициенты, значения которых зависят от выбора масштабов и углов между осями. Установление численных значений коэффициентов g_{ks} вносит, как говорят, «метрику» в изучаемое пространство с принятymi координатами, т. е. дает возможность не только качественно, но и количественно оценивать соотношения между различными геометрическими объектами, условно изображающими те или иные физические величины. Если значения коэффициентов g_{ks} не зависят от координат, то пространство называется не имеющим кривизны, если же g_{ks} зависят от координат x, y, z , то пространство называется искривленным.

Переходя к рассмотрению индуктивно-связанных систем, естественно электромагнитное состояние такой системы характеризовать электромагнитной энергией W , которой обладает эта система в рассматриваемое мгновение времени:

$$2W = \sum_{k,s=1}^{k,s=n} L_{ks} i^k i^s, \quad (3)$$

где i^k, i^s — токи в цепях, которым присвоены индексы k и s , а L_{ks} — соответствующие коэффициенты индукции.

Если сопоставить формулы (2) и (3), то легко усмотреть, что электромагнитное состояние системы можно изображать в некотором воображаемом пространстве точкой, квадрат расстояния которой от начала координат равен удвоенной энергии магнитного поля:

$$l^2 = 2W.$$

При этом токи i^k естественно принять за текущие координаты, а коэффициенты индукции L_{ks} — отождествить с коэффициентами g_{ks} формулы (2), носящими название компонент метрического тензора.

Далее, можно ввести в рассмотрение вектор с компонентами, определяемыми формулой

$$\Psi_k = \sum_{s=1}^{s=n} L_{ks} i^s. \quad (4)$$

Физически — это полные суммы потокосцеплений отдельных элементов индуктивно связанный системы.

Наконец, для практических расчетов возникает потребность во введении в рассмотрение некоторого воображаемого вектора э. д. с. e , состоящие которого по координатным осям являются полными э. д. с. индукции отдельных элементов системы:

$$-e_k = \frac{d\Psi_k}{dt}. \quad (5)$$

Не имея возможности здесь излагать начала тензорного исчисления, привожу без доказательства формулу тензорного дифференцирования в развернутом виде; имея в виду формулу (4), уравнение (5) представляется следующим образом:

$$-e_k = \sum_s L_{ks} \frac{di^s}{dt} + \sum_s i^s \frac{dL_{ks}}{dt} - \sum_{s,m} \Gamma_{sk}^m \Psi_m \frac{di_s}{dt}, \quad (6)$$

где Γ_{ks}^m — так называемые символы Кристофеля 2-го рода, которые вычисляются из соотношения:

$$\sum_m L_{hs} \Gamma_{ks}^m = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial L_{kh}}{\partial i^s} + \frac{\partial L_{sh}}{\partial i^k} - \frac{\partial L_{ks}}{\partial i^h} \right). \quad (7)$$

Из этой формулы следует, что если рассматриваемая индуктивно-связанная система линейна, т. е. коэффициенты индуктивности L_{ks} не зависят от токов i^m , то символы Γ_{ks}^m все тождественно равны нулю. Крон в своих работах рассматривает линейные системы (изменение степени насыщения стали не учитывается), а следовательно, все символы Γ в формулах Крона — тождественные нули! Заметим, что при наличии n связанных элементов в формуле (6) первые две суммы дают вместе $2n$ членов, тогда как последняя двойная сумма дает n^2 слагаемых, поэтому в начале этой статьи было указано, что формулы Крона состоят в основном из нулей.

Первая сумма уравнения (6) дает общую э. д. с. трансформаторного характера, вторая сумма — общую параметрическую э. д. с., а последняя, двойная, сумма дает э. д. с., обусловленную нелинейностью системы. Ей-то Крон и присваивает название «э. д. с. Кристофеля».

Как известно, первым математиком, изучавшим свойства пространств, обладающих кривизной, был выдающийся русский математик Лобачевский. Последняя двойная сумма формулы (6) отлична от нуля только для нелинейных систем, в которых компоненты метрического тензора L_{ks} зависят от координат i^m , т. е. систем, которые геометрически отображаются в пространствах, обладающих кривизной. Поэтому несомненно следует последнюю двойную сумму формулы (6), если бы только она у Крона не была тождественным нулем, назвать электродвижущей силой Лобачевского. Однако, имея в виду, что эта сумма представляет тождественный нуль, нет необходимости открывать на этот счет дискуссию.

В работах Крона нигде не вычислено ни одного символа Γ . Введение Кроном в свои формулы символов Кристофеля может быть объяснено только желанием придать этим формулам искусственную солидность с целью вызвать некритичное преклонение перед дутыми нозинками американской «науки».

Автору настоящего письма удалось разработать методику применения тензорного исчисления и к линейным системам с переменными параметрами.

Тензорное исчисление является аппаратом, немногим более сложным, чем векторное исчисление, но более эффективным, и советским инженерам можно рекомендовать овладение этим методом, способным облегчить их повседневную расчетную работу.

В ЛЭТИ им. Ульянова (Ленина), кроме докторской диссертации автора, посвященной, главным образом, разработке методики применения тензорного исчисления к линейным системам, А. В. Башариным была написана цепная по результатам кандидатская диссертация, посвященная вопросам устойчивости работы системы электромашины, причем исследование было проведено методом тензорного исчисления, разработанного автором.

Тензоры представляют собою достаточно широкие понятия, могущие, подобно группам, иметь ряд представлений, одним из которых является представление тензора матрицей. Этим обстоятельством воспользовался Крон, так что его метод, по существу, является применением не тензорного, а именно матричного исчисления к электротехнике, которое было известно задолго до Крона. Следует отметить, что Крон пользуется только матричной алгеброй, но не анализом, восходящим к фундаментальным работам русского математика Лаппо-Данилевского, успешно продолженным в наше время профессором Ергиним в область приведения линейных уравнений с переменными коэффициентами к линейным уравнениям с постоянными коэффициентами. Крон, обращаясь к тензорам третьего ранга, но не оперируя с ними практически, рекомендует представлять их «объемными матрицами», умножение и деление которых практически невозможно. У Крона встречаются в формулах и тензоры четвертого ранга: тензор кривизны, который, конечно, также является тождественным нулем, ввиду равенства нулю всех символов Кристофеля и их производных.

Как уже указывалось выше, работы Крона отнюдь не представляют применения тензорного исчисления к электротехнике. Здесь уместно отметить одно любопытное обстоятельство. Д. Л. Синдже, специалист в области тензорного исчисления (известный советскому читателю по небольшой книге, переведенной на русский язык в 1947 г. «Тензорные методы в динамике»), буквально следующим образом отзыается о работах Крона: «Крон опубликовал в последнее время статьи и книги о приложениях тензорного исчисления к электротехнике, но так как я до сих пор не был в состоянии понять его точку зрения, я принужден оставить эти работы без комментариев».

Так один «джентльмен» отзыается деликатно о работах другого «джентльмена». Если же немножко поступиться деликатностью, то можно сказать, что «тензорное» исчисление Крона — это матричная алгебра, а все эти «символы Кристофеля», «тензор кривизны», «тензор поля» и т. д. — не больше, чем трескучие слова, призванные замаскировать скрывающиеся за ними нули.

Доктор техн. наук, проф.
А. В. БЕРЕНДЕЕВ

ОТ РЕДАКЦИИ

Критическое рассмотрение концепций Г. Крона по применению тензорного исчисления к электротехнике давно назрело. Помещая выступление А. В. Берендеева, редакция считает правильным содержащееся в письме указание на порочность методологической стороны концепции Крона.

Тензорное исчисление представляет полезный математический аппарат и правильное пользование им при сложных и громоздких электротехнических расчетах дает в ряде случаев безусловный эффект. Редакция приглашает читателей, в частности, научных работников и инженеров-электротехников, практически применяющих тензорный метод, прислать свои отклики на письмо А. В. Берендеева.



К ВОПРОСУ О ПАРАМЕТРАХ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является самым распространенным видом электрической машины, поэтому правильное толкование параметров такого ротора крайне важно для четкого понимания происходящих в нем явлений при разных режимах работы. Это толкование должно базироваться на физически верной интерпретации определения числа фаз ротора.

Как известно, для числа фаз короткозамкнутого ротора имеются формулы:

Арнольда:

$$m_2 = \frac{N_2}{p}, \quad (1)$$

Рихтера:

$$m_2 = N_2, \quad (2)$$

где N_2 — число пазов ротора, p — число пар полюсов.

Первая формула может давать и дробные значения, если N_2 не кратно p . Однако представить себе физически дробное число фаз невозможно. К сожалению, эта формула приведена в учебнике Л. М. Пиотровского, изд. 1949 г. (стр. 399).

Что касается эффективного числа витков в фазе ротора, то все авторы указывают его правильно

$$W_2 = \frac{1}{2},$$

но это не самоочевидно.

В приведенных конечных формулах у вышеуказанных авторов для расчета параметров короткозамкнутого ротора имеются две компенсирующие друг друга ошибки. Между

тем, правильное определение числа фаз может быть произведено элементарно просто на базе звезды пазовых э. д. с. для короткозамкнутой роторной обмотки так же, как и обоснование числа витков в фазе из расчета параметров короткозамкнутого ротора¹.

Число фаз короткозамкнутого ротора равно $m_2 = \frac{N_2}{t}$ (3),

где t — общий делитель между N_2 и p .

В частных случаях,

$$\text{если } t = p, \text{ то } m_2 = \frac{N_2}{p}. \quad (1)$$

$$\text{если же } t = 1, \text{ то } m_2 = N_2. \quad (2)$$

Эта же формула (3) пригодна и для определения числа фаз в якоре машины постоянного тока с целью определения возможного числа уравнительных соединений и их шага.

Число эффективных витков в фазе короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя

$$W_2 = \frac{N_2}{2mt},$$

а так как t дает число параллельных цепей в роторе, то

$$W_2 = \frac{1}{2}.$$

Проф. А. БЕРГЕР

¹ А. Я. Бергер. Известия ВЭТА, т. 22, стр. 99, 1940.



О НЕДОСТАТКАХ СТАТИСТИКИ ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМА

Подлинная научная работа в области охраны труда в России началась только после Великой Октябрьской социалистической революции. Это в полной мере относится также и к борьбе с электротравматизмом. Советским государством тратятся значительные средства на охрану труда рабочих и внедрение техники безопасности. Успех работы научных учреждений, медицинских и электротехнических, в этой области сильно тормозится, в частности, недостатками в постановке статистической работы. От статистики электротравматизма существенно зависит успешность разработки профилактических мер и в то же время выявление условий, которые сопровождают случаи поражения человека электрическим током. Ценность материалов, основанных на изучении статистики электротравм, очень велика и не может быть сравнима с косвенными методами (моделирование несчастных случаев), а также с экспериментами над животными.

Статистика электротравматизма была охарактеризована проф. Н. А. Вигдорчиком [Л. 1, стр. 56] следующим образом: «Поскольку отдельные сообщения по большей части основаны на малом числе наблюдений, они неизбежно приводят в отдельных случаях к противоречиям, и поскольку они составлены по разным планам, их далеко не по всем пунктам можно между собой сопоставлять». Н. А. Вигдорчик в своем труде уделил серьезное внимание критическому анализу использованного им статистического материала и можно не сомневаться в том, что им были отобраны материалы наиболее доброкачественные. Тем не менее, они далеко не удовлетворяют научным требованиям.

Чтобы сделать наглядным вопрос о неблагополучии в области статистики электротравматизма, приведем ниже некоторые критические замечания об отдельных таблицах, помещенных в упомянутой книге.

На стр. 61 в таблице распределения электротравм по родам промышленности отсутствуют основные данные: не-

известно, сколько предприятий каждой отрасли промышленности обслуживалось данным медицинским учреждением, каково было общее число производственных рабочих и число рабочих, обслуживающих электрические установки этих предприятий, как распределяются электротравмы между указанными категориями, включает ли таблица все несчастные случаи, и если только часть их, то какую именно, и т. д.

Из таблицы видно, что преобладающее число несчастных случаев было зарегистрировано на металлургических предприятиях, но остается неизвестным, каковы причины этого явления: то ли оно объясняется большей подверженностью электротравм рабочих на металлообрабатывающих предприятиях, то ли тем, что данное медицинское учреждение обслуживало главным образом предприятия металлургии и машиностроения.

Из таблицы на стр. 65 следует, что рабочие-электрики с большим стажем подвержены электротравматизму в большей мере, чем рабочие с малым стажем. Обстоятельство это парадоксально. Автор книги объясняет это тем, что «к опасным работам допускаются только опытные стажированные рабочие». Однако вслед за этим он выражает сомнение в правильности допускаемого им объяснения. Он говорит: «но так как опытностью опасность именно и компенсируется, то нет оснований ожидать сколько-нибудь значительного увеличения электротравм с повышением стажа». Таким образом, задача осталась неразрешенной. Между тем, правильное решение, несомненно, заключается в том, что помимо степени опасности данной работы и квалификации рабочего, выполняющего ее, играют большую роль также другие факторы. Можно, например, предполагать, что высокие показатели электротравматизма среди лиц с большим стажем нашли бы объяснение в свойственной многим квалифицированным рабочим уверенности в своих знаниях и в пренебрежении Правилами

безопасности для работ, производимых без отключения напряжения.

Работу по статистике электротравматизма необходимо правильно распределять между врачами и инженерами. Разумеется, врачи могут, а нередко и должны принимать участие в вопросах, относящихся к эксплуатации электрических установок, а инженеры — принимать участие в вопросах оценки и исследования физиологического действия электрического тока на человеческий организм, но руководство работой в целом и особенно формулировка выводов должны производиться научным работником, специальность которого ближе к природе изучаемого вопроса. В настоящее время в работах по электротравматизму это элементарное правило нередко нарушается и, из-за отсутствия надлежащего контакта между врачами и инженерами, изучение электротравматизма сильно страдает.

Нередко авторы статистических работ производят анализ на основе цифр, заведомо недостаточно достоверных, о чем обычно свидетельствует большой разброс цифр, полученных разными авторами. В результате ряд работ, на которые были затрачены большие средства, оказывается обесцененным.

Недостатки статистики электротравматизма были иллюстрированы примерами, взятыми из одного труда [Л. 1], однако ознакомление с позднейшими работами показывает, что за прошедшие со времени выхода цитированной книги годы положение в постановке статработы в области электротравматизма мало изменилось.

Новые статистические работы должны быть увязаны с работами предшествующими. Противоречия между новыми и старыми работами должны быть проанализированы и, по возможности, объяснены. При ссылках на работы следует указывать не только фамилию автора работы, но и наименование научно-исследовательского института, в котором та или иная статистическая работа выполнена, что

поднимает ответственность институтов за выполненные работы.

Научная работа в области электротравматизма не исчерпывается, конечно, вопросами ведения статистики.

Большого внимания заслуживает и анализ статистических данных. Такой анализ данных электротравматизма должен выполняться постоянно одним из научно-исследовательских институтов, специально для этой цели выделенном. До сих пор это важное мероприятие не выполняется.

На научную основу следует поставить ведущиеся работы по конструированию защитных средств от поражения электрическим током.

Изучение воздействия электрического тока на человеческий организм путем обследований несчастных случаев, особо подходящих для этой цели, также должно быть предметом деятельности названного научно-исследовательского института.

Необходимо, чтобы органы Охраны труда ВЦСПС и министерств проявили инициативу в разработке целеустремленной и единой системы статистики электротравматизма. Научно-исследовательская работа в области электротравматизма должна планироваться и координироваться из единого центра. Результаты работ должны ежегодно печататься в виде сборников, журнальных статей, рефератов и т. п. С наблюдаемым в этой области бездействием должно быть покончено как можно скорее.

Литература

1. Н. А. Вигдорчик. Электропатология. Институт труда и профзаболеваний. Ленинград, стр. 57, 1940.

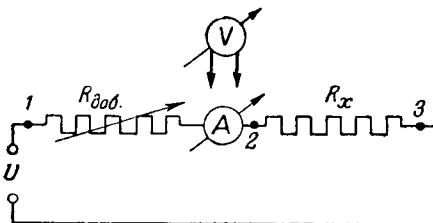
*Кандидат техн. наук Л. П. ПОДОЛЬСКИЙ
МПКУ треста „Центрэлектромонтаж“*



ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА И АМПЕРМЕТРА

Принятым в практике методам измерения сопротивлений вольтметром и амперметром присущи погрешности, которые могут быть учтены лишь при известном сопротивлении приборов. Предлагаемый метод свободен от погрешностей такого рода и заключается в следующем.

Собирается цепь, согласно рисунку. Для нахождения неизвестного сопротивления R_x производятся два измерения.



1. Измерение тока I по амперметру при включении вольтметра на точки 1 и 2 (при этом величина напряжения нас не интересует).

2. Измерение напряжения U на точках 2 и 3 (величина тока нас не интересует).

Действительное значение сопротивления

$$R_x = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Этот метод измерений является развитием задачи, помещенной в книге „Задачник по теоретическим основам электротехники“ под ред. К. А. Круга, В. Ю. Ломо-

носова, М. А. Перекалина, К. М. Поливанова, Госэнергопиздат, стр. 20, задачи № 2, 7, 1948.

Ток через R_x при включении вольтметра на точки 2 и 3 в точности равен току на участке 1—2 при включении на точки 1 и 2 того же вольтметра независимо от его сопротивления. Действительно, ток на участке 1—2 при включении вольтметра на точки 1 и 2:

$$I = \frac{U_1 R_v}{R_1 R_x + R_v (R_1 + R_x)}, \quad (2)$$

где R_1 — сумма добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ и сопротивления амперметра;
 R_v — сопротивление вольтметра.

При включении же вольтметра на точки 2 и 3 ток на участке 2—3, проходящий по сопротивлению R_x , будет точно таким же, как в формуле (2). Меняются местами R_1 и R_x , что не приводит к изменению тока I . Это правильно при условии постоянства напряжения на входе цепи, т. е. при весьма малом внутреннем сопротивлении источника, сравнительно с R_x . Для уменьшения погрешности измерения, связанной с наличием сопротивления в источнике тока, необходимо величину сопротивления участка 1—2 брать того же порядка, что и R_x . При их равенстве не будет погрешности даже при существенном внутреннем сопротивлении источника. Таким образом, в предлагаемом методе избегается погрешность, связанная с сопротивлением приборов.

Инж. В. И. ГОРДОН и инж. И. Ю. КЛУГМАН



По страницам технических журналов

РАЗМЕЩЕНИЕ ГРУППОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВЕ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Групповая расстановка электродов при электроизогреве железобетонных и бетонных конструкций имеет ряд технологических преимуществ в сравнении с ранее применявшимися одиночными электродами. Для правильного выбора расстояний между электродами применены формулы, указанные в журнале «Электричество», № 8, 1948 г. и № 6, 1949 г., и получены удобные для практики номограммы и таблицы. Расчет расстояний между электродами по этим номограммам и таблицам обеспечивает необходимое по расчету выделение тепла в бетоне при допустимых температурных перепадах.

Групповой метод расстановки электродов успешно применялся при электроизогреве конструкций высотных зданий в г. Москве.

(Строительная промышленность, № 9, 1950, Р. В. Вегенер.)

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЗИМНИХ РАБОТ НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ г. МОСКВЫ

Производство железобетонных работ в зимних условиях строительства высотных зданий потребовало применения в числе других методов электроизогрева. Электроизогрев осуществлялся различными способами: так, колонны и ригели прогревались внутренними пластинчатыми и стержневыми электродами, плиты — панелями с укрепленными на них нагревательными элементами и отражательными печами. Применение электроизогрева оправдало себя при наружных температурах -10°C и ниже. По применявшимся системам устройства нагревательного оборудования плохо показали себя отражательные печи: их блестящая поверхность быстро ржавела и теряла отражательную способность, ребра при установке погружались в свежий бетон и там затвердевали, а при снятии печей это вело к их повреждению. Требующаяся по инструкции засыпка боковых стенок для предупреждения продувания очень трудоемка; крупным недостатком их работы является значительное засушивание поверхности бетона.

(Строительная промышленность, № 9, 1950, И. И. Богатырев.)

ЗА РУБЕЖОМ

ПОТЕРИ В ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Известно, что магнитная проницаемость и активные потери листовых ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях зависят от частоты.

Вихревые токи вызывают изменение магнитных свойств с частотой и во всех случаях обнаруживается превышение наблюденных изменений над изменениями, исчисленными по так называемой «классической теории» вихревых токов, развитой на основе классической электродинамики, в предположении о постоянстве магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления.

В статье дается методика и результаты изучения «дополнительных потерь» (extra losses), представляющих собой разность между измеренными и исчисленными по классиче-

ской теории потерями на вихревые токи. Опыты проводились на высококачественной трансформаторной стали, на полосовых образцах шириной 1 см и длиной 15 см. С целью изучения влияния толщины материала прокатывался на разные толщины, а затем образцы отжигались в вакууме при 1250°C , исследовалось влияние частоты, максимальной индукции и температуры на величину добавочных потерь.

Полученные результаты. Влияние частоты на потери при максимальной индукции 10 кгс показано на рис. 1. Гистерезисные потери определялись баллистическим методом, полные потери — на ваттметровой установке. Как видно из рис. 1, добавочные потери при малых частотах растут быстро, а затем их рост замедляется. Полученные данные показывают, что применяемый обычно метод разделения потерь путем измерения их при двух различных частотах и последующей экстраполяции на нулевую частоту может дать значительно завышенные гистерезисные потери.

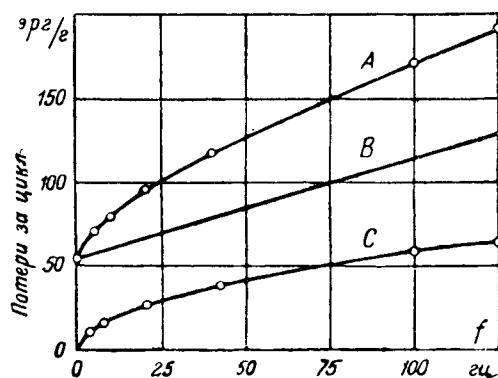


Рис. 1. Влияние частоты на потери в высококачественной листовой стали. ($B_{\max} = 10000 \text{ Гц}$).

A — полные потери, B — потери на гистерезис плюс исчисленные потери на вихревые токи, C — добавочные потери, равные разности A — B.

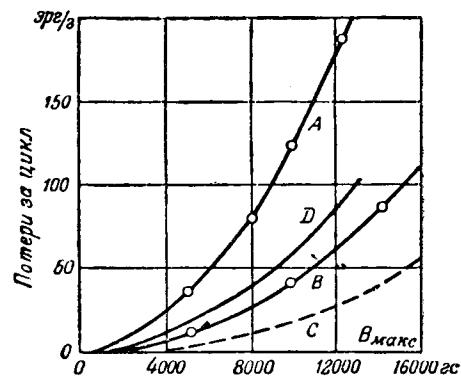


Рис. 2. Зависимость потерь в высококачественной листовой стали от максимальной индукции (частота 40 Гц).

A — полные потери, B — потери на гистерезис, C — исчисленные потери на вихревые токи, D — добавочные потери, равные A — (B + C).

Влияние максимальной индукции на потери при частоте 40 гц показано на рис. 2. В диапазоне от 5 до 12 кгс добавочные потери растут пропорционально индукции в степени 1,8. Влияние толщины иллюстрируется нижеследующей таблицей.

Как видно, толщина практически не влияет на величину добавочных потерь.

Для изучения влияния температуры были сделаны измерения гистерезисных и полных потерь при комнатной температуре и при 40° и 80°. В пределах точности опыта ($\pm 10\%$) потери не меняются.

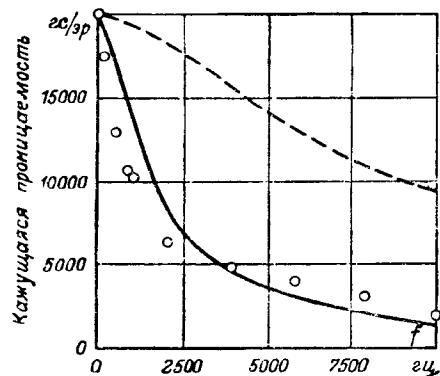


Рис. 3. Зависимость кажущейся проницаемости высококачественной листовой стали от частоты ($B_{\max} = 7700$ гс)

Пунктирная линия — проницаемость, вычисленная с учетом вихревых токов по классической теории.

Сплошная линия — вычисленная по формуле

$$\mu = \frac{\mu_0}{V_1 + (\omega\tau)^2} \quad \text{при } \tau = 1,7 \times 10^{-4} \text{ сек.}$$

Кружками отмечены наблюденные точки.

Влияние толщины на потери в листовой трансформаторной стали, отожженной в вакууме при 1250°

Частота 40 гц индукции 10 кгс

1 Толщина, мм	2 Полные	3 Гистерезисные	4 На вихревые токи (по рас- чету)	5 Добавочные потери (2) - [(3) + (4)]
0,31	106	54	20	32
0,23	94	54	10	30
0,17	92	46	5	41
0,12	93	58	2	33

Кроме того, изучалось влияние частоты на кажущуюся проницаемость при индукции 7700 гс. Результаты, полученные с применением катодного осциллографа, показывают, что падение проницаемости с частотой значительно больше, чем это следует по расчету экранирующего действия вихревых токов (рис. 3). Путем визуальных наблюдений было также найдено, что постоянная времени, характеризующая временное отставание индукции от поля, имеет величину порядка 2×10^{-4} сек.

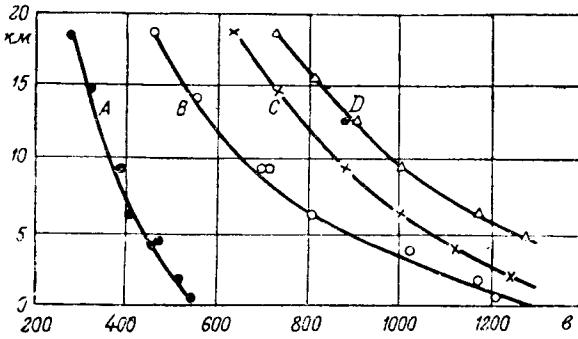
В качестве возможной причины, вызывающей добавочные потери, приводится медленность смещения границ между доменами, однако не ясно, вызывается ли это микроскопическими вихревыми токами, или какой-либо иной формой «трения».

(У. И. Е., Е. т. 97, ч. II, № 56, 1950. К. Н. Stewart.)
Кандидат техн. наук Л. Ш. КАЗАРНОВСКИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Для обеспечения необходимого срока службы самолетных электродвигателей толщину изоляции токоведущих частей следует выбирать таким образом, чтобы напряжение ионизации на максимальной высоте было на 40% выше номинального.

Произведенные испытания показали, что напряжение ионизации не зависит от частоты, и для таких материалов, как бумага, хлопчатобумажные ткани, шелк и пластмас-



Зависимость начала ионизации от высоты. Толщина изоляции в мм: A — 0,063; B — 0,19, C — 0,28, D — 0,36.

са, — приблизительно одинаково. На рисунке приведены кривые изменения напряжения ионизации в зависимости от высоты на основании испытаний 50 различных двигателей.

(El. Engineering, № 3, 1950. R. D. Jones, E. M. Stanberry)

Инж. А. Б. ТИМОФЕЕВ



Хроника

Академик А. Ф. Иоффе

*К 70-летию со дня рождения и 45-летию научной
и педагогической деятельности*

Абрам Федорович Иоффе родился 29 октября 1880 г. в г. Ромны Черниговской области. После окончания Петербургского технологического института (в 1902 г.) и Мюнхенского университета (в 1905 г.) он посвятил себя научной деятельности, уделив почти с самого начала особое внимание физике твердого тела и его электрическим свойствам. А. Ф. Иоффе впервые обнаружил внутренний фотоэффект в гетерополярных кристаллах. К числу лучших работ А. Ф. Иоффе относится также выяснение основных вопросов электропроводности кристаллов. В результате весьма тонких экспериментов Абрам Федорович вскрыл природу явлений, обусловливающих степень прочности кристаллов, и объяснил механизм пластической деформации. Это не только способствовало развитию физической науки, но имело также важное техническое значение и применение.

Еще в 1913 г. А. Ф. Иоффе выступил в печати с описанием блестящие проведенных им экспериментальных исследований элементарного фотоэлектрического эффекта, подтвердивших атомную природу света и электричества. Характеризуя в 1940 г. научные достижения А. Ф. Иоффе, академик И. В. Курчатов подчеркивал классическое значение этой работы А. Ф. Иоффе, восходившей по существу к одному из важнейших и основных положений современной атомной физики.

Талантливый коллектив руководимого академиком А. Ф. Иоффе Физико-технического института Академии наук СССР в сильной степени способствовал быстрому развитию в Советском Союзе теоретических работ в области ядерной физики. Выдающиеся научные труды А. Ф. Иоффе создали ему и возглавляемой им школе физиков высокий авторитет в научном мире нашей страны и также далеко за ее пределами.

Особая заслуга А. Ф. Иоффе состоит в упорном и плодотворном стремлении — постоянно объединять теорию и практику, добиваться внедрения результатов научной работы в технику, активно содействовать производственному освоению ряда важных открытий и предложений, многие из которых имели крупное значение для усиления обороноспособности нашей Родины.

С первых дней установления советской власти Абрам Федорович Иоффе направил все свои силы по пути со-действия и помощи решению грандиозных индустриальных задач, поставленных на очередь победой социалистической революции в нашей стране. Преданность советскому государству и глубокий патриотизм А. Ф. Иоффе с особой убедительностью были проявлены в годы Великой Отечественной войны Советского Союза с гит-



леровскими захватчиками. В апреле 1942 г. А. Ф. Иоффе была присуждена Сталинская премия первой степени за исследования в области полупроводников, итоги которых опубликованы в работе «Полупроводники в физике и технике» в конце 1940 г.

Большое внимание А. Ф. Иоффе всегда уделял задаче создания новых кадров физиков. При его ближайшем участии создавались физико-технические институты в Ленинграде, Харькове, Свердловске, Днепропетровске, Томске и в других городах СССР.

Уже в первые годы после Великой Октябрьской социалистической революции А. Ф. Иоффе активно участвовал в научно-общественной работе, будучи одним из инициаторов и организаторов первых физических съездов и конференций.

Избрание Абрама Федоровича Иоффе действительным членом Академии наук Союза ССР состоялось 8 мая 1920 г.

В числе учеников Абрама Федоровича мы видим выдающихся ученых физиков Советского Союза — академиков Н. Н. Семенова, И. В. Курчатова, А. И. Алиханова, Д. В. Скobel'цына, П. И. Лукинского и др.

На протяжении многих лет А. Ф. Иоффе принимает участие, в качестве автора, в деятельности журнала «Электричество».

Правительство высоко оценило заслуги академика А. Ф. Иоффе, наградив его двумя орденами Ленина и медалями.

Абрам Федорович Иоффе, подлинный труженик науки, ученый-коммунист, заслуженно пользуется популярностью ученого-общественника. В 1947 г. трудящиеся города Ленинска избрали А. Ф. Иоффе своим депутатом в Ленинградский городской совет депутатов трудящихся.

Отмечая 70-летие академика А. Ф. Иоффе¹, советская научно-техническая и энергетическая общественность и Президиум Академии наук Союза ССР передали юбиляру наилучшие пожелания сил, здоровья и новых успехов в его дальнейшей плодотворной работе во славу передовой советской науки и на пользу народов Советского Союза.

¹ Отделение физико-математических наук АН СССР и физико-технический институт АН СССР провели 25 ноября с. г. в Ленинграде совместное заседание, посвященное 70-летию со дня рождения академика А. Ф. Иоффе. На заседании с фундаментальным докладом «Основные представления об электронных процессах в твердых и жидких телах» выступил академик А. Ф. Иоффе. После доклада юбиляру были переданы многочисленные приветствия от научных и общественных организаций, от заводов и вузов СССР.

Редакция журнала «Электричество» горячо поздравляет академика Абрама Федоровича Иоффе в связи с семидесятилетием со дня рождения и сорокапятилетием научно-педагогической и общественной деятельности и желает ему дальнейших творческих достижений на благо нашей любимой Родины.

Редакция журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Научно-техническая сессия по электроприводу в текстильной промышленности

С 19 по 22 сентября 1950 г. в Москве происходила организованная МОНИТОЭ, ВНИТО текстильщиков и Домом инженера и техника им. Дзержинского научно-техническая сессия по электроприводу в текстильной промышленности. На сессии присутствовали делегаты, представлявшие свыше 100 предприятий, научно-исследовательские и учебные институты и организации. Кроме того, в работе сессии приняли участие около 100 гостей.

Открывая сессию, заместитель министра легкой промышленности СССР Н. С. Рыжов отметил огромное влияние автоматизированного электропривода машин легкой промышленности на усовершенствование технологических процессов и конструкции машин и сообщил, что Министерство легкой промышленности СССР разработало большую программу мероприятий по развитию автоматизации машин и технологических процессов в предприятиях легкой промышленности.

В докладе кандидата техн. наук Я. В. Мильмана (Московский текстильный институт) были изложены основные тенденции развития автоматизированного электропривода текстильных машин. Классифицируя основные технологические процессы и машины текстильной промышленности с точки зрения требований, предъявляемых к автоматизированному электроприводу, докладчик указал, что большинство машин прядильно-ткацких фабрик не требует широкого и плавного регулирования скорости. Это позволяет применить для них обычные асинхронные короткозамкнутые двигатели. Некоторые машины прядильно-ткацких фабрик — прядильные, сновальные и шлихтовальные — требуют регулирования скорости привода, и поэтому привод этих машин имеет свои особенности. В частности, современные быстроходные и высокопроизводительные сновальные и шлихтовальные машины имеют привод постоянного тока от двигателей, питаемых от регулируемого генератора. В качестве генератора используется электромашинный усилитель, работающий с применением обратных связей. Машины отделочных фабрик можно разделить на две основные группы: 1) машины, обрабатывающие ткань, и 2) машины, ликвидирующие остатки химических процессов, и подсобные машины. Машины первой группы, как правило, требуют широкой регулировки скорости в процессе работы и при современном состоянии отбельного производства обычно объединяются в агрегаты, снабженные многодвигательным приводом. Технико-экономический анализ различных систем показал преимущество для этих машин двигателей постоянного тока, питаемых регулируемым генератором. Машины второй группы не требуют регулирования скорости в процессе работы, и привод их осуществляется при помощи обычных асинхронных короткозамкнутых двигателей. Управление электроприводами в текстильной промышленности до сего времени осуществляется в основном при помощи релейно-контакторной аппаратуры. Последние годы характеризуются внедрением электромашинных и электронных систем, обеспечивающих почти неограниченные возможности для автоматизации производственных процессов. В докладе отмечались не вполне удовлетворительное качество и недостаточный ассортимент пусковой аппаратуры.

Доклад кандидата техн. наук В. П. Белова (НИИЛТЕКМАШ) «Перспективы развития текстильных машин и требования, предъявляемые к современному электроприводу», содержал анализ основных конструктивных направлений в работе по созданию высокопроизводительных машин текстильной промышленности (увеличение скоростных режимов машин, механизация ручных операций, автоматизация управления работой механизмов, создание аппаратуры для автоматизации контроля и автоматического регулирования температуры, уровня, давления, влажности, программных регуляторов и т. д.).

Инж. И. Г. Обух (Центральный научно-исследовательский институт хлопчатобумажной промышленности) в докладе «Привод прядильных машин», отмечая сложность и ненадежность эксплуатации коллекторных двигателей с регулятором приложения, изложил принцип ра-

боты фрикционного вариатора системы Светозарова, который в сочетании с регулятором конструкции докладчика позволяет осуществлять как базисное, так и слойное регулирование скорости.

В докладе «Современные проблемы электропривода ткацких станков» доктор техн. наук Л. Б. Гейлер (Научно-исследовательская лаборатория треста «Электропривод» МЭП) подчеркнул, что привод ткацкого станка в связи с его резко переменным графиком нагрузки требует выбора специальной механической характеристики электродвигателя, обеспечивающей высокую производительность станка и хорошее качество продукции. В докладе был освещен метод нахождения оптимальной механической характеристики двигателя для привода ткацкого станка, а также дан приближенный способ определения моментов и скорости двигателя ткацкого станка.

Кандидат техн. наук, доц. А. М. Быстров (ЭНИИ, г. Иваново) в докладе «Электропривод в отделочном производстве текстильных фабрик» указал, что заводы текстильного машиностроения за последние годы стремятся обеспечить все выпускаемые ими машины индивидуальным приводом с автоматическим управлением и широко внедрить агрегированные машины с применением многодвигательных приводов. В докладе был описан электропривод основных машин отделочного производства и кратко дан их анализ. В частности, докладчик отметил, что привод машин отделочного производства, требующих плавного регулирования скорости, следует осуществлять от двигателей постоянного тока как шунтируемых, так и при питании их по схеме регулируемого генератора. Для ряда машин может оказаться целесообразным также и коллекторный двигатель переменного трехфазного тока. Для нерегулируемых приводов отделочного производства следует ориентироваться на асинхронные короткозамкнутые двигатели в закрытом исполнении.

Доклад кандидата техн. наук Б. П. Козлова (НИИЛТЕКМАШ, Москва) был посвящен новым типам электропривода машин отделов подготовки к ткачеству: мотальных, сновальных, и шлихтовальных машин, от качества работы которых зависят производительность ткацких станков и качество продукции. Современный привод высокоскоростных сновальных машин, разработанный в НИИЛТЕКМАШ, осуществляется от двигателя постоянного тока, приводящего в движение сновальный валик. Плавный разгон машины осуществляется при помощи стабилизирующего трансформатора, вторичная обмотка которого включена в одну из управляющих обмоток электромашинного усилителя, используемого в качестве регулируемого генератора, питающего приводной двигатель. Автоматическое регулирование скорости приводного двигателя осуществляется потенциометром, включенным последовательно в одну из управляющих обмоток электромашинного усилителя. Потенциометр получает движение от механизма, сконструированного таким образом, что линейная скорость сновки остается постоянной. Привод шлихтовальной машины, сконструированный в НИИЛТЕКМАШ, осуществляется от двух двигателей постоянного тока, из которых один приводит в движение навивальный механизм, а другой мажорный вал. Двигатели питаются по схеме регулируемого генератора, причем в качестве генераторов применены электромашинные усилители. Схема позволяет осуществить автоматическую регулировку влажности и напряжения нити ошлихтованной основы.

Результаты исследования электропривода чесальных машин были доложены инж. С. С. Швыревым (ЦНИИХБИ, Москва). Особенностью чесальных машин являются малое потребление мощности в статическом режиме и большой маховой момент, во много раз превышающий маховой момент двигателя, что приводит к значительному расходу энергии при пуске. На современных чесальных машинах вводится фрикционная муфта, облегчающая пусковой режим. Исследования показали, что при маховом моменте машины, равном 1 100 кгм², и при правильной наладке фрикционной муфты, время разгона машины составляет 100 сек и эквивалентный ток

во время пуска составляет 160% I_n . При неправильной регулировке муфты ток за первые 50 сек доходит до 400% I_n , что вызывает перегрев двигателя и сокращение срока его службы. Следует производить тщательную регулировку муфты, а также для защиты двигателей применять тепловую защиту, встроенную в корпус двигателя. Наиболее эффективным средством удлинения срока службы двигателя явилось бы применение более теплостойкой изоляции.

Доклады инж. А. Г. Кузнецова (Гипроискусств. волокна, Москва) «Переодопреобразовательные установки и сети повышенной частоты в промышленности искусственного волокна» и инж. И. П. Сахарова (ВНИИИВ, Москва) «Электроцентрифуги повышенной частоты в промышленности искусственного волокна и пути их усовершенствования» были посвящены актуальным вопросам быстро растущей в СССР отрасли промышленности искусственного волокна. Наиболее целесообразным типом генератора в машинных преобразователях — отметил А. Г. Кузнецов — является асинхронный генератор повышенной частоты. Работы по исследованию электронных и ионных преобразователей частоты, а также умножителей частоты системы В. П. Вологодина должны получить широкое развитие. В докладе инж. И. П. Сахарова указывалось, что так как электроцентрифугальный способ прядения является основным в промышленности искусственного волокна, то вопрос о наиболее совершенной конструкции электроцентрифуг является одним из актуальнейших в этой отрасли промышленности. Подробно проанализировав все существующие конструкции, докладчик приходит к выводу, что усовершенствование прядильных электроцентрифуг должно быть направлено по линии: а) применения больших высокопрочных прядильных кружек увеличенных размеров; б) повышения скорости электроцентрифуг до 10 000 об/мин; в) герметизации гнезд и внедрения новых электроверетен с эластичным валом.

Особая группа докладов на сессии была посвящена опыту эксплуатации электропривода машин текстильной промышленности. С докладами на эту тему выступали: инж. Ю. Ю. Абрамов (Текстильный комбинат им. Сталина, Ташкент); инж. Н. С. Костровский (фабрика им. Желябова, Ленинград); инж. Г. И. Мельников (Меланжевый комбинат им. Фролова, г. Иваново); инж. И. В. Костин (Комбинат «Красная Роза», Москва); инж. И. С. Малисов (Ивановская контора Энергогелемпра). Докладчики на основании многолетнего опыта эксплуатации указали на следующие основные недостатки электропривода как старых, так и новых машин: а) ременная и клиновидная передачи часто выходят из строя; недостаточно хорошо работает зубчатая передача на чесальных, ровничных и других машинах; б) выбор пусковой аппаратуры для привода машин носит случайный характер и недостаточно продуман; расположение пусковой аппаратуры и элементов автоматики на машине в ряде случаев неудачное и затрудняет эксплуатацию; в) мощность устанавливаемых двигателей для большинства машин завышена, что приводит к снижению эксплуатационных показателей (к. п. д. и $\cos \varphi$); г) не вполне удовлетворительно качество электродвигателей типа МТО, ТПФ, УРАЛ и др. и пусковой аппаратуры (магнитные пускатели МТ-122, МП-15, пускатели ВТП-10 и др.), резко увеличивающих аварийность установки; д) опыт эксплуатации коллекторных двигателей с регуляторами прядения для привода прядильных машин выявил у них ряд существенных недостатков как с точки зрения конструкции двигателя, так и с точки зрения его эксплуатационных свойств; в результате фабрики отказались от применения регуляторов

прядения и считают целесообразным отказаться от коллекторных двигателей для привода прядильных машин; е) ряд предприятий (Меланжевый комбинат им. Фролова и др.) предостерегает конструкторов от излишнего увлечения усложнением схем электропривода, так как это резко затрудняет эксплуатацию и ремонт; опыт эксплуатации выявил необходимость в пускателях с надежной тепловой защитой для мелких двигателей, работающих по специальному графику (двигатели ткацких станков и др.), так как при существующей шкале и качестве предохранителей, при чрезвычайно незначительной мощности двигателя, не обеспечивается его надлежащая защита.

С докладами выступили также инж. В. Г. Лещенко (НИИЛТЕКМАШ, Москва) на тему «Автоматизация машин для стабилизации капроновых чулок», инж. О. В. Хоризоменов (Московский технологический институт легкой промышленности им. Кагановича) «О новых типах приборов автоматического контроля нагрузки электропривода» и «Электрические методы контроля кинематической точности в приводах легкой промышленности», инж. Я. С. Гурин—«Единая серия асинхронных двигателей» (Технический отдел МЭП) и др.

Кандидат техн. наук Б. П. Козлов (НИИЛТЕКМАШ) в докладе «Электрическая аппаратура управления текстильными машинами» сообщил о принципах комплектования машин текстильной и легкой промышленности пусковой аппаратурой и о пусковой аппаратуре, выпускаемой заводами Главтекстильмаша. Учитывая требования безопасности и надежности эксплуатации, Главлегмаш принял следующие напряжения для цепей управления приводных устройств текстильных машин (согласованные с ЦК профсоюза текстильщиков): *1) для несложных приводов, содержащих не более 2 контактов и 12 разрывов цепи, напряжение цепи управления допустимо не выше 220 в между фазами или фазой и нулевым проводом (при двухпроводной цепи); 2) при сложных приводах с количеством контактов более 2 или более 12 разрывов цепи — 127 в. Указанное в пп. 1 и 2 относится к случаям отсутствия технологических контактов в цепи управления, а также для сухого помещения и отсутствия агрессивной среды. Для цепей управления с открытыми технологическими контактами применяется напряжение 12 в; для приводов машин, работающих в сырьих помещениях, для цепей управления следует применять 36 в. Аппаратура управления электроприводами комплектуется в виде магнитных станций управления, поставляемых komplektно с машинами, выпускаемыми заводами Главтекстильмаша. Кожух станций — пыленепроницаемый. Для комплектования указанных станций заводы Главтекстильмаша выпускают: а) трансформаторы для цепей управления мощностью 50, 100 и 250 вт с различными комбинациями обмоток (для первичной цепи 127, 220, 380 и 500 в и напряжение вторичной обмотки — 127, 36, 12 в); б) промежуточное реле РП-1 с 2 н. о. и 2 н. э. контактами на напряжение 12, 110 и 36 в; в) программный регулятор — на 3, 6 и 12 управляемых цепей; г) электронные реле времени переменного тока, допускающие регулировку времени от 0,1 до 20 сек.

По докладам развернулись оживленные прения, в которых выступало значительное число участников сессии. На основании обмена мнений сессия приняла развернутые решения, направленные на дальнейшее развитие работ по автоматизированному электроприводу в легкой промышленности.

Кандидат техн. наук, доц. Я. В. МИЛЬМАН



Конференция-курсы по эксплоатации сельских электроустановок

С 4 по 9 сентября с. г. в Запорожье была проведена конференция-курсы по вопросам эксплоатации сельских электроустановок, организованная ВНИТОЭ, Главным управлением сельской электрификации Министерства сельского хозяйства СССР и Всесоюзным научно-исследовательским институтом электрификации сельского хозяйства. В составе участников — практические работники сельской электрификации из республик, краев и областей Союза ССР, а также представители различных научных учреждений, занимающихся вопросами сельской электрификации, — всего свыше 300 человек.

Конференция заслушала более 20 докладов и сообщений, обобщающих опыт производственных организаций и научно-исследовательских институтов.

Инж. А. М. Саркисян (Главсельэлектро МСХ СССР) в докладе «Технические пути развития сельской электрификации» отметил, что сельская электрификация в послевоенный период получила большой размах; мощность сельских электроустановок в 1950 г. в сравнении с 1945 г. увеличилась в 4,5 раза, количество электрифицированных колхозов возросло в 5,5 раза. Подробно остановившись на недостатках, докладчик затем выдвинул ряд важнейших задач по улучшению строительства и эксплоатации сельских электроустановок и по внедрению электроэнергии в сельскохозяйственное производство.

С докладом «Местные сельские электросистемы» выступил доктор техн. наук А. Г. Захарин, указавший, что создание местных энергетических систем резко повышает надежность и экономичность электроснабжения. Отметив, что структура местных энергосистем зависит в первую очередь от степени отличия типов и режимов объединяемых электростанций, докладчик перечислил основные технические требования. Верхний предел мощности системы должен ограничиваться возможностью ее осуществления на напряжении не выше 35 кв; учитывая требования простоты защиты и управления, рекомендуется объединение в одну систему 3—6 и не более 10—12 электростанций; в системе должна быть одна или две ведущих электростанций, мощность которых составляет 50—60% от суммарной мощности системы и на которых осуществляется регулирование частоты.

Кандидат техн. наук И. И. Кодкинд сделал доклад о параллельной работе генераторов на сельских электростанциях, поддержании стандартной частоты и эксплоатации защищины.

В докладе «Улучшение эксплоатации сельских гидроэлектростанций» — доктор техн. наук Н. А. Сазонов остановился на основных элементах нормальной технической эксплоатации сельских гэс и подчеркнул необходимость с целью улучшения их эксплоатации, во-первых, полной загрузки гэс и повышения использования установленной мощности до 3 000—3 500 час. в год; во-вторых, строгого соблюдения частоты и напряжения в заданных пределах; в-третьих, правильной организации и систематического проведения технического ухода. Основываясь на материалах Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства, докладчик рекомендовал компаундингование возбуждения синхронных генераторов. Компаундингование генераторов представляет значительный шаг вперед при внедрении автоматики на сельских гидроэлектростанциях и значительно облегчает пуск короткозамкнутых электрических двигателей.

Кандидат техн. наук Л. Е. Эбин в докладе «Основные вопросы технической эксплоатации

сельских электроустановок» отметил, что рост числа установок в отдельных районах и строительство станций укрупненных мощностей вызывают необходимость в повышении требований к эксплоатации в отношении качества, надежности и экономичности электроснабжения. Большую роль при упорядочении эксплоатации должно сыграть строгое применение «Правил технической эксплоатации сельских электроустановок». Одной из главных задач эксплоатации сельских электроустановок является сохранение и поддержание располагаемых мощностей электростанций, принятых в эксплоатацию.

Инж. А. В. Буданцев (Управление эксплоатации Главсельэлектро) остановился на задачах борьбы за надежность и бесперебойность в работе сельских электроустановок. За последние годы качество эксплоатации улучшилось, аварийность в системе снизилась вдвое. Однако анализ аварий за 1949 г. и первую половину 1950 г. свидетельствует о наличии еще больших недостатков в эксплоатационной практике. Докладчик подробно остановился на мероприятиях по предотвращению аварий в сельских электроустановках.

С докладом «Создание ремонтного и масляного хозяйства и производственных лабораторий для сельских электроустановок» выступил кандидат техн. наук Е. Л. Шац.

Конференция заслушала также доклады: инж. Я. С. Теплицкого (Главсельэлектро) «О внедрении правил технической эксплоатации сельских электроустановок» и А. С. Тарасова (Свердловская контора «Сельэнерго») «Об опыте организации эксплоатации колхозных электроустановок».

С сообщениями на конференции выступили: инж. П. И. Кузьмин (Свердловский филиал ВИЭСХ) — «Об эксплоатации электротракторов»; инж. М. К. Козинский (Корсунь-Шевченковская гэс) — «Об опыте эксплоатации»; инж. Г. В. Горновесов (Запорожский филиал ВИЭСХ) — «Об эксплоатации электроустановок на животноводческих фермах»; инж. П. Т. Аликин (Молотовсельэнерго) — «Об эксплоатации Оханской сельской электросистемы в Молотовской области»; инж. М. П. Горяев (Ленсельэнерго) — «Об эксплоатации Гатчинской сельской электросистемы в Ленинградской области»; инж. П. В. Куц (Лаборатория ВИЭСХ) — «О внедрении смешанной системы распределения электроэнергии в сельских районах»; кандидат техн. наук И. С. Курдиани — «Об эксплоатации сетей ДПЗ в Грузинской ССР»; инж. Б. В. Смирнов (ВИЭСХ) — «О диспетчерской связи в сельских электроустановках»; инж. А. М. Ганелин (ВИЭСХ) — «О скоростном ремонте сельских электрических линий».

Доклады и сообщения подверглись всестороннему обсуждению. Участники конференции ознакомились с эксплоатацией Днепрогэс им. В. И. Ленина, с научно-экспериментальным хозяйством ВИЭСХ на острове Хортица, с эксплоатацией электрических установок на заводе «Запорожсталь», а также с эксплоатацией электрических установок в колхозах Запорожской области.

Конференция приняла развернутое решение по вопросам эксплоатации сельских электроустановок.

С большим подъемом участники конференции приняли приветственное письмо вождю народов И. В. Сталину.

Инж. Д. Т. КОМАРОВ



В. П. Вологдин

Советская научно-техническая общественность электросварщиков потеряла одного из своих организаторов — Виктора Петровича Вологдина, скончавшегося после тяжелой и продолжительной болезни 14 октября с. г.

Доктор техн. наук, профессор Ленинградского кораблестроительного института В. П. Вологдин приобрел широкую известность своими работами по внедрению в кораблестроении метода сооружения цельносварных судовых корпусов. Заслуженное распространение имела его книга «Деформации и напряжения при сварке судовых конструкций».

Виктор Петрович родился в 1883 г. В 1909 г. он окончил Электромеханический факультет ЛПИ и после нескольких лет научной работы при институте перешел

к практической инженерной работе на Судостроительном заводе в Ленинграде.

В 1927 г., будучи профессором Владивостокского политехнического института, он организовал одну из первых лабораторий электродуговой и газовой сварки. В 1933 г. В. П. Вологдин был переведен вновь в Ленинград, где помимо преподавания в кораблестроительном институте, работал на заводах Минсудпрома СССР и активно участвовал в жизни ВНИТОЭ — электросварщиков.

Правительство высоко оценило заслуги В. П. Вологдина, наградив его орденом Трудового Красного Знамени.

Кандидат техн. наук Г. П. РОЗИН



Библиография

И. А. СЫРОМЯТНИКОВ. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

239 стр., ц. 14 руб. 10 коп., Госэнергоиздат, 1950.

Книга И. А. Сыромятникова представляет интересное явление. В нашей электротехнической литературе издано очень мало книг по вопросам эксплуатации электрических машин (имеются в виду не вопросы ухода за машинами, их ремонт и т. д., по которым издано достаточно книг, а те разнообразные и достаточно сложные в теоретическом отношении задачи, которые возникают в практике эксплуатации электроприводов в связи с их переходными процессами).

Во втузах большинству таких вопросов, естественно, не может быть уделено внимания, поэтому начинаящий свою деятельность инженер-электрик иногда испытывает затруднения при встрече на практике с подобными вопросами. Главное значение книги И. А. Сыромятникова, как нам кажется, заключается в том, что она позволяет перекрыть неизбежный разрыв между учебной трактовкой облассти электропривода с асинхронными двигателями и требованиями в этой области со стороны эксплуатации.

Своебразно составленная книга И. А. Сыромятникова интересна уже тем, что содержание ее, за небольшим исключением, построено на практическом материале, собранном автором за многие годы его работы в системе Министерства электростанций. В силу этого, материал книги ориентирован, главным образом, на электроприводы вспомогательных механизмов на электростанциях; однако книга представляет интерес и для других областей электропривода.

Несомненно на то, что по своей конструкции асинхронный двигатель гораздо проще двигателя постоянного тока, условия применения и теоретическая сторона работы асинхронного двигателя в различных режимах на практике вызывает зачастую большие затруднения, чем это имеет место с двигателем постоянного тока. Автор последовательно освещает эти трудные вопросы. Сперва рассматриваются основные свойства и механические характеристики асинхронных двигателей и практические способы их определения. Параллельно с этим устанавливаются характеристики приводимых механизмов, их классификация и способы определения характеристик средствами, доступными в практике эксплуатации.

В отдельной главе рассматриваются тепловые характеристики двигателей в связи с условиями перегрузок, продолжительностью срока службы и надежностью двигателей.

Около трети книги посвящено вопросам пуска двигателей, в том числе условиям самозапуска их при восстановлении напряжения в сети после короткого замыкания.

Вслед за нормальными режимами и функциями асинхронного двигателя анализируются аномальные его режимы: работа при отклонении частоты и напряжения питающей сети от номинальных и несимметричные режимы

(обрыв одной фазы в обмотке статора или ротора, однофазное короткое замыкание).

Заключительную главу книги составляют несколько схематично изложенные правила приемных и эксплуатационных испытаний двигателей.

В книге И. А. Сыромятникова есть много сведений и технических данных, которые вряд ли можно найти в каком-нибудь ином аналогичном труде. Таковы, например, экспериментальные данные величин маховых моментов механизмов собственного расхода электростанций (стр. 143—145) или величин начальных статических моментов сопротивления различных механизмов, применяемых на электростанциях (стр. 126). Поучительны данные о влиянии напряжения сети на продолжительность пуска в ход асинхронных двигателей, приводящих насосы и вентиляторы (стр. 164—166). Интересны сведения о применяемом на тэц Казэнерго способе регулирования скорости асинхронного двигателя посредством дросселей насыщения с подмагничиванием постоянным током (стр. 130).

К достоинствам книги относится и то, что автор широко пользуется относительными единицами, что придает наглядность и общность отдельным соотношениям и кривым. Правда, в отдельных случаях выбор базы для относительных единиц не совсем удачен. Так, в выражениях (6-1), (6-2) и последующих для момента сопротивления механизмов автор относит величины скорости к синхронной вместо номинальной; это приводит к утверждению, что «момент сопротивления равен номинальному при синхронном числе об/мин». Использование выражения для момента сопротивления в форме, принятой автором, может вызвать большие неточности при решении задач на основе уравнения движения электропривода.

По существу содержания книги возникают следующие замечания.

На фиг. 2-1 и 9-6 автор приводит механические характеристики трех типов короткозамкнутых двигателей: нормального типа, с глубоким пазом и с двойной обмоткой на роторе. Однако выбор здесь в качестве масштаба относительных величин моментов следует признать неудачным, так как при этом фиксируется только характер конфигурации кривых моментов, но упускаются из вида различия в абсолютных величинах максимального (опрокидывающего) момента, которые не могут быть одинаковыми для двигателей всех трех указанных типов при одинаковых габаритных размерах.

При описании некоторых экспериментальных методов для исследования асинхронного двигателя автор проявляет недостаточно критическое отношение к ним или же несопоставляет их с другими известными методами исследования. Так, автор указывает (стр. 116), что «по началь-

ной части кривой выбега можно определить маховой момент всего агрегата», не оговаривая того, что получаемый при этом результат зависит от точности графического построения и может иногда существенно отличаться от действительного и что в иных случаях расчетный путь определения махового момента оказывается более простым и надежным.

Обращает на себя внимание почти полное игнорирование автором технической литературы. Многие из вопросов, трактуемых в книге, освещались на страницах наших электротехнических журналов, в докладах на конференциях и т. д. и тем не менее, автор почему-то проходит мимо этих работ, тем самым, как нам кажется, несколько обделяя содержание своего труда.

Так, например, автор довольно много внимания посвящает аналитическому выражению тока статора в зависимости от нагрузки на валу двигателя (главы 1-7 и 4-4). Применимые же здесь зависимости достаточно громоздки и могли быть с успехом заменены более простым выражением, приводившимся в нашей литературе (ВЭП, № 2, 1948):

$$i = \sqrt{1 + (1 - i_0^2) \sqrt{1 - \mu^2}},$$

где $\mu = M/M_k$ — относительный момент нагрузки на валу двигателя,

$i_0 = I_0/I_k$ — относительный ток холостого хода,

$i = I/I_k$ — относительный ток статора двигателя, соответствующий нагрузочному моменту μ ,

I_k — ток статора, соответствующий опрокидывающему моменту M_k двигателя.

Несвободна книга и от некоторых пробелов. К числу таких пробелов относятся следующие:

1. Рассмотрены несимметричные режимы работы двигателей, являющиеся аварийными, но нет указаний по поводу защиты двигателей в случае работы при таких режимах.

2. Полезно было бы рассмотреть работу асинхронных двигателей с фазным ротором, которые путем закорачивания колец превращены в своего рода короткозамкнутые двигатели. Именно в системе Министерства электростанций накоплен значительный практический опыт по такого рода приспособлению двигателей с фазным ротором для работы на приводах собственных нужд (дымососы).

3. В главе «Изменение к. п. д. при регулировании частотой» (стр. 53—56) автор ничего не говорит о способах генерации тока переменной частоты. Известно, что не существует достаточно экономичных и практических источников такого тока. Поэтому данная глава имеет несколько абстрактное значение и как бы выпадает из общего плана книги, предназначенней для инженеров по эксплуатации и, следовательно, преследующей практические цели. Во всяком случае при сравнении в словом примере к. п. д.

электропривода для различных способов регулирования скорости следовало бы учесть и к. п. д. установки для получения переменной частоты.

4. В главе «Регулирование производительности механизмов» указывается, что «для двигателей с фазным ротором и механизмом с вентиляторным моментом сопротивления целесообразно производить регулировку числа оборотов сопротивлением в цепи ротора, так как при этом обмотки ротора и статора будут находиться в более благоприятных условиях по нагреву вследствие уменьшения тока, чем при регулировании задвижкой». Это положение дано без пояснений и доказательств. Между тем, здесь нельзя обходить энергетическую сторону вопроса, которая именно для приводов с вентиляторным моментом складывается наиболее благоприятно и делает для них приемлемым регулирование скорости посредством реостата в цепи ротора.

Нельзя не остановиться на языке книги И. А. Сыромятникова. Кое-где книга засорена неудачными выражениями, не созвучными с общим научно-техническим стилем изложения книги. Таковы, например, выражения «двигатели... самозапускаются без пусковых устройств» (стр. 8), «длительность разворота двигателя при пуске» (стр. 159). Язык теряет свою точность в таких выражениях, как в подлиси под фиг. 6-9 «Кривые потребляемой двигателем мощности в зависимости от расхода (чего?) при регулировании задвижкой и числом оборотов при наличии реостата в цепи якоря», или в выражениях на стр. 176 и 179: «Сечение воздушного реактора из меди», «Сечение реактора» вместо, повидимому, «сечение обмотки реактора». Недоговоренность в некоторых выражениях может осложнить понимание; например, «ротор (синхронного двигателя) имеет вырезанные пазы... специальной обмотки нет» (стр. 181). Очевидно, автор хотел сказать: «специальной демпферной обмотки». На стр. 132 выводится выражение для постоянной времени пуска, которая на стр. 133 называется уже «механической постоянной времени», что, как известно, не одно и то же.

Мы остановились на языке рецензируемой книги, имея в виду улучшение его в последующем издании, которое, как нам кажется, потребуется.

В заключение нужно еще раз подчеркнуть, что книга И. А. Сыромятникова содержит много свежего и оригинального материала и несомненно отвечает назревшей потребности. Следует высказать пожелание, чтобы Госэнергоиздат выпустил аналогичную книгу, посвященную характеристикам и режимам работы электроприводов с двигателями и постоянного тока с точки зрения вопросов требований со стороны их эксплоатации.

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Центральная научно-исследовательская лаборатория электропривода и автоматики Министерства электропромышленности



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издания 1950 г.)

* БОГОРОДИЦКИЙ И. П., ПАСЫНКОВ В. В., ТАРЕЕВ Б. М. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. 436 стр. + 10 вклейк, ц. 16 руб. Госэнергоиздат.

ГРОДНЕВ И. И., ЕФИМОВ И. Е. ПРОВОДА И КАБЕЛИ СВЯЗИ С ПОЛИХЛОРВИНИЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. 99 стр., ц. 5 руб. Связьиздат.

* ЖЕРВЕ Г. К. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. 352 стр., ц. 20 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ИВАНИЕВ В. В. РЕМОНТ ТРАНСФОРМАТОРОВ. 231 стр. + 2 вклейк, ц. 16 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

* МЕЛЬНИКОВ Н. А. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. 176 стр., ц. 9 руб. Госэнергоиздат.

МОДЕЛЬ З. И., НЕВЯЖСКИЙ И. Х. РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА. Допущено в качестве учебного пособия для техников. 484 стр., ц. 14 руб. Связьиздат.

* МОРОЗОВ Д. П. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. Допущено в качестве учебного пособия для электромеханических техникумов. 368 стр., ц. 13 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

ОСИПОВ К. Д. ЛАМПОВЫЙ ВОЛЬТМЕТР. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Вып. 64). 58 стр., ц. 1 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

* ПЕРЕКАЛИН М. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. 511 стр., ц. 26 руб. Госэнергоиздат.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ. (МЭС. Технический отдел). Издание 6-е. 83 стр., ц. 5 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

ПРОЗОРОВСКИЙ Ю. Н. УСИЛЕНИЕ РЕЧЕЙ ОРАТОРОВ. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Вып. 59). 26 стр., ц. 75 коп. Госэнергоиздат.

РЯБКОВ А. Я. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. Рекомендовано в качестве учебника для энергетических техникумов. 440 стр., ц. 16 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

САХАРОВ П. В. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОАППАРАТОСТРОЕНИЯ. Допущено в качестве учебника для электромеханических техникумов. 408 стр., ц. 14 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

В книге излагаются основные особенности электроаппаратостроения, причем, в отличие от принятого в курсах по технологиям металлов порядка изложения, в данной книге рассматриваются не отдельные технологические процессы (отливка, ковка, штамповка, токарная обработка и т. п.), а технология основных деталей и узлов электроаппаратов (контактов, магнитопроводов, катушек и т. д.). Объем изложения ограничен рассмотрением технологий основного производства электроаппаратов без изложения технологии вспомогательных цехов (инструментального, модельного, ремонтного и т. д.). Так же не рассматриваются вопросы организации производства.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается опубликование рецензий.

СЕРЕДА А. С. СКОРОСТНОЙ РЕМОНТ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭЦ. (Опыт Закамской ТЭЦ). 103 стр., ц. 4 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

* СЫРОМЯТИКОВ И. А. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ 239 стр. + вклейка, ц. 14 руб. 10 коп. Госэнергоиздат. (Рецензию на эту книгу см. на 88 стр.).

ШНИЦЕР Л. М. ТРАНСФОРМАТОРЫ. Основы теории и нагрузочная способность. Издание четвертое, переработанное. 191 стр., ц. 9 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

В нашей стране имеется большой контингент электриков молодшего и среднего технического состава — монтеров и техников. Книга «Трансформаторы» позволяет им — сталкивающимся с трансформаторами повседневно — систематизировать свои представления и опыт, и углубить свои знания процессов, сопутствующих работе трансформаторов, не прибегая к другим специальным пособиям или к учебнику электротехники. После пояснения роли и места трансформатора в процессе распределения электрической энергии, излагается явление электромагнитной индукции, которое положено в основу принципа действия трансформатора. Разъясняется, что следует понимать под коэффициентом трансформации, каково значение тока холостого хода. Приведены таблицы и кривые намагничивающей мощности. Рассматриваются активная и реактивная составляющие тока холостого хода; описываются явления гистерезиса, вихревых токов и искажения формы кривой тока холостого хода. Рассматриваются, сначала без учета явления рассеяния, векторные диаграммы режимов холостого хода и различных нагрузок, явление короткого замыкания. После изложения понятия о рассеянии рассматривается повторно уже усложненные векторные диаграммы и излагается весьма полно (с приведением формул) понятие о напряжении короткого замыкания и выявляется роль e_k в работе трансформатора. Излагается вопрос о динамических усилиях, как следствие существования полей рассеяния. Даётся понятие о многофазных токах и дается представление о трехфазном трансформаторе. Вопросы нагрева и охлаждения, старения изоляции, учета ее износа и о допустимых перегрузках изложены с большой полнотой на основе хорошо известных работ автора в этой области. В четвертом издании резко сокращен объем материала, касающегося вопросов старения изоляции. Однако и сейчас высококвалифицированные трактуют проблемы и широта ее постановки делают книгу в части этих вопросов ценным пособием также для инженеров-эксплоатационников и расчетчиков.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОВОДА И КАБЕЛИ. (Сборник общесоюзных стандартов). 511 стр., ц. 38 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Сборник составлен и оформлен аналогично ранее вышедшему в свет сборнику стандартов «Электротехнические материалы» («Электричество», стр. 96, № 7, 1950) и содержит полные тексты 70 стандартов (ГОСТ и ОСТ) на кабельные изделия и материалы, применяемые в их производстве, по состоянию на 1 сентября 1949 г., и перечень 121 наименования ведомственных технических условий и ведомственных норматилей по состоянию на 1 мая 1949 г. Подбор включенных в сборник стандартов осуществлен П. М. Котенко под общим руководством Г. С. Плисса.

ЭПШТЕЙН А. М. ЭЛЕКТРОЛИЗНИК АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАВОДОВ. Одобрено в качестве учебника для школ ФЗО. 190 стр., ц. 6 руб. 90 коп. Металлургиздат.



ОБРАЩЕНИЕ РЕДАКЦИИ

- Для пополнения редакционного комплекта журнала «Электричество» редакция обращается с просьбой к лицам и организациям, располагающим свободными комплектами журнала
- «Электричество» за годы, указанные ниже, сообщить об этом редакции журнала по адресу: Москва, Главпочтамт, почтовый ящик № 648.

В редакционном комплекте недостают журналы за 1880, 1881, 1883—1888, 1891—1900, 1901—1906, 1909, 1912, 1913, 1937 и 1941 гг.

Указатель материалов, помещенных в журнале „Электричество“ в 1950 г.

1. Тематический указатель

Авторы и названия материалов	№ журн. номера	Стр.	Авторы и названия материалов	№ журн. номера	Стр.
ФИЗИЧЕСКИЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ			Библиография		
Статьи			Атабеков Г. И.—Книга Г. В. Доброзвольского «Установившиеся процессы в электрических цепях».	2	93
Бабат Г. И.—Преобразования электромагнитной энергии.	10	83	Зенеке Г. В. и Ионкин П. А.—Книга Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова «Теоретические основы электротехники», ч. I.	5	88
Бабат Г. И.—Трансформаторы электромагнитной энергии.	7	59	Калантаров П. Л. и Нейман Л. Р.—Ответ на замечания рецензента.	5	92
Беляков А. П.—Шкалы электротехнических величин.	8	78	Ломоносов В. Ю.—Книга Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова «Теоретические основы электротехники», ч. III.	5	91
Бессонов Л. А.—Аналитическое определение постоянного потока в дросселе насыщения.	5	61	Неструев А. В. и Страхов С. В.—Книга П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана «Теоретические основы электротехники», ч. II.	5	90
Бессонов Л. А.—Переходные процессы в дросселе с подмагничиванием, вызванные внезапным изменением амплитуды переменного напряжения.	8	50	Перекалин М. А.—Книга Н. И. Мансурова и В. С. Попова «Теоретическая электротехника».	11	94
Богатырев О. М.—Графоаналитический метод решения алгебраических уравнений высоких степеней.	8	71	II. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ		
Боголюбов В. Е.—Графический метод расчета переходных процессов в цепи со сталью с учетом гистерезиса.	9	64	Статьи		
Боголюбов В. Е.—Переходные процессы в дросселях насыщения, вызванные изменением напряжения.	3	56	Лауреаты Сталинских премий.	4	3
Буль Б. К.—Аналитический метод определения магнитных сопротивлений и потерь в стали.	5	10	За творческое развитие передовой науки.	7	3
Воронов Р. А.—Преобразования и схемы замещения линейных электрических цепей.	8	3	Большая стройка сталинской эпохи.	9	3
Воронов Р. А. и Пухов Г. Е.—Общие уравнения четырехполюсника.	1	25	Величественные сооружения коммунизма.	10	3
Гинзбург С. А.—Теорема о нелинейном четырехполюснике.	9	68	Винтер А. В.—Первый в мире государственный план электрификации.	12	3
Дундасовский С. Я.—О переходном режиме при самовозбуждении щунтового генератора.	5	34	Винтер А. В.—25-летие Шатурской грэс им. Ленина	11	82
Енко В. В. и Лебедев П. Д.—Исследование теплопередач в электрических машинах.	1	47	Лобанов В. Н. и Каменя И. М.—Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos \phi$.	7	54
Ионкин П. А.—О схемах замещения пассивных много полюсников.	11	74	Из опыта работы		
Карасев М. Ф., Фалеев В. А. и Убеев В. П.—К вопросу существования инверсии электрических разрядов в установках с вибрирующими контактами.	9	58	Сербиновский Г. В.—Опыт эксплуатации электроуставновок на московских предприятиях.	6	67
Нейман Л. Р. и Зайцев И. А.—Опытное исследование поверхностного эффекта в трубчатых стальных шинах.	2	3	По страницам технических журналов		
Нейман Л. Р.—Поверхностный эффект в ферромагнитных проводах и магнитных цепях.	1	18	За рубежом		
Неструев А. В.—О применении принципа наложения при расчете нелинейных цепей.	8	53	Ромашкин Н. И.—Энергохозяйство европейских стран народной демократии, Чехословакия.	2	87
Неструев А. В.—Электрические поля в анизотропных средах.	3	9	Ромашкин Н. И.—Энергохозяйство европейских стран народной демократии, Польша, Болгария.	3	74
Покрас М. И.—Решение операционным методом телеграфных уравнений при пульсовых условиях.	3	60	Ромашкин Н. И.—Энергохозяйство европейских стран народной демократии, Румыния, Венгрия, Албания.	4	74
Пухов Г. Е.—Об уравнениях четырехполюсника, включенного в сложную электрическую цепь.	5	55	Дискуссии		
Расовский Э. И.—Метод холостого хода и короткого замыкания в применении к графическому исследованию трехфазных цепей.	9	60	Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos \phi$.	11	87
Ризкин А. А.—Об одном методе анализа переходных процессов в линейных четырехполюсниках.	9	66	Заметки и письма		
Розенблат М. А.—Переходные процессы в цепях переменного тока при быстром изменении индуктивности.	2	9	Кнорринг Г. М.—Не отказываться от «условных терминов».	2	92
Страхов С. В.—Простой способ получения выражений векторов электрического и магнитного поля через магнитный и электрический векторы Герца.	2	43	Подольский Л. П.—О недостатках статистики электротравматизма.	12	80
Из опыта работы			Хроника		
Самсонов И. М.—Расчет распределения переменного тока по пластинам сложного токонаправления.	6	72	Научно-техническая сессия по экономии электроэнергии.	4	89
По страницам технических журналов			Научно-техническая сессия по ремонту электрооборудования.	5	84
Выпрямление в нелинейных симметричных электрических и магнитных цепях.	1	75	Участие ВНИТОЭ в борьбе с электротравматизмом.	7	92
Процессы в космических лучах (по итогам памирских экспедиций Академии Наук).	3	72	Библиография		
О механизме электрической эрозии металлов.	4	73	Богородицкий Н. П.—Книга И. Г. Дроздова «Статическое электричество в промышленности».	10	93
Работы в области электроакустической техники.	5	71	III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СТАНЦИИ, СЕТИ И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ		
За рубежом			Статьи		
Казарновский Л. П.—Аномалия вихревых токов в листовых ферромагнитиках при больших изменениях магнитного потока.	3	72	Айзенберг Б. Л.—Расчет селективности работы плавких предохранителей.	8	39
Дискуссии			Акопян А. А., Ларинов В. П., Разевиг Д. В.—Экспериментальное исследование индуцированных напряжений на модели линии.	11	22
К статье В. Е. Боголюбова «Квазирелаксационные колебания в феррорезонансных цепях с подмагничиванием» (№ 6, 1949).	3	89	Бургучев С. А.—Когда возможно сочетание воздушной линии с кабельной сетью.	1	40
Об электромагнитных единицах (№ 1, 1948; № 1 и 12, 1949).	4	78	Веников В. А., Г. М. Розанов и Соколов И. Н.—Характеристика электропередач переменного тока на большие расстояния.	7	8
К статье П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана «Определение понятий, относящихся к области электромагнитных явлений» (№ 2, 1949).	10	91	Винницкий А. М. и Гельбух Л. А.—Расчет внешней индуктивности тонких прямоугольных стальных шин.	8	37
Заметки и письма			Дюсочкин Л. И.—Новая схема соединений для мощных электрических станций.	5	32
Берендеев А. В.—О работе Крона по применению тензорного исчисления к электротехнике.	12	79	Ермилов А. А.—Основные принципы построения трансформаторных подстанций промпредприятий.	1	7

Продолжение

Авторы и названия материалов	№ журнала	Стр.	Авторы и названия материалов	№ журнала	Стр.			
Ильин В. А.—Длинные линии с изменяющимися по длине параметрами.	2	53	Елько В. В.—Работа генераторов постоянного тока при неизменном сопротивлении внешней цепи.	6	31			
Костенко М. П.—Электродинамическая модель для исследования устойчивости.	9	5	Ермолина Н. П.—Безреостатный пуск малоомощных шунтовых электродвигателей постоянного тока в автономных установках.	1	44			
Крачковский Н. Н.—Блочная передача электрической энергии.	4	31	Иванов-Смоленский А. В.—Влияние скорости изменения скольжения на момент асинхронной машины.	6	21			
Лившиц Д. С.—Об экономической плотности тока и потерях электрической энергии в сетях промышленных предприятий.	11	9	Казовский Е. Я.—Переходные процессы в асинхронных машинах с учетом асимметрии ротора.	4	14			
Маркович И. М. и Соловьев С. А.—Экспериментальное исследование динамической устойчивости.	7	30	Казовский Е. Я.—Переходные процессы в машинах переменного тока двойного питания и их рассмотрение с помощью круговой диаграммы.	8	14			
Приклонский Е. Н.—Выбор числа трансформаторных подстанций.	4	24	Калантаров П. Л. и Цейтлин Л. А.—К вопросу о расчете индуктивности рассеяния трансформаторов.	5	6			
Приклонский Е. Н.—Оптимальная плотность тока в проводах, кабелях и шинах.	11	3	Камень И. М.—Методы исследования несимметричных схем асинхронных двигателей.	11	42			
Розанов Г. М.—Конструкция линий 220 кв.	8	32	Конон Б. Е.—Методика расчета пусковых характеристик явиополюсных синхронных двигателей.	2	60			
Рыбов М. С.—Экономическая плотность тока в осветительных сетях промпредприятий.	11	17	Лопухина Е. М.—Исследование асинхронного двигателя с ротором в виде полого цилиндра.	5	26			
Сисонин Г. А.—Электрическая печь как потребитель-регулятор энергосистемы.	9	16	Матюхин В. М.—Основная классификация электрических машин.	3	38			
Тер-Газарян Г. И.—Экспериментальное исследование несимметричного режима гидрогенераторов.	8	8	Пензнер О. Б.—Асинхронные моменты высших гармоник асинхронного электродвигателя.	3	33			
Трофименко Д. Е.—Определение потокораспределения в кольцевой сети.	6	6	Петров Г. Н. и Окуни С. С.—Об отрицательном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора.	3	5			
Цейтлин М. И.—Выбор схем и параметров городских распределительных систем.	6	13	Печорина И. И.—Обобщенный метод расчета пусковых сопротивлений для электродвигателей.	11	47			
Из опыта работы								
Чокрикий Ф. Д.—О нецелесообразности применения частично замкнутых сетей.	12	60	Полтава Л. И.—Построение характеристик схемы генератор-двигатель с тремя обмотками возбуждения генератора.	36				
Холмский В. Г.—Применение регулируемых трансформаторов различных типов в городских электрических сетях.	4	66	Резин М. Г.—Эффект реакции ротора и механические характеристики двигателя с дуговым статором.	2	51			
По страницам технических журналов								
Самосинхронизация генератора средней мощности.	1	73	Смирнов К. А.—Устойчивость регулирования возбуждения генераторов при повышающихся характеристиках.	1	34			
Включение в сеть крупных гидрогенераторов методом самосинхронизации	3	72	Степанов Н. П.—Однофазные распределительные трансформаторы для сетей с малой плотностью нагрузки.	2	13			
Опыт эксплуатации линий электропередачи 35 кв по системе ДПЗ (два провода—земля).	6	76	Фрид Е. С.—Расчет импульсных градиентов в многофазных трансформаторных обмотках.	9	45			
Передвижная электростанция с двигателем НД-40.	6	77	Чечет Ю. С.—Влияние третьей пространственной гармоники магнитного потока на пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя, работающего от сети однофазного тока.	3	19			
Передвижная электростанция мощностью 50 квт	10	87	Чечет Ю. С.—Универсальный асинхронный микродвигатель.	10	5			
Дискуссии								
К статье А. А. Глазунова «Путь технического развития и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза» (№ 10, 1949).	5	75	Чистов Н. В.—Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя с учетом насыщения.	12	15			
Правила устройства электротехнических установок (№ 11 и 12, 1949)	3,4	91,79	Шехтман И. В.—Расчет рассеяния лобовых частей обмоток.	3	24			
Мешенин Б. С.—К статье В. Г. Холмского «Применение регулируемых трансформаторов различных типов в городских электрических сетях»	6,8	83,83	Шубенков В. А. и Пинчук И. С.—Графический метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе.	2	47			
Заметки и письма								
Крачковский Н. Н.—К вопросу о применении напряжения 400 кв для передачи электрической энергии.	5	86	Эфенди-Заде А. А.—Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения.	12	19			
Крикунчик А. Б.—К статье И. М. Чалидзе, Н. А. Златова и Ю. А. Варзяша «К вопросу о схемах коммутации крупных гидроэлектростанций».	6	87	Из опыта работы					
Хроника								
Совещание по защите подземных трубопроводов и кабелей от электрической коррозии.	3	94	Аронов Р. Л.—Расчет пусковых сопротивлений для двигателей постоянного тока.	12	64			
Совещание по новым конструкциям шинопроводов.	4	88	Левинтов С. Д.—К определению угла в явнополюсных синхронных машинах.	7	64			
Обсуждение статьи Л. И. Двоскина «Технико-экономическое сравнение открытых и закрытых распределительных устройств 110 и 35 кв».	8	90	По страницам технических журналов					
Библиография								
Вильчур Л. М.—Книга Л. Е. Эбина и Алукера Ш. М. «Электрический расчет сетей с использованием земли в качестве одного из фазных проводов (два провода—земля)».	9	95	Новая серияrudничных взрывобезопасных электродвигателей мощностью до 100 квт типа «Кузбасс».	6	77			
Комар Е. Г.—Книга И. А. Сыромятникова «Вопросы эксплуатации синхронных генераторов».	2	95	Многоскоростные электродвигатели для станкостроения.	9	81			
Кучма К. Г.—Книга И. Я. Рыжковского «Типовые подстанции».	10	93	Зарубежом					
IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ								
Статьи								
Алябьев М. И.—Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока.	5	23	Крайз А. Г.—Трансформаторостроение в Чехословакии.	7	89			
Аронов Р. Л.—Нагревание электродвигателей при повторнократковременной работе	10	13	Крайз А. Г.—Трансформаторы для авиационных электротехнических установок.	8	81			
Артемьев А. И.—Аналитическое определение характеристик асинхронного преобразователя частоты.	2	40	Митрофанов В. Г.—Охлаждение электрических машин парообразованием.	4	73			
Архангельский Б. И.—Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин.	3	30	Тимофеев А. Б.—Униполлярный генератор с компенсацией реакции якоря.	8	82			
Бычков В. И.—Переходные режимы двигателя независимого возбуждения при переменном потоке и напряжении.	3	44	Заметки и письма					
Говорков В. А.—К расчету сердечников.	4	47	Бергер А. Я.—К вопросу о параметрах короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя	12	64			
Горюхов Н. В.—Регулировочные характеристики серийной машины при шунтировании обмотки возбуждения.	6	17	Карасев В. А.—К вопросу о рассмотрении градиентов перенапряжения в обмотках в виде бегущей волны.	3	92			
Хроника								
Обсуждение книг по электрическим машинам во ВНИТОЭ.								
Пленум секций электрических машин ВНИТОЭ и Техсовета МЭП СССР.								

Продолжение

Авторы и названия материалов	№ журнала	Стр.	Авторы и названия материалов	№ журнала	Стр.
Библиография			Рубцов П. А. — О типе и мощности электродвигателей для привода молочных сепараторов.	10	18
Ганелин А. М. — Книга Е. Л. Шаца «Ремонт асинхронных электродвигателей и трансформаторов».	6	94	Ульяновский Н. А. и Смирнов Б. В. — О средствах связи в сельских распределительных высоковольтных сетях.	10	50
Грузов Л. Н. — Книга М. П. Костенко «Электрические машины».	4	92	Изопоземец С. П. — Книга В. Д. Голоперова «Ремонт электрического оборудования».	3	95
Фейлер Л. Б. — Книга И. А. Сыромятникова «Режимы работы асинхронных двигателей».	12	88	Клоков Н. И. — О типе кабеля для электротракторов.	12	55
V. ЭЛЕКТРОПРИВОД			По страницам технических журналов		
Статьи			Зарубежом		
Каспржак Г. М. и Персик З. М. — Асимметричное регулирование асинхронной машины для привода с вентиляторным моментом	12	25	Будзко И. А. — Опыт применения подземного кабеля в сельских сетях.	1	76
Каялов Г. М. — Теория и расчет рационального электрического привода с машиком.	4	7	Хроника		
Лейбович Е. А. — Несимметричное включение двух асинхронных двигателей, работающих на общий вал.	9	37	Обсуждение серии брошюр в помощь сельскому электромонтеру.	10	92
Морозов Д. П. — Энергетика переходных процессов постоянного тока.	7	38	Конференция-курсы по эксплуатации сельских электроустановок	12	87
Ракита В. С. — Электропривод с переменной массой.	8	27	Библиография		
Созонов В. Г. — Механические характеристики двигателя в системе генератор-двигатель с обратными связями.	12	21	Ганелин А. М. — О серии брошюр «В помощь сельскому электромонтеру».	10	95
Чернявский Ф. И. — Каскад асинхронного двигателя с ртутным выпрямителем.	6	38	Секторов В. Р. — Книга Н. К. Кузнецова, А. П. Златковского «Сельскохозяйственные гидроэлектростанции».	1	90
По страницам технических журналов			VIII. ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ (ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ АППАРАТУРА, ГРОЗОЗАЩИТА)		
К истории развития советского электропривода.	2	85	Статьи		
О возможности коммутируемого приводного двигателя в реверсивной системе Леонарда.	2	86	Акопян А. А., Ларинов В. П. и Розенберг Д. В. — Экспериментальное исследование индуктированного напряжения на модели линии.	11	22
Зарубежом			Буткевич Ю. В. — Гашение открытой дуги переменного тока в установках высокого напряжения.	3	3
Гейлер Л. Б. — Асинхронный электропривод с ударной нагрузкой.	3	79	Долгинов А. И. — Атмосферные перенапряжения на линиях электропередачи и расчет грозоупорности линий с трассами	12	6
Хроника			Каплан В. В. и Напатарь В. М. — Схема электрического сдвига начала прохождения тока.	2	76
Научно-техническая сессия по электроприводу в текстильной промышленности	12	85	Кухаркин Е. С. — Замечания о расчете предразрядного тока смещения в длинных искровых промежутках.	10	35
Библиография			Линниченко Н. Н. — О нормировании восстанавливающегося напряжения.	6	53
Хализев Г. П. — Книга А. С. Сандлера «Электрооборудование металлорежущих станков».	6	92	Семчинов К. М. и Шинин Д. В. — Грозовые поражения и защита сельских сетей низкого напряжения.	10	37
VI. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА			Стукачев А. В. — О некоторых вопросах методики расчета импульсных генераторов напряжения.	9	39
Статьи			Холяевский Г. Б. — Графоаналитический метод определения электродинамических усилий в высоковольтных аппаратах.	6	58
Быков Е. И., Гуревич В. Г. и Туманов В. А. — Развитие энергохозяйства Московского метрополитена	7	23	Цейтров Е. М. — Гашение электрической дуги потоком сжатого воздуха.	10	27
Галонен Ю. М. — Износустойчивые контактные вставки для токоприемников трамвая.	10	41	Чернышев Н. М. — Схема синхронизации для испытания высоковольтных выключателей в искусственном режиме.	4	36
Галонен Ю. М. — Учет электроэнергии в вагонах трамвая.	12	42	По страницам технических журналов		
Кальман В. С. — Особенности распределения блуждающих токов магистральной дороги.	11	33	Разъединители наружной установки на 154 и 220 кв	1	75
Ломазов Д. Б. — Измерение максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях электрического транспорта.	9	31	Зарубежом		
Лыткин Г. К. — Электрическая плавка гололеда в контактных сетях.	11	28	Линниченко Н. Н. — Воздушные выключатели фирмы Метрополитен-Виккерс	5	74
Мазурский Э. М. — Критический пролет цепной подвески.	1	32	Заметки и письма		
Степанов А. Д. — Тепловозостроение за 25 лет.	9	23	Гессен В. Ю., Корсунцев А. В. и Шибанов В. К. — По поводу статей И. Е. Балыгина «Поведение плавких предохранителей при ударных токах большой силы» и ответ И. Е. Балыгина.	4	85
Филаретова А. С. — Исследование потерь при передаче энергии электромагнитной индукции через поглощающую среду.	8	45	IX. ИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА		
Шацев Н. З. — Защита устройств СЦБ от влияния электротягии переменного тока.	12	45	Статьи		
По страницам технических журналов			Акодис М. М. — Нарастание обратного напряжения при коммутации в ионных вентилях.	6	46
Зарубежом			Залманов В. Б. — Импульсный дроссельный каскад.	4	43
Вислоух М. А. — Защита от коротких замыканий электротяговых сетей постоянного и переменного тока.	2	86	Маевский О. А. — Обобщенная диаграмма работы ионного электропривода.	10	23
Вислоух М. А. — Новые электровозы однофазного тока нормальной частоты венгерских государственных железных дорог.	3	73	Хлебников Н. С. — Фотоэлементы.	4	56
Хроника			По страницам технических журналов		
Встреча работников науки и стахановцев городского электротранспорта.	6	89	Усиление токов кристаллическими триодами.	7	89
Библиография			X. АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА, ТЕХНИКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И НИЗКОВОЛЬТНАЯ АППАРАТУРА		
Галенс Ю. М. — Книга С. Г. Блантера «Электрическое обсуждение тяговых подстанций».	1	94	Статьи		
Чеботарев Е. В. — Книга К. Г. Марквардта «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог».	7	93	Атабеков Г. И. — Новый принцип выполнения направленной дистанционной защиты.	1	3
VII. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА			Атабеков Г. И. — Общие принципы выполнения дистанционных омметров.	6	3
Статьи			Барский С. З. — Анализ схем электропривода с падающей характеристикой.	5	35
Дмитриев В. М. и Шустов В. А. — Электропередачи с использованием однопроводных переносных линий.	11	38			
Кости К. Ф., Нейман З. Б. — Гидрогенераторы для сельской электрификации.	7	16			
Павлов Э. А. и Осипов А. И. — Электропилы трехфазного тока 200 гц для лесозаготовок.	7	44			

Продолжение

Авторы и названия материалов			№ жур-нала	Стр.	Авторы и названия материалов			№ жур-нала	Стр.
Беляев М. В.—Переходные режимы в простейшей схеме электромашинной автоматики.	6	42			Майоров Ф. В.—Электрическое изображение функций.			11	51
Богословский А. С.—Графический метод анализа и расчета ферромагнитных усилителей мощности.	10	52			Мильштейн В. Н.—Общий метод оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем.			5	47
Борисов В. А.—Электромашинный усилитель в двигательном режиме.	8	21			Миренский М. С.—Измерение малой мощности переменного тока при помощи амперметра.			9	74
Бычков В. И.—Теория и метод расчета системы генератор-двигатель с электромашинным регулятором.	2	33			Перетц В. Б.—Влияние параметров измерительной цепи и формы кривой намагничивания на работу измерительного трансформатора постоянного тока.			2	66
Лурье А. Г.—Приближенный расчет основных зависимостей в феррорезонансных стабилизаторах напряжения.	10	67			Синельников Е. М. и Сомихина Г. С.—Измерение врашающихся моментов асинхронных двигателей при разбеге.			7	48
Марыновский Д. И.—Изменение параметров систем регулирования внутренними связями.	2	21			Фюрстенберг А. И.—Стрелочный прибор в качестве индикатора равных показаний и измерение полных сопротивлений.			8	63
Марыновский Д. И.—Исследование устойчивости системы регулирования при введении внутренних связей.	3	51			По страницам технических журналов			2	85
Ратгауз И. И.—Масляные селеновые выпрямители.	3	51			Применение электростатического генератора в измерительной технике.			6	78
Ратгауз И. И. и Дохман С. А.—Глубокое регулирование напряжения постоянного тока дросселями насыщения.	9	54			Метод измерения внутреннего последовательного сопротивления конденсатора в условиях разряда.			12	83
Рывкин А. М.—Амплитудный метод расчета дросселей насыщения.	5	44			З а р у б е ж о м			12	81
Снагин В. Т.—Взрывобезопасные штепсельные соединения для кабелей угольных шахт.	8	57			Тимофеев А. Б.—Определение толщины изоляции для самолетных электродвигателей			1	92
Соколов А. А.—Релейные усилители постоянного тока.	9	51			З а м е т к и и п и сь м а			1	93
Финк В. Л.—Исследование спекания контактов реле.	11	71			Гордон В. И., Клуцман И. Ю.—Измерение сопротивления методы полиметра и амперметра.			6	91
Щепетов В. Н.—Расчет электроискрового станка.	6	26			Б и б л и о г р а ф и я			5	93
Эттингер Е. Л.—Применение метода относительных единиц к расчету точности регулирования статических систем.	11	57			Воробьев А. А.—Книга И. С. Стекольникова «Электронный осциллограф».			1	92
И з о п т а р а б о т ы									
Лехтман И. Я.—К расчету электромагнитов постоянного тока.	12	66			Крапивинский Л. Л.—Книга Н. Г. Вострокутова «Техника измерений электрических и магнитных величин».			5	47
Огородников С. И.—К вопросу проектирования схем управления блокированными механизмами литейных цехов.	1	53			Майоров Ф. В.—Книга П. М. Пфлиер «Электрическое измерение механических величин».			6	16
П о с т р а н и ц а м т е х н и ч е с к и х ж у р н а л о в									
Управление однофазным двигателем с экранированными полюсами в приборах автоматического контроля.	1	75			XIV. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ			1	13
Новые электронные реле напряжения.	2	85			С т а т ь и			5	19
Приближенный расчет параметров стабилизирующего трансформатора.	3	72			Водопьянов К. А.—Дизэлектрические свойства слюды.			11	78
Динамический метод исследования электрического контакта.	5	71			Зингерман А. С.—Определение пробивного напряжения по испытаниям образцов.			3	47
Эксплоатация автоматического регулятора напряжения для синхронных машин мощностью до 60 ква.	8	80			Ренне В. Т.—Расчет электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги.			5	80
З а р у б е ж о м								1	80
Аносов Ю. И.—Магнитоэмульсионные муфты.	6	78			Таресов Б. М. и Парис Я. М.—Нагревостойкая пористая изоляция.			5	13
Тимофеев А. Б.—Тепловой автомат для самолетного генератора.	9	81			Шистер А. Б.—Электрические свойства некоторых материалов в полях высокой частоты.			5	19
Б и б л и о г р а ф и я								1	85
Марыновский Д. Н.—Книга Г. Лауэр, С. Лесник, Л. Мадсон «Основы теории сервомеханизмов».	1	93			Сверхпроводимость сплава висмута с натрием.			2	72
Марыновский Д. И.—Книга Р. Ольденбург и Г. Сарториуса «Динамика автоматического регулирования».	6	93			Новый способ сохранения древесины.			5	72
Негневицкий И. Б. и Ратгауз И. И.—Книга М. А. Розенблата «Магнитные усилители».	8	94			О применении проводов с полихлорвиниловой изоляцией и кабелей с полихлорвиниловой защитной оболочкой.			5	80
X I. КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА								8	80
Б и б л и о г р а ф и я								8	80
Лакерник Р. М. и Шарле Д. Л.—Книга М. Ю. Поповерстника и Н. Г. Туркина «Производство кабелей связи».	6	94			З а р у б е ж о м			8	81
X II. СВЕТОТЕХНИКА								12	83
С т а т ь и								5	73
Карасев В. А.—Аппараты зажигания и питания люминесцентных ламп.	12	50			Казарновский Л. И.—Постоянные магниты из порошкообразного железа.			5	84
П о с т р а н и ц а м т е х н и ч е с к и х ж у р н а л о в								12	83
Характеристика дугового разряда в ионных газах при сверхвысоком давлении.	6	77			Казарновский Л. И.—Потери в листовой электротехнической стали.			5	73
З а м е т к и и п и сь м а								5	73
Казин Н. Ф.—К статье М. С. Рябова «Осветительные установки промышленных предприятий» и ответ Н. Ф. Рябова.	1	59			Ренне В. Т.—Керамические конденсаторы высокого напряжения.			3	84
X III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРИБОРЫ И ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ								3	84
С т а т ь и								1	85
Боголюбов В. Е.—Экспериментальное определение кривой измерения среднего тока.	5	57			Комиссия по диэлектрикам при Академии наук СССР.			2	91
Дубинин А. М. и Левитов В. И.—Новый катодный осциллограф на 20 кв.	11	64			Сибирское совещание по электрической изоляции.			7	91
Иноземцев С. П.—Детекторные вектормерные устройства.	10	61			25-летие Всесоюзного бюро электрической изоляции ВНИТОЭ.			8	89
Куликовский Л. Ф. и Мелик-Шахназаров А. М.—Измерение толщины немагнитных покрытий.	8	67			Обсуждение справочника по электрической изоляции в МОНITOЭ.			5	89
Б и б л и о г р а ф и я								8	92
Вепдерович А. М. и Водопьянов К. А.—Книга Г. И. Сканави «Физика диэлектриков».								8	92
X V. ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ И ЭЛЕКТРОСВАРКА								8	92
С т а т ь и								8	92
Беляев М. Б.—Автоматическое регулирование электрической дуги.								12	37
Дершварц Г. В.—Динамические усилия в расплаве индукционных печей.								12	33
Донской А. В.—Автоматическое регулирование мощности в высокочастотных установках для диэлектрического нагрева.								10	46
Удерман Э. Г.—Измерение мощности и углы потерь при высокочастотном диэлектрическом нагреве.								6	63
Устинов В. В. и Коган М. Г.—Высокочастотная установка с колебательным контуром полого типа.								7	65

Продолжение

Авторы и названия материалов	№ журнала	Стр.	Авторы и названия материалов	№ журнала	Стр.		
Из опыта работы							
Вайнберг А. М.— Электромашинные автоматические регуляторы дуговых сталеплавильных электропечей.	3	65	Ракушев И. Ф.— Больше внимания памяти выдающихся русских электротехников.	5	87		
Щедровицкий Я. С.— Электронагрев при получении кремнистых ферросплавов.	3	70	XVIII. РАЗНОЕ				
По страницам технических журналов							
Внедрение высокочастотной электросушки пиломатериалов. Клейка фанеры в электрическом высокочастотном поле. Размещение групповых электродов при электропрогреве бетонных железобетонных конструкций.	5	72	Кравченко В. С.— Открытое электрическое искрение в воспламеняющейся рудничной атмосфере.	2	70		
	5	73	Номограмма для определения $\cos\phi$ при равномерной нагрузке фаз трехфазной системы по показаниям двух ваттметров.	5			
	12	82	Номограмма для определения превышения температуры в процессе нагревания тела.	6			
			Номограмма для определения потерь в медном проводе при 75°C по весу провода и плотности тока.	8	на 3-й стр. обл.		
Хроника							
Конференция читателей сборника «Электротермия». В сессиях электротермии МОНТОЭ и Дома инженера и техника им. Дзержинского.	1	85	Номограмма для определения сопротивления одного метра провода при различной температуре.				
	6	90	Хроника				
Библиография							
Дершвард Г. В.— Книга С. А. Фарбмана и И. Ф. Колбенева «Индукционные печи для плавки металлов и сплавов».	4	93	(Совещания, конференции, заметки)	2	91		
Донской А. В.— Книга М. Г. Лозинского «Поверхностная закладка и индукционный нагрев стали».	4	95	Научно-техническое совещание по газоочистке.	8	87		
XVI. СТАНДАРТЫ И НОРМЫ			Научная сессия, посвященная «Дню радио» в Москве.	9	92		
Шрамков Е. Г.— О классификации электроизмерительных приборов.	7	80	Конференция авторов журнала «Электричество». О золотой медали А. С. Попова.	9	94		
Номинальные напряжения стационарных электрических сетей. Проект стандарта.	1	77	(В научных обществах и институтах)				
Временные руководящие указания по защите сельского населения от поражения атмосферными перенапряжениями, вносимыми в дома воздушными сетями напряжением до 1 000 в.	10	39	В НТО МЭИ им. Молотова.	1	84		
Дискуссии			Организации ВНИТОЭ в движении за содружество учеников и производственников.	2	90		
К проекту стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей (№ 1, 1950).	5, 6, 7, 8	78, 85, 85, 85	Пленум ВНИТОЭ	2	92		
XVII. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ			В Азербайджанском отделении ВНИТОЭ.	10	92		
Статьи			(Юбилейные даты).				
Войтинская Д. М.— Книга «План электрификации РСФСР».	12	69	Профессор Б. П. Апаров.	1	87		
Гаккель Е. Я.— Тепловозы с электрической передачей.	2	78	Профессор Н. Г. Дроздов.	10	92		
Первая электротехническая выставка (1880 г.).	5	66	Профессор Д. А. Завалишин.	8	91		
Подолякова Е. С.— Опыты И. В. Мицуринца по применению электричества.	10	86	Академик А. Ф. Иоффе.	1	85		
Старейший русский журнал по распространению научных и технических знаний об электричестве (1880—1950).	7	68	Член-корр. АН СССР, профессор М. П. Костенко.	1	87		
Храмовой А. В.— О двух важных этапах в истории электротехники.	12	72	Профессор А. Н. Ларионов.	1	87		
Храмовой А. В.— Константинов—пioneer электроавтоматики.	2	82	Профессор М. Ф. Поярков.	3	95		
Шаталов М. А.— Первый всероссийский электротехнический съезд.	1	60	Профессор В. А. Привезенцев.	10	92		
Шаталов М. А.— Работы Б. С. Якоби в области электрических измерений.	9	67	Инженер-изобретатель Л. Г. Ращковский.	5	86		
Библиография			(Некрологи и памятные даты).				
Авторефераты диссертаций.			Профессор Б. П. Апаров.	7	92		
			Профессор М. А. Бонч-Бруевич.	6	88		
			Профессор В. П. Володин.	12	88		
			Профессор А. А. Глаголева-Аркадьева.	11	93		
			Профессор Н. С. Жданов.	1	89		
			Профессор Е. А. Сырский.	1	88		

Алфавитный указатель авторов

A	Булгаков К. Е. 5, 82 Буль Б. К. 5, 10 Бургучев С. А. 1, 40 Буткевич Ю. В. 3, 3 Быков Е. И. 7, 23 Бычков В. П. 2, 33; 3, 44	Глазунов А. А. 4, 79; 5, 77; 9, 89 Глейзер М. Д. 3, 91 Говорков В. А. 4, 47 Гордон В. И. 12, 81 Горев А. А. 1, 82 Горенштейн М. Д. 6, 85 Горохов Н. В. 6, 17 Грузов Л. Н. 4, 92 Гурвич В. Г. 7, 23	
Айзенберг В. Л. 8, 39 Акодис М. М. 6, 46 Акопян А. А. 11, 22 Алябьев М. И. 5, 23 Аносов Ю. И. 6, 78 Антонов В. Н. 5, 78 Аронов Р. Л. 10, 13; 12, 64 Артемьев А. И. 2, 40 Архангельский Б. И. 3, 30 Атабеков Г. И. 1, 3; 2, 93; 6, 3;	Вайнберг А. М. 3, 65 Вайнер Л. А. 4, 80 Вексельман О. Г. 8, 83 Вендерович А. М. 8, 92 Веников В. А. 7, 8 Вильчур Л. М. 9, 95 Риницкий А. М. 8, 37 Винтер А. В. 11, 82; 12, 3 Вислоух Л. А. 2, 86; 3, 73 Водопьянов К. А. 8, 92; 11, 78 Вендерович А. М. 8, 92 Войгинская Д. М. 12, 69 Воробьев А. А. 5, 93 Воронов Р. А. 1, 23; 8, 3,	Двоскин Л. И. 4, 84; 5, 32 Дершвард Г. В. 4, 93; 12, 33 Дмитриев А. Н. 5, 75 Дмитриев В. М. 11, 38 Долгинов А. И. 12, 6 Донской А. В. 4, 95; 10, 46 Дохман С. А. 5, 44 Лубинин А. М. 11, 64 Дубинский Л. А. 6, 81 Дунаевский С. Я. 5, 34;	
B	Бабат Г. И. 7, 59; 10, 81 Балыгин И. Е. 4, 86 Барский С. З. 5, 35 Беляев М. Б. 6, 42; 12, 12 Беляков А. П. 8, 78; Бененсон Б. Е. 3, 87 Бергер А. Я. 12, 80 Берендеев А. В. 12, 78 Берсыков Ф. Е. 7, 88 Бессонов Л. А. 5, 61; 8, 50 Богатырев О. М. 8, 71 Боголюбов В. Е. 3, 56; 3, 90; 5, 57; 9, 64 Богородицкий Н. П. 10, 93 Богословский А. С. 10, 5 Борисов В. А. 8, 21 Брагин С. М. 3, 81 Будзко И. А. 1, 76	Гаккель Е. Я. 2, 78 Галонец Ю. М. 1, 94; 10, 41; 12, 42 Ганелин А. М. 6, 94; 10, 95 Гейлер Л. Е. 3, 79; 12, 88 Гельбух Л. А. 8, 37 Гершенгорн А. И. 5, 83 Гессен В. Ю. 4, 85 Гинзбург С. А. 9, 68	E
		Енько В. В. 1, 47; 6, 31 Ермилов А. А. 1, 7; 8, 83 Ермолин Н. П. 1, 44	
		3	
		Зайцев И. А. 2, 3 Залесский А. М. 4, 83	

Залманзон В. Б. 4, 43

Зархин М. М. 9, 89

Захарин А. Г. 5, 79

Зевске Г. В. 5, 88

Зингерман А. С. 3, 47

И

Иванов-Смоленский А. В. 6, 21

Ильин В. А. 2, 53

Иноземцев С. П. 3, 95; 10, 61

Ионкин П. А. 5, 88; 11, 74

К

Казарновский Л. И. 3, 72; 8, 81; 12, 83

Казин Н. Ф. 1, 59

Казовский Е. Я. 4, 14; 8, 14

Калантаров П. Л. 4, 78; 5, 6; 5, 92; 10, 89

Кальман В. С. 11, 33

Каменя И. М. 7, 54; 11, 42

Каплан В. В. 2, 76

Карасев В. А. 3, 92; 12, 50

Карасев М. Ф. 3, 93; 9, 58

Каспряк Г. М. 12, 25

Касьянов В. Т. 2, 92

Кацлов Г. М. 4, 7

Клоков Н. И. 12, 55

Клугман И. Ю. 12, 81

Кнорринг Г. М. 2, 92; 9, 87

Ковалевский И. Л. 6, 81

Коган М. Г. 7, 65

Коган М. А. 8, 86

Комар Е. Г. 2, 95

Коник Б. Е. 2, 60

Королев В. Н. 3, 87

Корсунцев А. В. 4, 85

Костенко М. Н. 9, 5

Костики К. Ф. 7, 16

Кравченко В. С. 2, 70

Крайз А. Г. 7, 89; 8, 81

Крапивенский Л. Л. 6, 91

Красногородцев С. А. 9, 82

Красоткин В. Н. 3, 85

Крачковский Н. Н. 4, 31; 5, 78; 5, 86

Крикунчик А. Б. 6, 87

Куликовский Л. Ф. 8, 67

Кухаркин Е. С. 10, 35

Кучма К. Г. 10, 93

Л

Лакерник Р. М. 6, 94

Ларионов В. П. 11, 22

Лебедев М. М. 6, 81

Лебедев П. Д. 1, 47

Левинтов С. Д. 7, 64

Левитов В. И. 11, 64

Лейбович Е. А. 9, 37

Лехтман И. Я. 12, 66

Лившиц Д. С. 11, 9

Лившиц С. М. 1, 80

Лининиченко Н. Н. 5, 74; 6, 53

Лобанов Р. Н. 7, 54

Ломазов Д. Б. 9, 31

Ломоносов В. Ю. 5, 91

Лопухина Е. М. 5, 26

Лурье А. Г. 10, 67

Лыткин Г. К. 11, 28

М

Маевский О. А. 10, 23

Мазурский Э. М. 1, 32

Майоров Ф. В. 1, 92; 11, 51

Маркович И. М. 7, 30

Марьиновский Д. И. 1, 93; 2, 21; 3, 51;

6, 93

Матюхин В. М. 3, 38

Медведский Н. И. 5, 76

Мелик-Шахназаров А. М. 8, 67

Мешель В. С. 12, 78

Мильштейн В. Н. 5, 47

Миренский М. С. 4, 82; 9, 74

Митрофанов В. Г. 4, 73

Мокрицкий Ф. Д. 12, 60

Мондруц Д. Б. 9, 86

Морозов Д. П. 7, 38

Мукосеев Ю. Л. 6, 85

Мусатов Т. П. 4, 81

Н

Найфельд М. Р. 4, 80

Нашатырь В. М. 2, 76

Негиевицкий И. Б. 8, 94

Нейман З. Б. 7, 16

Нейман Л. Р. 1, 18; 2, 3; 5, 92

Неступил А. В. 3, 9; 5, 90; 8, 53;

О

Огороднов С. И. 1, 53

Окуни С. С. 5, 3

Осипов А. И. 7, 44

П

Павлов Э. А. 7, 44

Парнас Я. М. 1, 13

Певзнер О. Б. 3, 33

Перекалин М. А. 9, 95; 11, 94

Перецт В. Б. 2, 66

Персиц Э. М. 12, 25

Петров Г. Н. 5, 3

Печорина И. Н. 11, 47

Пинчук И. С. 2, 47

Погосян С. А. 3, 86

Подольский Л. П. 12, 80

Покрас М. П. 3, 60

Полетаева Е. С. 10, 86

Половой И. Ф. 6, 83

Полтава Л. И. 6, 36

Привезенцев В. А. 3, 88

Приклонский Е. Н. 4, 24; 6, 80; 11, 3

Пухов Г. Е. 1, 25; 5, 55

Р

Рабинович С. И. 7, 87

Разевит Д. В. 11, 22

Ракита В. С. 8, 27

Ракушев Н. Ф. 5, 87; 6, 82

Расовский Э. И. 9, 60

Ратгауз И. И. 5, 44; 8, 94; 9, 54

Резин М. Г. 2, 51

Рение В. Т. 5, 16; 5, 73; 6, 78

Ризкин А. А. 9, 66

Розанов Г. М. 7, 8; 8, 32

Розенблат М. А. 2, 9

Розенштейн Л. Я. 11, 90

Ромашкин Н. И. 2, 87; 3, 74; 4, 74

Рубцов П. А. 10, 18

Рыжкин А. М. 3, 89; 8, 57

Рыбов М. С. 1, 59; 11, 17

С

Садовский К. А. 11, 89

Самсонов И. М. 6, 72

Сандлер А. И. 5, 75

Секторов Б. Р. 1, 90

Семчинов К. М. 10, 37

Сербиновский Г. В. 6, 67; 11, 86

Синельников Е. М. 7, 48

Сисоян Г. А. 9, 16

Смирнов Б. В. 10, 48

Смирнов К. А. 1, 34; 1, 78

Снагин В. Т. 9, 51

Соловьев С. А. 7, 30

Созонов В. Г. 12, 21

Соколов А. А. 10, 72

Соколов Н. Н. 7, 8

Соловьев П. Ф. 10, 88

Сомихина Г. С. 7, 48

Степанов А. Д. 9, 23

Степанов Н. Н. 2, 13

Столов Л. И. 8, 85

Страхов С. В. 2, 43; 5, 90

Стукачев А. В. 9, 39

Т

Тареев Б. М. 1, 13; 3, 86

Тейхман Л. Ф. 5, 76

Тер-Газарян Г. Н. 8, 8

Терентьева М. П. 3, 87

Тимофеев А. Б. 8, 82; 9, 81; 11, 85; 12, 83

Трифель М. С. 10, 89

Трофименко Д. Е. 6, 6

Туманов В. А. 7, 23

У

Убееев В. П. 9, 58

Удерман Э. Г. 6, 63

Ульяновский Н. А. 10, 50

Устинов В. В. 7, 65

Ф

Фалеев В. А. 9, 58

Фикс В. Л. 11, 71

Филаретова А. С. 8, 45

Фрид Е. С. 9, 45

Фюрстенберг А. И. 8, 63

Х

Хализев Г. П. 6, 92

Харчев М. К. 9, 83

Хлебников Н. С. 4, 56

Холмский В. Г. 4, 66

Холявский Г. Б. 6, 58

Храмой А. В. 2, 82; 12, 72

Ц

Цейтлин Л. А. 5, 6

Цейтлин М. И. 6, 13

Цейров Е. М. 10, 27

Ч

Чеботарев Е. Б. 7, 93

Чернявский Ф. И. 6, 38

Чернышев Н. М. 4, 36

Чечет Ю. С. 3, 19; 10, 5

Чистов Н. В. 12, 15

Щ

Шарле Д. Л. 6, 94

Шатален М. А. 1, 60; 5, 78; 9, 76

Шацер Н. З. 12, 45

Шехтман И. В. 3, 24

Шибанов В. К. 4, 85

Шистер А. Б. 5, 19

Шиншман Д. В. 10, 37

Шрамков Е. Г. 7, 80

Шрейбер В. П. 3, 91

Шубенко В. А. 2, 47

Шустов В. А. 11, 38

Э

Эбин Л. Е. 5, 79

Эттингер Е. Л. 11, 57

Эфенди-Заде А. А. 12, 19

ПОПРАВКА

В статье „Обсуждение книг по электрическим машинам во ВНИТОЭ («Электричество», № 4, 1950) начально последнего абзаца правой колонки на стр. 91-й следует читать: «Е. Я. Казовский сообщил о высокой оценке книги А. Е. Алексеева, данной Бюро секции электрических машин ВНИТОЭ, и затем остановился...»

ЦЕНА 8 РУБ.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ОТКРЫТА ПОДПИСКА

на ежемесячный
научно-технический журнал

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Академии наук СССР,
Министерства электростанций СССР и Министерства
электропромышленности СССР

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

Журнал широко освещает основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и электрификации народного хозяйства СССР.

Журнал „Электричество“ уделяет особое внимание вопросам внедрения новой передовой электротехники во всех отраслях народного хозяйства СССР.

В журнале освещаются новые научно-технические проблемы, связанные с величайшими сооружениями Сталинской эпохи — Куйбышевской и Сталинградской гэс, Главным Туркменским каналом и другими энергетическими стройками.

Журнал систематически освещает вопросы истории русской электротехники.

В журнале принимают участие виднейшие ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

Подписка на журнал „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ принимается во всех отделениях Союзпечати и во всех почтовых отделениях

12 номеров в год

(144 печатных листа)



ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

12 месяцев	96	руб.
6 "	48	"
3 "	24	"

Годовым подписчикам на журнал будет выслан в качестве приложения карманный календарь-справочник на 1951 г.