

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



1957

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

2

СОДЕРЖАНИЕ

Вопросы электрификации железных дорог	1
А. В. Воронин — Перспективы применения в СССР электрической тяги на однофазном токе	1
Д. К. Минов — Задачи по внедрению системы электрической тяги на однофазном токе	5
К. Г. Марквардт — Техничко-экономические вопросы систем электрической тяги	11
А. А. Глазунов — Давление ветра на провода и тросы	15
Н. М. Мельгунов — О перспективах применения электропередач постоянного тока в Советском Союзе	16
М. Д. Каменский, Б. Л. Айзенберг и Н. И. Медведский — Об одной из мер экономии цветного металла в городских сетях	21
Ю. Р. Рейнгольд — Устойчивость электромашинного усилителя с отрицательной гибкой обратной связью	25
А. Д. Дроздов — Схемы дифференциальных защит с магнитным торможением	33
О. М. Богатырев — Модификация формулы Хевисайда	36
А. Г. Богущ — О „броске“ намагничивающего тока при включении трансформатора	38
К. Н. Борисов — Регулирование скорости двигателя постоянного тока при помощи дросселей и полупроводников	40
О. Н. Браткова — Рабочий процесс контактной машины с накоплением энергии в магнитном поле	43
И. И. Трещев — Исследование машин переменного тока при переменной скорости вращения	49
А. Б. Ослон — Об измерении сопротивлений заземления	56
М. В. Грейсхух — Выбор напряжения для двигателей средней мощности	59
Х. Р. Малкин — Современные конструкции зарубежных высоковольтных кабелей	64
Н. С. Сиунов и Л. Н. Кубраков — Двухпоточная электропередача механической мощности	71
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	75
В. А. Иванов и К. Н. Осолков — Защита шин постоянного тока на тяговых подстанциях метрополитена	78
М. М. Фархадзаде и М. Н. Алиев — Упрощение пусковой автоматики синхронного двигателя	80
В. И. Долина — Применение униполярной машины для измерения скорости вращения	80
[Михаил Андреевич Шателен]	83

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ

Гидроэнергетические ресурсы Финляндии. Перенапряжения при отключении трансформатора. Электрификация английских железных дорог на однофазном токе. Повышение мощности действующих синхронных генераторов

ХРОНИКА

В Техническом управлении МЭС СССР Конференция читателей в г. Кемерово. Профессор Л. М. Пиотровский. Профессор Д. П. Морозов. Профессор Т. П. Губенко.

БИБЛИОГРАФИЯ

М. М. Маркосян, К. В. Сидоров, Л. И. Мачерет — Книга В. А. Привезенцева. „Производство силовых кабелей“ Н. П. Ермолин, Г. С. Мавромати, и И. Т. Талышинский. Книга Г. Н. Петрова „Электрические машины“
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

CONTENTS

Problems of railway electrification	1
Perspectives for single-phase traction systems in the U. S. S. R. — A. V. Voronin	1
Problems in installing single-phase traction systems — D. K. Minov	5
Technical and economic questions of traction systems — K. G. Markvardt	11
Wind pressure on conductors and ground wires — A. A. Glazunov	15
On the perspective use of d. c. transmission in the U. S. S. R. — N. M. Melgunov	16
One way of economizing non-ferrous metals in urban networks — M. D. Kamenski, B. L. Eisenberg, N. I. Medvedski	21
The stability of an amplidyne with first derivative negative feedback — U. R. Reingold	25
A differential relay with magnetic biasing — A. D. Drozdov	33
A modification of Heavyside's formula — O. M. Bogatiryov	36
Concerning the magnetizing current „surge“ in connecting a transformer — A. G. Bogush	38
Speed regulation of a d. c. motor using transducers and semiconductors — K. N. Borisov	40
The working process of a contact machine accumulating magnetic field energy — O. N. Bratkova	43
A study of a. c. machines rotating at variable speeds — I. I. Treschev	49
On measuring earth resistances — A. B. Ozlon	56
Voltage selection for medium-size motors — M. V. Gray-suck	59
Modern designs of foreign high-voltage cables — H. R. Malkin	64
A „double“ electrical transmission for mechanical power — N. S. Syunov, L. N. Kubrakov	71

FROM OPERATING EXPERIENCE

D. C. bus protection at the Metro's traction substations — V. A. Ivanov, K. N. Oskolkov	75
Simplifying the automatic controls for starting a synchronous motor — M. M. Farhadza'ze, M. N. Afiev	78
Using an acyclic machine for speed measurement — V. I. Dolina	80
[Michael Andrew Shatelen]	83

IN OTHER ENGINEERING JOURNALS	85
CHRONICLE	92
BIBLIOGRAPHY	94



Вопросы электрификации железных дорог

К читателям

Дальнейшее успешное развитие работ по электрификации советских железных дорог связано с решением ряда научно-технических, а также технико-экономических вопросов. Большие перспективы открывает применение в электрической тяге системы однофазного тока промышленной частоты. Эта система должна внедряться уже в текущие годы.

Решениями XX съезда КПСС предусмотрен серийный выпуск магистральных электропоездов с питанием от сети переменного тока. Электропромышленностью должны быть решены соответствующие важные производственные задачи. Одновременно ожидает своего усовершенствования существующая система электрической тяги на постоянном токе.

Помещая статьи А. В. Воронина «Перспективы применения в СССР электрической тяги на однофазном токе», Д. К. Минова «Задачи по внедрению системы электрической тяги на однофазном токе», К. Г. Марквардта «Технико-экономические вопросы систем электрической тяги», редакция журнала «Электричество» имеет целью продолжить в одном из ближайших номеров журнала обсуждение основных вопросов, рассмотренных в этих статьях, и обращается к читателям с предложением сообщить редакции в самое ближайшее время свои соображения и замечания по указанным вопросам.

Перспективы применения в СССР электрической тяги на однофазном токе

Кандидат техн. наук А. В. ВОРОНИН

Институт комплексных транспортных проблем АН СССР

При электрификации железных дорог в СССР в настоящее время применяется система электрической тяги на постоянном токе напряжением 3 кв. Опыт показал, что электрификация железных дорог на постоянном токе 3 кв требует значительных единовременных затрат и расхода цветного металла, что обуславливается в основном недостаточно высоким напряжением в контактной сети.

Это сказывается тем сильнее, чем больше размеры движения, веса поездов и скорости на электрифицируемых линиях. В связи с этим длительное время наряду с усилиями по совершенствованию системы тяги на постоянном токе проводились работы в направлении изыскания новой, более экономичной системы электрической тяги.

Применение электрической тяги на постоянном токе более высокого напряжения (например,

5...6 кв) наталкивается на серьезные трудности. Величина напряжения при электрической тяге на постоянном токе всегда являлась компромиссом между двумя противоречивыми тенденциями — стремлением, с одной стороны, повысить напряжение, чтобы снизить стоимость устройств электрооборудования (тяговые подстанции и контактная сеть) и сократить затраты на них цветного металла, и, с другой стороны, желанием сохранить напряжение на тяговых двигателях близким к оптимальному значению с точки зрения их конструкции. Известно, что для тяговых двигателей постоянного тока таким оптимальным напряжением является напряжение 600...800 в. В то же время при электрической тяге постоянного тока 3 кв тяговые двигатели уже имеют номинальное напряжение на коллекторе 1,5 кв, а их корпусная изоляция рассчитывается на 4 кв. Дальнейшее

увеличение напряжения системы привело бы к недопустимому снижению надежности работы тяговых двигателей, существенному увеличению их веса на единицу мощности и, следовательно, к ухудшению эксплуатационных показателей электроподвижного состава. Кроме этого, при более высоком напряжении встретились бы серьезные трудности в создании электровозов большой мощности, которые необходимы для вождения поездов большого веса с высокими скоростями. Нельзя забывать, что решение этой задачи встречает трудности уже при 3 кв. Все это приводит к выводу, что при современном состоянии техники для магистральных железных дорог оптимальным напряжением для системы электрической тяги на постоянном токе является 3 кв.

В 1951 г. секцией по научной разработке проблем транспорта Академии наук СССР совместно с Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта Министерства путей сообщения на основе анализа результатов выполненных работ, учета успехов, достигнутых в области выпрямлестроения и электромашиностроения, и итогов дополнительного технико-экономического сравнения эффективности применения различных систем электрической тяги было выдвинуто предложение о необходимости разработки, опытной проверки и подготовки к внедрению системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты повышенного напряжения. Это предложение встретило единодушную поддержку со стороны большинства ведущих специалистов и вскоре были развернуты соответствующие работы.

Построены и испытаны опытные образцы магистральных электровозов однофазно-постоянного тока с ионными преобразователями, закончена электрификация на однофазном токе промышленной частоты опытной линии Ожерелье—Павелец Московско-Курско-Донбасской железной дороги протяженностью 137 км, выполнен ряд научно-исследовательских и проектных работ по системе электрической тяги на переменном токе. В 1956 г. был закончен первый этап испытаний электровозов, устройств электроснабжения и проводной связи на опытной линии.

На основе накопленного опыта в 1955—1956 гг. было проведено подробное технико-экономическое сравнение эффективности электрификации железных дорог на однофазном токе промышленной частоты напряжением 25 кв и постоянном токе 3 кв. Сравнение было выполнено на конкретном полигоне железнодорожных линий общим протяжением 3 500 км (Новосибирск — Иркутск, Дебальцево — Пятихатки и Серпухов — Ростов). Эта работа была рассмотрена и одобрена комиссией Академии наук по новой системе электрической тяги. Затем ИКТП АН СССР составил обобщенные выводы и показатели технико-экономической эффективности применения электрической тяги на переменном токе. Исходя из них, можно дать следующую характеристику показателей эффективности применения электрической тяги на переменном токе.

Единовременные затраты при электрификации железных дорог на однофазном токе промышленной частоты с учетом стоимости электровозов получились на 15...17% меньше (без учета затрат на калибрование линий связи), чем при постоянном токе 3 кв.

Если принять за 100% единовременные затраты при электрификации на переменном токе, то при электрификации на постоянном токе 3 кв затраты по отдельным составляющим соответствуют указанным в табл. 1 (на полигоне 3 500 км).

Как видно из табл. 1, наибольшая экономия достигается на тяговых подстанциях, количество которых при электрической тяге на переменном токе сокращается в 2...3 раза, а их конструкция значительно упрощается. Кроме этого, при электрической тяге на переменном токе во многих случаях оказывается возможным совмещение тяговых и районных подстанций. Экономия, достигаемая в этом случае, не учтена полностью в проведенном сравнении. При электрической тяге на переменном токе существенно ниже затраты на сооружение контактной сети, а сечение ее проводов, как правило, принимается минимально допустимым по условиям обеспечения механической устойчивости контактной подвески (примерно 120 мм² на путь в медном эквиваленте), в то время как при электрической тяге на постоянном токе 3 кв сечение проводов достигает 500 мм² и более на путь в медном эквиваленте. Полученные данные по затратам цветного металла на контактную сеть и тяговые подстанции при сравнении электрической тяги на переменном и постоянном токе приведены в табл. 2.

Таблица 1

Наименование устройств	Переменный ток 25 кв, 50 гц, %	Постоянный ток 3 кв, %
Тяговые подстанции	100	202
Контактная сеть	100	132
Устройства СЦБ	100	82
Вспомогательные устройства и жилые дома	100	113
Внешнее энергоснабжение . . .	100	110
Итого по стационарным сооружениям	100	133
Электровозы	100	103,5
Общие затраты на электрификацию (без затрат по связи) . .	100	120

Таблица 2

Наименование металлов	Расход цветных металлов на 1 км линий, т	
	Переменный ток 25 кв, 50 гц	Постоянный ток 3 кв
Медь и латунь	3,75	8,42
Алюминий	0,10	0,32
Свинец	0,069	0,13

Эксплуатационные расходы, зависящие от системы тяги, при переменном токе до 7% меньше, чем при постоянном токе. В табл. 3 приведены эксплуатационные расходы (в процентах) по устройствам электрификации, зависящие от системы электрической тяги (расходы при электрической тяге на переменном токе приняты за 100%).

При электрической тяге на переменном токе значительно больше опасные и мешающие воздействия на устройств проводной связи. Наиболее вероятным защитным мероприятием в данном случае на ближайший период является кабелирование линий связи. При кабельных линиях обеспечивается высокое качество связи и устраняется возможность нарушения ее работы вследствие атмосферных и других воздействий. Применение кабельных линий позволяет значительно увеличить количество каналов связи и снизить эксплуатационные расходы по содержанию устройств связи. В результате затраты на кабелирование окупаются в сравнительно короткие сроки (3...4 года).

В связи с этим замена воздушных линий связи кабельными является прогрессивным мероприятием технического развития устройств проводной связи, которое во многих случаях будет осуществляться независимо от электрификации железных дорог. Следует отметить, что в ряде стран (например, во Франции и др.) кабелирование линий связи производится при электрификации железных дорог как на переменном, так и на постоянном токе.

Если сложить затраты на электрификацию при однофазном токе промышленной частоты с затратами на кабелирование линий связи, то и в этом случае общие единовременные затраты будут меньше (от 3,4 до 9%), чем затраты на электрификацию при постоянном токе.

Дополнительные затраты цветного металла, связанные с кабелированием линий связи, составляют: свинца 2,3 т/км и меди 0,02 т/км (с учетом возврата меди с существующих воздушных линий связи). В дальнейшем возможно применение кабелей связи с алюминиевой оболочкой.

Широкое применение могут получить на дорогах переменного тока радиорелейные линии связи. Разработка специальной системы радиорелейной связи для железнодорожного транспорта

Таблица 3

Наименование расходов	Переменный ток 25 кв, 50 гц, %	Постоянный ток 3 кв, %
Содержание тяговых подстанций	100	224
Содержание контактной сети	100	100
Расходы по амортизации стационарных устройств	100	140
Расходы по ремонту электровазов	100	100
Стоимость электроэнергии на тягу поездов	100	105
Суммарные эксплуатационные расходы	100	107,5

должна обеспечить все виды железнодорожной связи и устранить воздушные или кабельные линии связи вдоль полотна железной дороги. Применение таких систем радиорелейной связи на железнодорожных линиях, электрифицируемых на переменном токе, вместо устройств проводной связи при кабельных линиях, позволит снизить единовременные затраты на реконструкцию устройств связи примерно в 5 раз и избежать значительных затрат цветного металла (в первую очередь свинца) на устройство кабельных линий.

В табл. 4 приведены затраты (в процентах) на электрификацию с учетом кабелирования (при переменном токе) и реконструкции устройств проводной связи Министерства путей сообщения и Министерства связи для рассматриваемого полигона железнодорожных линий.

Приведенные данные по эффективности применения электрической тяги однофазного тока промышленной частоты примерно совпадают с результатами подобного сравнения, выполненного во Франции в 1955 г. на полигоне железнодорожных линий северо-востока Франции общим протяжением 2 800 км.

Кроме приведенных показателей, следует еще учитывать ряд дополнительных факторов. При применении электрической тяги на переменном токе значительно сокращаются трудовые затраты на электрификацию железных дорог и ускоряется выполнение этих работ. Это имеет очень большое значение, если учесть, что в течение ближайших 15 лет предусмотрено выполнить работы по пере-

Таблица 4

Наименование показателей	Переменный ток, 25 кв, 50 гц	Постоянный ток 3 кв (при существующем оборудовании и схемах тяги)	Переменный ток 25 кв, 50 гц	Постоянный ток 3 кв (с учетом нового оборудования и схем тяги)
Основные капиталовложения в стационарные устройства электрической тяги	100	133	100	127
Капитальные вложения в электровазы	100	103,5	100	103,5
Общие капиталовложения (без затрат по связи)	100	120	100	117
Общие капиталовложения с учетом затрат на кабелирование и реконструкцию устройств связи МПС	100	110	100	107,5
Общие капиталовложения с учетом затрат на кабелирование и реконструкцию устройств связи МПС и МС	100	107	100	103,5

¹ Имеются в виду новые типы преобразовательных агрегатов, устройства автоматики и телеуправления, более рациональные типы тяговых подстанций и т. д.

воду на электрическую тягу 40 000 км железно-дорожных линий.

По сравнению с электровозами постоянного тока электровозы однофазного тока имеют лучшие тяговые характеристики и свойства. Оптимальные веса поездов и скорости их движения при электрической тяге на переменном токе несколько выше из-за меньшей стоимости устройств электроснабжения.

При электрической тяге на однофазном токе промышленной частоты практически отпадает необходимость в проведении специальных мероприятий по защите подземных металлических сооружений (трубопроводов, кабелей и т. д.) от коррозии блуждающими токами. Решение этой проблемы при электрической тяге на постоянном токе по мере роста электропотребления и развития сети подземных сооружений встречает все большие технические трудности, а проведение защитных мероприятий требует значительных затрат.

Все это позволяет сделать вывод, что система электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты имеет существенные технико-экономические преимущества по сравнению с системой постоянного тока 3 кВ и должна получить соответствующее применение при электрификации железных дорог в СССР. Сроки начала внедрения электрической тяги на переменном токе зависят, в первую очередь, от окончания разработки и организации серийного производства простых, экономичных и надежных в работе электровозов и моторных вагонов однофазного тока.

Одной из перспективных систем электровозов для дорог переменного тока являются электровозы однофазно-постоянного тока с ионными преобразователями. Электровозы этой системы имеют достаточно высокие энергетические показатели (среднеэксплуатационные к. п. д. 0,81 и коэффициент мощности около 0,82) и хорошие тяговые характеристики и свойства. По сравнению с другими системами электровозов переменного тока электровозы однофазно-постоянного тока с ионными преобразователями имеют значительно меньший вес электрического оборудования на единицу мощности и соответственно более низкую стоимость. Электровозы этой системы в настоящее время наиболее детально разработаны и в связи с этим в сравнительно короткие сроки может быть налажено их серийное производство заводами нашей промышленности.

Очередной задачей является скорейшее окончание работ по проектированию и изготовлению опытных образцов электровозов однофазно-постоянного тока с перспективными параметрами по скорости и мощности. В процессе выполнения этих работ необходимо обратить особое внимание на: усовершенствование и повышение надежности работы выпрямительной установки; обоснованный выбор величины напряжения выпрямленного тока (оптимальной как по тяговым двигателям, так и по выпрямительной установке); разработку мероприятий по улучшению коэффициента мощности и снижению гармонических составляющих в кри-

вой тягового тока и решение вопросов применения рекуперативного торможения на электровозах этой системы.

Большой практический интерес представляют электровозы однофазно-многофазного тока с машинными преобразователями фаз и частоты и асинхронными короткозамкнутыми тяговыми двигателями. При соответствующем выполнении электровозы этой системы по сравнению с электровозами однофазно-постоянного тока с ионными преобразователями могут иметь: более высокий коэффициент мощности (близкий к единице или опережающий), лучшие тяговые характеристики и использование сцепного веса, простое осуществление и эффективное использование рекуперативного торможения. Важным преимуществом электровозов этой системы является использование более легких, простых и надежных в эксплуатации асинхронных короткозамкнутых тяговых двигателей. Кроме этого, при электровозах однофазно-многофазного тока с машинными преобразователями устраняется наличие гармоник в кривой тягового тока.

Большой научный и практический интерес представляет разработка вопроса о возможности и целесообразности применения на электровозах с асинхронными короткозамкнутыми тяговыми двигателями статических преобразователей фаз и частоты, обеспечивающих возможность плавного регулирования последней.

Должен быть также создан мотор-вагонный подвижной состав для дорог однофазного тока промышленной частоты. Наиболее целесообразными системами моторных вагонов в данном случае являются системы однофазно-постоянного тока с ионными преобразователями и однофазного тока с однофазными коллекторными тяговыми двигателями промышленной частоты.

При разработке однофазных коллекторных тяговых двигателей промышленной частоты следует особое внимание обратить на повышение их к. п. д. и коэффициента мощности, а также выяснение возможности и целесообразности применения рекуперативного и реостатного торможения при однофазных коллекторных двигателях, что имеет существенное практическое значение для мотор-вагонного подвижного состава, обращающегося в пригородном сообщении при частых остановках.

Большое практическое значение имеет разработка вопросов применения на электроподвижном составе однофазно-постоянного тока мощных полупроводниковых выпрямителей вместо ртутных выпрямителей. Эта задача в первую очередь должна быть решена для мотор-вагонного подвижного состава.

Необходимо уделить серьезное внимание также работам по усовершенствованию и повышению эффективности электрической тяги постоянного тока 3 кВ, учитывая, что дополнительно к существующим линиям до 1960 г. в СССР будет электрифицировано на постоянном токе не менее 5 000 км железнодорожных линий.

Задачи по внедрению системы электрической тяги на однофазном токе

Доктор техн. наук, проф. Д. К. МИНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Директивы XX съезда КПСС предусматривают по плану шестого пятилетия освоение промышленностью серийного производства магистральных электровозов с питанием от сети переменного тока промышленной частоты. Это дает возможность уже в текущем пятилетии развернуть электрификацию железных дорог по новой системе электрической тяги на нескольких железнодорожных направлениях.

На участке Ожерелье — Михайлов — Павелец (137 км), уже эксплуатируемом по новой системе, напряжение на электровозе принято равным 20 кВ [Л. 1, 8]. Однако существуют заслуживающие внимания соображения о целесообразности повышения его до 35 кВ.

Проводившиеся работы по дальнейшему улучшению системы постоянного тока не должны отражаться на темпах скорейшего внедрения новой перспективной системы электрической тяги на однофазном токе 50 Гц. Эта система имеет два принципиальных отличия от существующей прямой системы постоянного тока: 1) преобразование электроэнергии переносится с тяговых подстанций на электровозы и 2) цепи тэд (тяговых электродвигателей) отделены от тяговой сети трансформатором. Благодаря этому становится возможным повысить напряжение в тяговой сети, т. е. значительно увеличить напряжение, подводимое к потребителю — электровозу. Тем самым снижаются: необходимое число тяговых подстанций, сечение проводов тяговой сети и потери в ней электроэнергии. Вместе с тем усложненные преобразовательные подстанции заменяются трансформаторными, обладающими наибольшей простотой, надежностью и высоким к. п. д. (0,98). В ряде случаев представляется возможность питать тяговую сеть непосредственно от шин 35 кВ районных подстанций, а бытовую и промышленную нагрузку — от тяговой сети через понизительный трансформатор, причем представляется возможным применить электроприводной или от конденсаторных двигателей или же по системе КРД (контактный провод, рельс, дополнительная фаза, подвешенная с поля к опорам контактной линии). Все это может привести к удешевлению устройств электроснабжения тяги до 2½ раз, значительной экономии цветных металлов (2—4 т на 1 км одиночного пути, из них не менее 1,1 т меди), уменьшению потребности в электрооборудовании, строительных и других материалов [Л. 2, 3]. При напряжении в тяговой сети 20 ... 25 кВ по сравнению с системой постоянного тока 3 кВ количество тяговых подстанций уменьшается в 2 ... 3 раза (расстояния между подстанциями: 50 ... 70 км), а потери электроэнергии в тяговой сети снижаются до 3 ... 4% (вместо 12 ... 17%). Напряжение 35 кВ улучшает приведенные показатели. При меньших весе и количестве проводов, подвешиваемых на опорах контактной сети, уменьшаются ветровые и

другие нагрузки на опоры и потому конструкция их облегчается, затрата металла на устройство опор и объем фундаментов их также становятся меньше.

В случае применения при однофазном токе выпрямительных электровозов благодаря их меньшей единичной стоимости и возможности лучшего использования затраты по сооружению локомотивного парка ниже, чем при постоянном токе 3 000 в, примерно на 10%.

При новой системе электрической тяги требуется:

а) линии связи Министерства связи СССР отнестись от электрифицированной железной дороги на несколько километров или кабелировать; б) линии железнодорожной связи — кабелировать. Более радикальное и экономическое решение даст радиорелейная связь.

Кабелирование линий связи связано со значительными расходами. Это долгое время выступало как довод против введения новой системы тяги. Однако кабелирование линий связи является прогрессивным техническим мероприятием. Необходимо разработать замену свинцовой оболочки кабеля оболочкой из недефицитных материалов и ускорить эксплуатационное освоение радиорелейной железнодорожной связи.

Электрический подвижной состав при новой системе. При системе однофазного тока 50 Гц электровозы и электровагоны могут быть выполнены с тэд (тяговыми электродвигателями) разных типов: а) коллекторными однофазного тока, б) асинхронными трех- или двухфазными и в) постоянного тока.

Существуют четыре типа электровозов: 1) с непосредственными тэд, 2) мотор-генераторные с тэд постоянного тока, 3) с вращающимися преобразователями и асинхронными тэд, 4) выпрямительные с тэд постоянного тока.

Коллекторные тэд 50 Гц по условиям коммутации, которая может поддерживаться удовлетворительной лишь для узкой зоны скоростей и нагрузок, малоприспособлены для тяжелой грузовой работы, требующей замедленного пуска поездных составов (длительностью до 12 ... 15 мин) и продолжительной езды на различных ступенях скорости (кривые, «предупреждения», маневры).

Мотор-генераторные электровозы имеют перспективу лишь ограниченного применения на железнодорожном транспорте СССР, а именно на дорогах с тяжелым профилем и ограниченной скоростью движения (горные и перевальные линии).

Основными недостатками электровозов с асинхронными двигателями являются: сложность регулирования скорости и жесткая тяговая характеристика (независимо от наличия или отсутствия частотной регулировки), которая хотя и повышает тяговые свойства электровоза,

но затрудняет равномерное распределение мощности между отдельными тэд, в особенности при кратной тяге.

Развитие ионной техники выдвинуло новый вид электровоза однофазного тока: «выпрямительный», имеющий тяговые двигатели постоянного тока. Эти электровозы зарекомендовали себя как наиболее простые и в то же время надежные и имеющие удобные тяговые характеристики. Советский Союз является одним из пионеров в создании выпрямительного электровоза (1934—1938 гг.).

Современные выпрямительные электровозы однофазного тока выполняются с ионными преобразователями (преимущественно с игнитронами), имеющими небольшой объем и вес. В ряде случаев усовершенствование в смысле простоты обслуживания и надежности могут дать германиевые выпрямители, уже применяемые в виде опыта для электровагонов [Л. 4].

Игнитронный электровоз, стоящий на современном уровне техники, проще, дешевле и надежнее в эксплуатации электровоза постоянного тока 3 кв той же мощности. Несмотря на наличие трансформатора и выпрямителей, игнитронный электровоз может быть выполнен при том же и даже меньшем весе электрооборудования и позволяет вписать в ту же ходовую часть большую мощность тэд. Например, современный зарубежный электровоз с ионными преобразователями имеет удельный вес электрооборудования 14,2 кг на 1 квт часовой мощности, а советский электровоз постоянного тока 3 кв серии Н8: 17 кг/квт. В таком электровозе легко обеспечить 650 ... 750 квт часовой мощности на одну движущую ось, что позволяет при 6 ... 8 движущих осях получить мощность электровоза 4 000 ... 5 000 квт.

Улучшенные весовые и эксплуатационные показатели выпрямительного электровоза обеспечивают следующие условия. Возможность выполнения тэд на пониженное напряжение на коллекторе и по изоляции позволяет уменьшить их вес в 2 ... 2,5 раза по сравнению с тэд на электровозах постоянного тока 3 кв (максимальное напряжение 4 000 в). Устраняются пусковые сопротивления, их охлаждающие устройства и большое количество контакторов, наличие которых в электровозе постоянного тока вызвано переключениями группировок тэд и цепей их пусковых сопротивлений. Улучшаются тяговые свойства электровоза благодаря постоянному параллельному включению тэд и плавности регулировки напряжения. Повышается надежность работы тэд, которые имеют низкое напряжение на коллекторе, не повышающееся при боковании колес, защищены индуктивностью трансформатора от коммутационных и атмосферных перенапряжений.

Вследствие более простого оборудования преимущества выпрямительного электровоза перед электровозом постоянного тока 3 кв растут с повышением мощности.

Высокие тяговые качества электровоза, а также более устойчивый режим напряжения в тяговой сети (который простыми средствами дости-

гается при новой системе) дают возможность повысить веса поездных составов и их участковую скорость.

Технико-экономические характеристики систем электрической тяги

Объект	Постоянный ток 3 000 в	Однофазный ток 22 кв, 50 гц	
		электровозы выпрямитель- ные	электровозы с вращающим- ся преобразо- вателем
Коэффициент полезного действия отдельных узлов системы:			
А) электровоза	0,85	0,81	0,73
Б) тяговой сети	0,85	0,96	0,97
В) тяговых подстанций	0,92	0,98	0,98
Результирующий к. п. д. электрической тяги от ввода высокого напряжения на тяговую подстанцию до колес электровоза	0,65	0,76	0,69
То же, при условии, что выпрямительные электровозы выполнены без рекуперации (при возможном возврате 10% электроэнергии, потребленной электровозом)	0,65	0,66	0,69
Сравнительная оценка тяговых свойств, %	100	110	115*
Коэффициент мощности на вводах подстанции со стороны высокого напряжения (без компенсации отставания фазы тока)	0,93	0,87...0,83	0,98

* При асинхронных тэд.

Из таблицы видно, что при выпрямительных электровозах новая система электрической тяги получает хорошие технико-экономические характеристики при условии создания надежно работающих выпрямителей; зарубежный и советский опыт показывает, что создать вентили, обеспечивающие бесперебойную работу, вполне возможно.

Поэтому в качестве первоочередного исполнения электровоза однофазного тока в СССР изготавливается промышленностью выпрямительный электровоз.

Вместе с тем выпрямительные электровозы не лишены недостатков. Многие из них уже устранены за последние годы и остальные могут быть устранены при дальнейшем совершенствовании системы.

Рассмотрим теперь важнейшие задачи по доведению системы однофазного тока до оптимальных технических показателей.

Первая задача. Улучшение выпрямительного электровоза. Известно, что ток, потребляемый ионным электровозом, имеет несинусоидальную форму и может быть разбит на ток основной гармоники 50 гц (первая гармоническая составляющая) и на ряд высших гармонических составляющих (3, 5, 7, 9 и последующие нечетные гармоники). Ввиду наличия высших гармоник коэффициент мощности μ ниже $\cos \varphi$ основной гармоники тока (50 гц).

На величину $\cos \varphi$ токоприемника электровоза оказывают влияние следующие факторы:

1) Эквивалентная индуктивность L'_1 цепи от вводов тяговой подстанции до вентилей, приведенная к выпрямляемому напряжению (U_0):

$$L'_1 = k^2 \Sigma L_i,$$

где $k < 1$ — коэффициент трансформации на электровозе ($U_0:U$);

L_i — индуктивности элементов цепи.

2) Нагрузка рассматриваемого электровоза.

3) Нагрузки расположения и режимы других электровозов, находящихся на том же участке питания.

4) Соотношение между индуктивностью в цепях тэд $n = L'_1 : L_{сгд}$.

При отсутствии компенсации значение $\cos \varphi$ падает по мере приближения к вводам подстанции. Если L' невелико (10%), то значение $\cos \varphi$ на вводах подстанции достаточно высоко и составляет 0,87 ... 0,83. Такие примерно показатели получены на опытном кольце МПС, общая длина которого составляет 6 км и на котором одновременно работал один электровоз типа НО, мощностью 2 400 кВт при $U = 20$ кВ. Подобные же результаты были получены на линии Валансьен—Тионвиль французских железных дорог при мощности ионного электровоза 2 650 кВ и $U = 25$ кВ. Однако на этом участке, являющемся по существу опытным, улучшению энергетических показателей, несомненно, способствовали мотор-генераторные электровозы с первичным синхронным двигателем, потребляющим синусоидальный ток при $\cos \varphi$, близком к единице.

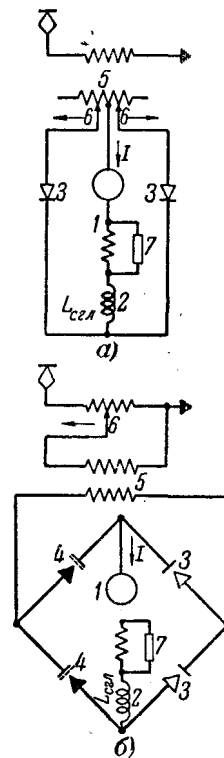
Здесь необходимо указать на серьезную неточность, которая допускалась при расчете тяговой сети, питающей выпрямленные электровозы. В этих расчетах не учитывалась искаженная форма первичного тока тяговой сети. Потеря напряжения до токоприемника рассчитывалась по первым гармоникам нагрузок. Вследствие этого напряжение на токоприемнике рассматривалось как синусоидальное. По аналогии с электровозами с коллекторными тэд (постоянного или переменного тока) принималось, что потеря скорости электровозом приблизительно пропорциональна на потере напряжения на его токоприемнике.

В действительности напряжение на анодах выпрямительной установки электровоза не синусоидально. Под влиянием L' при несинусоидальном первичном токе форма кривой напряжения искажается, причем в зоне коммутации анодов оно остается близким к нулю. Естественно, что нахождение $\cos \varphi$ и выпрямленного напряжения следует производить, рассматривая электрическую цепь от вводов высокого напряжения тяговой подстанции, к которым приложено синусоидальное напряжение, до тэд электровоза, учитывая при этом влияние несинусоидальных нагрузок других электровозов.

Исследование, выполненное С. А. Петровым [Л. 5], показало, что при этих условиях и сохранении принципов электроснабжения, принятых

Рис. 1. Простейшие схемы однофазного выпрямителя.

а — с выводом средней точки трансформатора; б — мостиковая с сеточным регулированием; 1 — тэд; 2 — сглаживающая индуктивность, $L_{сгд}$; 3 — вентиль неуправляемый; 4 — вентиль управляемый; 5 — вторичная обмотка трансформатора; 6 — контакторы для регулирования напряжения; 7 — активное сопротивление для сглаживания магнитного потока тэд.



для опытного участка, значения $\cos \varphi$ на вводах подстанции могут снизиться до 0,7 ... 0,65.

Для пояснения этого свойства рассмотрим простую схему без сеточного регулирования (рис. 1, а).

Под влиянием L'_1 после прохождения напряжения через нуль и зажигания второго анода (угол зажигания α) наблюдается некоторое время одновременное горение двух анодов, т. е. явление, называемое перекрытием анодов (угол перекрытия β), причем при больших значениях L'_1 и больших нагрузках тяговой сети угол перекрытия β достигает 60° . В течение времени зажигания второго анода и перекрытия ($\alpha + \beta$) анодов выпрямленное напряжение практически равно нулю (точнее при перекрытии анод имеет отрицательное значение, равное падению в дуге, что составляет 20 ... 25 в). Увеличение угла перекрытия под влиянием большой нагрузки приводит к следующим нежелательным явлениям:

Во-первых, при сохранении постоянного значения напряжения на токоприемнике электровоза увеличение тока вызывает понижение выпрямленного напряжения, в результате чего скорость выпрямительного электровоза падает интенсивнее, чем электровоза постоянного тока при том же режиме напряжения тяговой сети (рис. 2).

Во-вторых, уменьшается $\cos \varphi$ в тяговой сети и на вводах подстанции.

На токоприемнике электровоза (рис. 1 и 2) при $\gamma > 20^\circ$ имеем:

1) для схемы а

$$\varphi_s = \alpha + c'\beta + \gamma;$$

2) для схемы б

$$\varphi_s = \alpha + c''\beta + \frac{\gamma}{2},$$

где γ — угол регулирования напряжения сетками;

c' и c'' — величины, меньшие единицы, зависящие для данного β от $L_{сгд}/L_1$.

Первое явление понижает скоростные показатели электровоза. Эти показатели возможно несколько улучшить регулированием напряжения

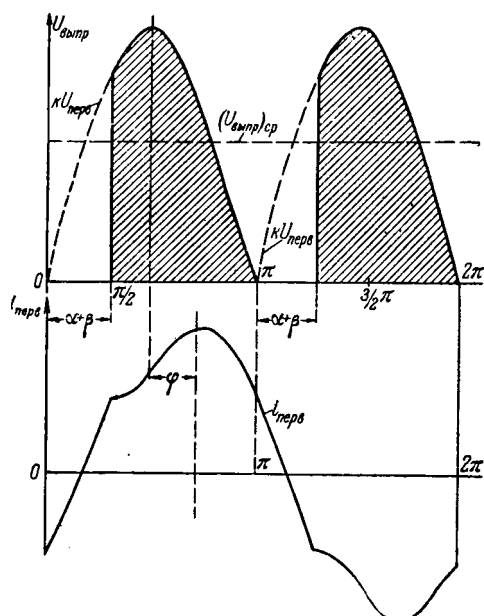


Рис. 2. Первичный ток ($i_{пер}$) и первичное и выпрямленное напряжения (см. схему 1, а). Зачернена площадь, ограниченная кривой выпрямленного напряжения.

на вторичных зажимах электровозного трансформатора. Следует, однако, отметить, что при насыщенной сети эффект будет слабым и может быть даже отрицательным, так как такое регулирование вызывает повышение первичного тока и, следовательно, рост индуктивного падения напряжения в системе электроснабжения, которое, помимо прямого действия, приводит к увеличению β . К тому же он приводит к завышению мощности трансформатора.

Снижение $\cos \varphi$ (второе явление) приводит к недоиспользованию энергосистемы и к установке излишней мощности трансформаторов на подстанции, а потому связано со значительными убытками, которые лишь частично окупаются снижением расхода электроэнергии. Наличие нескольких синхронно коммутирующих электровазов на участке питания в первом приближении может рассматриваться как соответствующее увеличение L_1' .

Улучшение скоростных показателей электроваза и повышение $\cos \varphi$ можно обеспечить следующими средствами:

1. Принятием в качестве рабочего напряжения 35 кВ, что снизит составляющую L_1' , относящуюся к тяговой сети, по сравнению с ее величиной при $U=20$ кВ вдвое (за счет уменьшения k в 1,75 раза).

2. Применением мостиковой схемы как требующей удвоенного значения k при тех же U и $U_{выпр}$.

3. Уменьшением индуктивности подстанционного трансформатора. Это значит, что тяговые обмотки должны располагаться рядом с обмоткой высокого напряжения (при трехобмоточном исполнении).

4. Компенсацией индуктивности цепи при помощи включения в нее конденсаторов.

Целесообразно применить, в первую очередь, средства 1—3, резервируя средство 4 для более

грузонапряженных линий. Компенсация индуктивности может быть выполнена различно. Возможна, например, установка фильтров на каждом электровазе. Заслуживает внимания проблема использования выпрямителей для генерирования реактивной мощности [Л. 6].

Третий вариант выполняется в виде ряда постов, помещенных на участке питания с включенными последовательно в тяговую сеть конденсаторами (продольная распределенная компенсация).

Электровазы с ионными преобразователями выполнялись до сих пор без рекуперации электрической энергии. Подсчеты показывают, что на полигоне железных дорог, предназначенных для электрификации, возврат электроэнергии в сеть возможен в количестве от 10 до 20%. Применение рекуперации на электрическом подвижном составе с ионными преобразователями возможно, причем имеются разработанные схемы [Л. 7]. Эти схемы не требуют установки на электровазе сложных устройств, которые могли бы вызвать его удорожание.

Помимо экономии электроэнергии, рекуперативное торможение приводит к значительному сокращению расходов по замене тормозных колодок и по обточке колес, что составляет примерно 8 коп. на 1 квтч электрической энергии, возвращенной в сеть. Эта экономия настолько значительна, что при затруднениях в применении рекуперации рационально предусмотреть на электроподвижном составе со статическими преобразователями хотя бы реостатное торможение.

Важным является вопрос об установлении номинального значения выпрямленного напряжения. Существует предположение, что его величина должна быть принята равной оптимальному напряжению для двигателей с точки зрения их наименьшего веса, стоимости, что составляет 650 ... 800 в. В действительности оптимальное напряжение должно определяться минимальными значениями веса, стоимости и эксплуатационных расходов по электровазу в целом. При этом окажется, что величина оптимального напряжения возрастает по сравнению с указанным ранее.

Для обеспечения надежной работы и высокого к. п. д. тэд выпрямительного электроваза должны иметь специальное исполнение, учитывая, что они питаются не постоянным, а пульсирующим током со значительной волнистостью ($\pm 25 \dots 30\%$). Важно при этом также обеспечить высокий к. п. д. двигателя, учитывая пульсации тока. Желательно иметь полностью обрессоренные тэд; такое исполнение сильно повысит надежность их работы.

Наряду с усовершенствованием ионных преобразователей (игнитронов, экситронов) следует быстрее провести все необходимые работы по применению полупроводниковых выпрямителей. Кремниевые выпрямители устойчиво работают в большом диапазоне окружающих температур (от -60 до $+200^\circ\text{C}$), имеют вне зависимости от выпрямленного напряжения высокий к. п. д. (порядка 97%). Это благоприятствует снижению вы-

прямолинейного напряжения до оптимального по тэд и применению мостовой схемы выпрямления.

Хотя полупроводниковые выпрямители не обеспечивают рекуперации энергии, тем не менее остается обширная область их применения, где они имеют преимущество перед ионными приборами, как, например, электровозы для районов с резко выраженным континентальным климатом, моторные вагоны.

Для улучшения использования сцепного веса и повышения конструктивных скоростей электровозов требуется также провести переработку ряда узлов механической части электровоза, в частности целесообразно испытать применение на электровозах бесчелюстных букс с упругими толкающими штангами «Silent blocs» (для устранения влияния силы трения в челюстях на развеску между осями), а также радикально переработать конструкции тележек для устранения паразитных движений.

Таким образом, первая задача представляет большое поле деятельности, в которой основную роль играют промышленность и ее исследовательские институты.

Вторая задача. Повышение номинального напряжения 35 кВ. Опытный участок Ожерелье — Павелец сооружается на номинальное напряжение 20 кВ на электровозе. Величина выбранного напряжения объяснялась, исходя из вертикального и боковых зазоров между существующими габаритами приближения строения (2С) и подвижного состава, исключаяющими перебросы на него электрической дуги с контактной сети.

Для дальнейшей электрификации железных дорог на однофазном токе промышленной частоты целесообразно серьезно обсудить вопрос о повышении напряжения до 35 кВ, являющемся стандартным. Повышение напряжения до 35 кВ не должно вызвать существенных затруднений со стороны электрического подвижного состава. Однако оно потребует дополнительных строительных расходов по переоборудованию некоторых постоянных сооружений (туннели стесненного габарита, мосты с ездой понизу и др.).

Расходы эти будут не столь значительными для вновь строящихся линий. Большие трудности могут представлять уже существующие пути. Повышение напряжения до 35 кВ потребует затрат, которые, видимо, быстро окупятся. Постоянные сооружения стесненного габарита длиной до 60 м, расположенные на площадке, можно проходить по принципу «мертвого участка» за счет инерции поезда. Разорванная мертвым участком контактная сеть замыкается кабелем или обходной воздушной линией. При большей длине и стесненных габаритах постоянного сооружения его контактная сеть может быть выделена в изолированный участок, отделенный мертвыми вставками от основной контактной линии. Разрыв, как и в предыдущем случае, замыкается обходной воздушной или кабельной линией. Выделенный участок под постоянным сооружением имеет пониженное напряжение (20 кВ), безопасное по габариту, и питается с одной стороны от однофазного трансформатора, первичная обмотка которо-

го подключена к контактному проводу и рельсу основной линии (35 кВ). Ввиду кратковременной работы мощность трансформатора составит не более $\frac{1}{2}$ мощности электровоза. Поезда могут проходить участок или с пониженной или с нормальной скоростью. В последнем случае необходимо усилить трансформатор и дать дополнительные отпайки с уменьшенным коэффициентом трансформации.

В то же время напряжение 35 кВ дает следующие энергетические преимущества для системы однофазного тока, в особенности при выпрямительном электрическом подвижном составе:

1. Тяговая и районная нагрузки (35 кВ) питаются от общих шин. В связи с этим отпадает необходимость сооружения для тяговых подстанций трехобмоточных трансформаторов (110/22/38 кВ) или специальных трансформаторов для питания района.

2. В ряде случаев тяговая нагрузка может питаться непосредственно от существующих районных подстанций, благодаря чему сберегаются средства на сооружение тяговых подстанций.

3. Возможна широкая вариация расстояний между тяговыми подстанциями в пределах от 50 до 80 км, что облегчает их размещение вблизи железнодорожных станций.

4. Повышается $\cos \varphi$ и снижается L_1' , что обеспечивает лучшее использование мощности энергосистемы и уменьшает необходимую мощность тяговых трансформаторов.

5. Повышение напряжения благоприятно влияет на работу линий связи, идущих параллельно электрифицированной железнодорожной линии, так как уменьшит мешающее и опасное напряжение тяговых токов.

Величины обоих характерных напряжений приблизительно пропорциональны тяговому току, т. е. обратно пропорциональны рабочему напряжению на токоприемник.

Таким образом, повышение напряжения с 20 до 35 кВ снизит вредное влияние на линии связи в 1,75 раза, что приведет к некоторому сокращению затрат по их защите.

6. Снижение тока в тяговой сети при прочих равных условиях приведет к уменьшению угла перекрытия вентиля выпрямителя, а также к увеличению $\cos \varphi$ и к уменьшению потерь напряжения, подводимого к электровозу, и тем повысит коэффициент мощности и одновременно снизит падение скорости электрического подвижного состава от потери напряжения, т. е. улучшит важнейшие технико-экономические показатели новой системы тяги. Благодаря этому для их дальнейшего улучшения потребуется поглотить в конденсатор меньшую реактивную мощность, что снизит затраты по их установке, и, кроме того, в ряде случаев позволит принять большие расстояния между подстанциями.

Для новых строящихся линий следует, по результатам расчетов, принять напряжение 35 кВ.

Третья задача. Создание электровоза для двух систем электрической тяги. При электрификации железных дорог по новой системе электрической

тяги появятся пункты примыкания их к участкам уже электрифицированным на постоянном токе 3 кв. Возможны разные способы обслуживания пунктов стыкования систем.

Одним из таких решений является электровоз двойного питания «бикурантный», который сравнительно легко выполнить на базе выпрямительного электровоза. В эскизном проекте, разработанном в МЭИ им. Молотова, за основной режим принят режим переменного тока, на котором электровоз двойного питания развивает полную мощность. В режиме постоянного тока 3 кв он развивает лишь часть своей мощности, необходимую для трогания состава и разгона его до скорости, достаточной для прохождения выбегом нейтральной вставки. Имеются предложения по секционированию тяговой сети на отдельной станции с применением или без применения маневровых тепловозов. Необходимо быстро разрешить вопрос о способе примыкания, причем целесообразно выбрать несколько вариантов, один из которых должен иметь в основе бикурантный электровоз. Эти электровозы потребуются в ограниченном количестве.

Одновременно с созданием универсального электровоза необходимо обеспечить максимальное снижение количества стыков. Для эффективности новой системы электрической тяги необходимо устранить чересполосицу и осуществить электрификацию по одной системе на целых железнодорожных направлениях, а не на отдельных его тяговых участках.

Четвертая задача. Разработка других систем электрического подвижного состава. Необходимо внести ясность в параметры, по которым должна вестись разработка электровозов с вращающимися преобразователями: должна ли быть обеспечена взаимозаменяемость мотор-генераторных электровозов с выпрямительными электровозами, имеющими перспективные параметры (P до 4—5 тыс. квт), или же их следует выполнить менее мощными для узкой потребности тех линий, где их применение получит технико-экономическое обоснование (например, для горных железнодорожных линий с ограниченной конструкционной скоростью). Следует рассмотреть зарубежный опыт, который дал отрицательные результаты по электровозам с асинхронными тэд, в том числе и регулируемые (Франция, Венгрия). Эти страны, а также США, предпочли моторгенераторные электровозы с тэд постоянного тока по схеме, близкой к тепловозной. Рационально, по крайней мере в стадии проектирования, вести разработку машинно-преобразовательных электровозов двух исполнений; с тэд постоянного тока и с асинхронными тэд, причем для обоих исполнений следует найти оптимальные решения и на основе их сопоставления выбрать исполнительный вариант. Безусловно, что электровозы должны надежно работать по системе многих единиц. Опыт эксплуатации машинно-преобразовательных электровозов, не-

сомненно, будет содействовать усовершенствованию системы с ионными электровозами в направлении устранения отдельных дефектов, отсутствующих в электровозах с вращающимися синхронными преобразователями. Следует продолжить работу по усовершенствованию коллекторных тэд 50 гц, в первую очередь, для электровагонной тяги. При этом во избежание распыления усилий специалистов, которые в основном должны быть сосредоточены на разработке всех технических задач, связанных с выпрямительными электровозами, следует к вопросам сооружения электровозов с вращающимися преобразователями и коллекторных тэд для электровагонных секций привлечь узкий круг предприятий, не связанных с поставками выпрямительных электровозов.

* *

*

Изложенные выше задачи не являются, разумеется, исчерпывающими. Ряд важных задач потребует разрешения по установлению параметров и конструкций по устройствам электроснабжения, СЦБ, а также по установлению норм проектирования и методики расчетов элементов электрификации железных дорог по системе однофазного тока 50 гц, используя в максимальной степени эксплуатационный опыт на участке Ожерелье — Павелец. Важно обратить также серьезное внимание на подготовку инженерных и технических кадров для промышленности и эксплуатации по новой системе электрической тяги.

В заключение необходимо подчеркнуть, что выпрямительному электровозу как основному типу перспективного электровоза однофазного тока должно быть уделено наибольшее внимание как со стороны научных организаций, так и со стороны промышленности.

Литература

1. Л. О. Грубер. Электрификация опытной линии на однофазном токе промышленной частоты. Бюл. тех.-экон. информации МПС, № 6 Трансжелдориздат, 1956.
2. Д. К. Минов. Великие стройки коммунизма и задачи электрификации железных дорог. Железнодорожный транспорт, № 2, 1952.
3. П. К. Денисов и И. З. Романов. Великие стройки коммунизма и перспективы электрификации железных дорог на однофазном токе 50 гц. Известия АН СССР, ОТН, 3, 1952.
4. Railway Gazette, т. 194, 13, № 1, 1956.
5. С. А. Петров. Методика расчета скорости электровоза и фазы основной гармоник первичного тока ртутно-выпрямительного электровоза. Сборник по электрификации транспорта на однофазном токе 50 гц. Изд-во АН СССР, 1956.
6. А. В. Орловский. Использование ртутно-выпрямительных установок для генерирования реактивной мощности. Труды научно-технического совещания по повышению коэффициента мощности. Госэнергоиздат, 1953.
7. АЕС М, № 9—10, 1956.
8. Д. К. Минов. Задачи опытной проверки системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты. Сборник ИКТП АН СССР, 1956.

[25. 6. 1956]



Технико-экономические вопросы систем электрической тяги

Доктор техн. наук., проф. К. Г. МАРКВАРДТ

Московский институт инженеров транспорта

Широкое развитие электрификации железных дорог СССР требует максимального повышения экономической эффективности этого мероприятия с учетом дальнейшего увеличения весов поездов и скорости их движения.

Система энергоснабжения электрических железных дорог, входя составной частью в общие энергосистемы страны, должна обеспечивать экономичные и надежные способы развития энергосистем и питания также всех так называемых нетяговых потребителей железных дорог и прилегающих районов. Так как основная доля затрат (до 70 ... 80 %), включая расход цветных металлов при применяющейся у нас системе электрической тяги постоянного тока 3 300 в, приходится на долю системы энергоснабжения, то именно здесь и надлежит искать средства для получения значительной экономии. При этой системе тяги наиболее типичной схемой внешней части системы энергоснабжения является так называемая продольная схема, при которой вдоль железной дороги через 300 ... 350 км располагаются крупные электрические станции, соединенные двухцепными линиями передачи 110 кв. Через каждые 20 ... 25 км на двухпутных участках и 25 ... 30 км на однопутных располагаются тяговые подстанции.

Для того чтобы повысить использование электрических станций и обеспечить наиболее экономичные режимы работы, желательно использовать линии передачи, питающие электрическую дорогу и связывающие между собой отдельные электрические станции как линии межсистемного обмена энергией. В связи с созданием ЕЭС эта система приобретает особое значение. Однако в условиях быстро растущих грузопотоков при применяемом ныне для питания железных дорог напряжении 110 кв и существующих расстояниях между электрическими станциями, пропускная способность линий становится недостаточной не только для указанной цели, но и просто для питания железных дорог.

В связи с этим отметим некоторые стороны вопроса о повышении напряжения линии передачи до 220 кв. При расстояниях между тяговыми подстанциями порядка 20 ... 30 км количество потребного высоковольтного оборудования (масляных выключателей, трансформаторов и т. д.) при повышении напряжения передачи до 220 кв настолько велико, что увеличение расходов на это оборудование делает такое повышение невыгодным. Увеличение же расстояния между тяговыми подстанциями с целью уменьшения их числа и, следовательно, расходов на их сооружение, вызывает необходимость в увеличении сечения проводов контактной сети, что сводит на нет всю выгоду от увеличения расстояния между тяговыми подстанциями.

В связи с развитием электрификации сельского хозяйства создаваемая им нагрузка в ряде случаев может превысить нагрузку от электрической

тяги. Питание таких мощных нетяговых потребителей непосредственно от контактной сети маловероятно и, следовательно, основной явится схема питания их от тяговых подстанций. При этом, несомненно, более дешевую сеть получают эти потребители при уменьшении расстояний между тяговыми подстанциями. Таким образом, по соображениям удешевления первичной части системы энергоснабжения и тяговых подстанций желательно увеличить расстояние между тяговыми подстанциями, а по соображениям понижения стоимости контактной сети и питания нетяговых потребителей, наоборот, целесообразно уменьшать это расстояние.

Системы электрической тяги постоянного тока 3 300 в в контактной сети и однофазного тока промышленной частоты имеют свои достоинства и недостатки. Естественно, что задачам устранения последних уделяется большое внимание. Должны быть найдены наивыгоднейшие решения этих задач с определением областей применения каждой системы.

Основное значение в этом направлении имеют, во-первых, тип тягового двигателя и, во-вторых, тип преобразовательного агрегата, приводящего электроэнергию к виду, необходимому этому тяговому двигателю, и размещение этого агрегата в схеме снабжения энергией двигателей. При постоянном и однофазном токе в контактной сети в мировой практике получили наибольшее распространение, особенно для тяжелых грузовых поездов, тяговые двигатели постоянного тока, обладающие высокими тяговыми свойствами. Имеются предложения применять при однофазном токе в контактной сети также и асинхронные трехфазные двигатели.

Системы постоянного и однофазного тока в контактной сети при использовании тяговых двигателей постоянного тока различаются в принципе тем, что ионные преобразователи переменного тока в постоянный в первом случае располагаются на тяговых подстанциях, а во втором — на электровозах, что и позволяет подводить к ним электроэнергию при значительно более высоком напряжении.

Основные преимущества электрической тяги при однофазном токе в контактной сети по сравнению с постоянным 3,3 кв можно кратко охарактеризовать следующими признаками: простые тяговые подстанции (трансформаторные вместо выпрямительных); большее расстояние между тяговыми подстанциями (в 2 ... 2,5 раза); меньшее сечение проводов контактной сети (также в 2 ... 2,5 раза); меньшая потеря энергии в контактной сети и на тяговых подстанциях; более широкий диапазон регулирования скорости; отсутствие явлений электролиза подземных сооружений блуждающими токами; при электровозах с вращающимися преобразователями — более высокий коэффициент мощности.

Если бы по другим признакам эта система не уступала системе тяги на постоянном токе, но она могла бы получить повсеместное распространение. К недостаткам системы однофазного тока в сравнении с системой постоянного тока 3,3 кВ относятся: большие затраты на мероприятия по защите линий связи в связи с переменным током в контактной сети; большая стоимость и сложность электровозов, так как сюда переносятся преобразователи энергии с тяговых подстанций; более низкий к. п. д. электровозов, особенно у электровозов с машинными преобразователями; меньший коэффициент мощности при электровозах с ионными преобразователями; трудность осуществления рекуперативного торможения при электровозах с ионными преобразователями; трудности реализации рекуперативного торможения при применении полупроводниковых выпрямителей на электровозах; удорожание ремонта электровозов вследствие их большей сложности; влияние несимметричной (а при электровозах с ионными преобразователями и несинусоидальной) нагрузки на работу энергосистемы и смежных потребителей; необходимость перестраивать автоблокировку, работающую на той же частоте; неудобства присоединения нетяговых потребителей (вследствие больших расстояний между подстанциями); трудность защиты от токов короткого замыкания.

Электровозы же с асинхронными тяговыми двигателями, кроме большого веса, низкого к. п. д. и высокой стоимости, имеют еще дополнительный, очень серьезный недостаток. При жесткой их характеристике за счет некоторого разброса характеристик отдельных тяговых двигателей и особенно за счет неизбежного в практике различия в диаметрах колесных пар распределение нагрузки между двигателями очень неравномерно, что неизбежно приведет к их перегрузке и резкому снижению тяговых свойств локомотивов.

Несомненно, однако, что при определенных

условиях работы и соответствующих удачных технических решениях система тяги на однофазном токе будет иметь преимущества, а в других случаях будет уступать системе тяги на постоянном токе. Например, при электровозах с ионными преобразователями, если их стоимость не будет превышать стоимость электровозов постоянного тока, а линии связи будут уже каблированы или будут каблироваться вне зависимости от системы электрической тяги в ближайшее время, то, несмотря на меньшее удобство питания нетяговых потребителей и более дорогой кабель для линии связи, все равно система однофазного тока будет давать экономию в капитальных затратах около 7...8%, как это показано на рис. 1, а для равнинного профиля.

Все приведенные графики (рис. 1—3) построены в предположении, что электровозы с ионными преобразователями равны по стоимости электровозам постоянного тока, но не обеспечивают рекуперативного торможения. На этих графиках дается зависимость расходов от энергопотребления A , т. е. наиболее типичного показателя работы электрических железных дорог. Для некоторой ориентировки на этих же графиках даны величины грузопотоков Γ , соответствующих этим расходам энергии. На капитальных затратах сказываются величина к. п. д. и возможность рекуперативного торможения, так как увеличение расхода электроэнергии ведет к увеличению капитальных затрат в энергосистемах.

На рис. 3, в так называемые условные ежегодные расходы (объединяющие капитальные затраты и ежегодные расходы) не введены расходы на каблирование.

Отразить на графиках эффективность системы однофазного тока при электровозах с ионными преобразователями, обеспечивающими рекуперацию энергии, не представляется возможным, так как нам неясна еще стоимость такого электровоза. Однако вне всякого сомнения, если не считать затрат на каблирование линий связи, эта система потребует наименьших капиталовложений.

Серийный выпуск электровозов однофазного тока, предусмотренный решениями XX съезда КПСС, должен иметь в своей основе такие типы электровозов, которые способны обеспечить системе тяги на однофазном токе явные преимущества перед системой постоянного тока и во всяком случае, по меньшей мере, равенство в экономическом отношении. Поэтому важнейшей

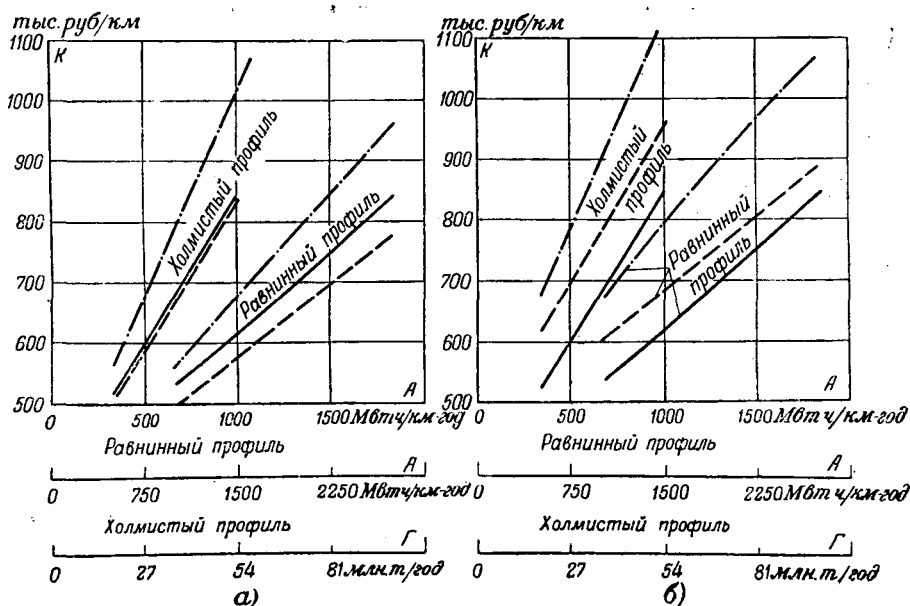


Рис. 1. Суммарные капитальные затраты.

а — без учета затрат на переустройство связи; б — с учетом затрат на переустройство связи; — при системе постоянного тока 3,3 кВ; --- при системе однофазного тока 22 кВ, 50 Гц и электровозах со статическими преобразователями; ... — при электровозах с вращающимися преобразователями.

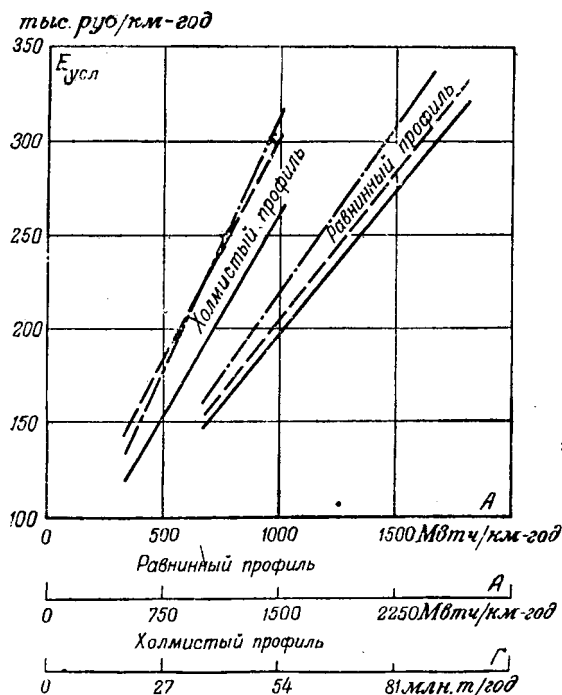


Рис. 2. Ежегодные расходы (обозначения см. рис. 1).

задачей в области развития системы однофазного тока является сосредоточение усилий научных организаций и проектирующих институтов на таких вариантах, которые могут дать, кроме технического, также и необходимое экономическое решение.

Необходимо, в частности, подчеркнуть важность быстрой разработки внедрения полупроводниковых выпрямителей для тяговых подстанций постоянного тока и для электровазов переменного тока.

Можно ожидать, что использованию электровазов однофазного тока с вращающимися преобразователями будут препятствовать их высокая стоимость и низкий к. п. д. Бесспорно одно: для всех типов железных дорог система однофазного тока является наиболее обещающей при электровазах с ионными преобразователями, обеспечивающими рекуперативное торможение.

Что касается системы постоянного тока, то необходимо подчеркнуть, что здесь, в свою очередь, имеются большие резервы для повышения экономической эффективности электрической тяги. Если значительное уменьшение расхода цветного металла и стоимости тяговых подстанций при системе тяги на однофазном токе достигается приближением высокого напряжения к потребителю (электровазу), то следует отметить, что приближение высокого напряжения к потребителю возможно и при системе постоянного тока.

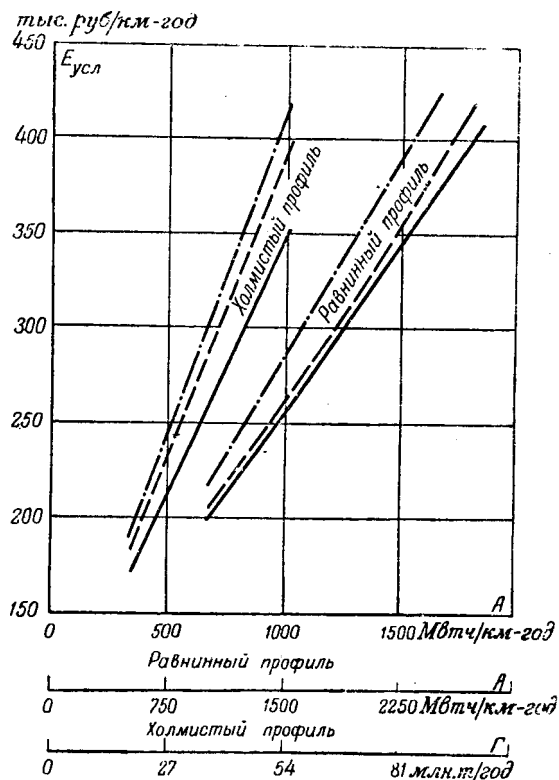
Для этой цели необходимо перейти на систему распределенного питания через одноагрегатные тяговые подстанции — так называемые преобразовательные пункты. При этом вместо многоагрегатных тяговых подстанций, сооруженных при так называемой системе централизованного питания на расстояниях 25 ... 30 км друг от друга,

ставятся одноагрегатные подстанции на расстоянии 8 ... 12 км друг от друга. В одном из вариантов питание этих подстанций намечено от трехфазной линии передачи 35 кВ, располагаемой на опорах контактной сети с полевой стороны.

Питание этой линии производится от районных подстанций, расположенных друг от друга на расстоянии 60 ... 70 км и питаемых от линий передачи 110 ... 220 кВ. В том случае, если в районе такие подстанции уже имеются, даже если расположены несколько в стороне от линии железной дороги, то и в этом случае они могут быть использованы, и строить специально для нужд дороги такие «опорные» подстанции нет необходимости. В последнее время выдвигается и другой вариант непосредственного питания преобразовательных пунктов от линии 110 кВ, что экономически оправдывается при значительном упрощении схемы их присоединения к питающей линии.

При системе распределенного питания наиболее удобным является применение запаянных воздухоохладительных выпрямителей. Однако нет сомнений в том, что здесь могут быть использованы и выпрямители с замкнутой (циркуляционной) системой водовоздушного охлаждения. Преобразовательные пункты должны быть полностью автоматизированы и телеуправляемы. Система рассчитывается так, что при выпадении любой подстанции сохраняются нормальные условия для движения.

Основное отличие в работе системы распределенного питания от системы централизованного заключается в том, что при возникновении боль-

Рис. 3. Условные ежегодные расходы ($E_{усл} = E + 0,1K$) (обозначения см. рис. 1).

ших тяговых нагрузок около одного из преобразовательных пунктов эта нагрузка распределяется между рядом смежных преобразовательных пунктов, уменьшая максимальную нагрузку данного преобразовательного пункта (подстанции), тогда как при централизованном питании эта «помощь» от смежных подстанций сказывается в значительно меньшей степени и поэтому обычно не учитывается.

Такая схема питания позволяет уменьшить необходимое сечение проводов до 140 ... 200 мм². При этом становится целесообразным переходить на контактные провода с пониженным расходом меди.

При варианте с питающим трехфазным фидером 35 кВ (ЗАС-95) потребуются затраты около 285 мм² алюминия на два пути, т. е. по 86 мм² на путь в медном эквиваленте. Однако наличие этой линии позволит отказаться от линий автоблокировки (6 или 10 кВ) и широко использовать эту линию для механизации работ по ремонту пути, а также для освещения всех промежуточных станций, будок и т. п.

При этой системе увеличивается ток короткого замыкания и одновременно падает максимальный нагрузочный ток, вследствие чего значительно облегчается защита от токов короткого замыкания в контактной сети (один из больших и трудно решаемых вопросов), уменьшаются в 2 с лишним раза потери энергии в контактной сети, уменьшаются в 2 ... 2,5 раза блуждающие токи. Потери напряжения в контактной сети уменьшаются примерно в 2 раза.

Преобразовательные пункты должны представлять собой до предела упрощенные одноагрегатные подстанции. Именно это, т. е. переход на один агрегат, позволит резко сократить стоимость таких подстанций.

Стоимость такой одноагрегатной подстанции будет очень невысокой, что можно показать следующим образом. Если рассматривать преобразовательную установку на электровозе как одноагрегатную подстанцию, то для определения стоимости такой одноагрегатной подстанции следует из стоимости электровоза вычесть стоимость всей механической части, тяговых двигателей, вспомогательных машин и т. п., и добавить незначительные расходы на некоторые дополнительные устройства. В этом случае расходы по тяговым подстанциям окажутся намного меньшими, чем в настоящее время.

Второй вариант распределенного питания позволяет обойтись без дополнительной трехфазной линии 35 кВ, что дает экономию алюминия. Этот вариант может рассматриваться, если напряжение в линиях не более 110 кВ и если она идет вдоль железной дороги в непосредственной близости от нее.

Наибольший эффект будет достигнут, если перейти на изготовление одноагрегатных подстанций полностью на специальных заводах, сведя до минимума сборочные работы на месте и полностью отказавшись от строительных и монтажных работ.

Опыт эксплуатации некоторых дорог показал, что выпускаемые нашей промышленностью электровазы надежно работают при напряжении до 4 000 в. Специально проведенные статические исследования показали, что такое повышение напряжения никак не ведет к увеличению повреждаемости тяговых двигателей (нагревание двигателей вследствие уменьшения токов уменьшается, следовательно, уменьшается и износ изоляции).

Повышение напряжения до 4 000 в позволит повысить мощность электровозного парка на 10 ... 20%, что может быть использовано для повышения скоростей, а следовательно, и пропускной способности, или увеличения весов поездов, или для удлинения срока службы изоляции тяговых двигателей. Но при таком повышении нельзя допускать колебаний напряжения на шинах тяговых подстанций, наблюдающихся в обычных условиях. Для устранения этого явления необходимо применить автоматическое регулирование напряжения, имеющее и самостоятельное значение, особенно в условиях сгущения поездов на участке. Такое увеличение напряжения в пределах действующего оборудования дает увеличение располагаемой (могущей быть использованной) мощности электроподвижного состава на 10 ... 20%, уменьшение числа преобразовательных пунктов или сечения проводов на 20%, уменьшение блуждающих токов на 20% и уменьшение защиты от токов короткого замыкания до практически полного разрешения этой проблемы, требуя совершенно незначительных средств для его проведения.

Предложения МИИТ по повышению надежности схем электровоза при работе в рекуперативном режиме и устройству приемников избыточной энергии даст весьма большой экономический эффект, тем более, что позволит одновременно значительно повысить скорость движения.

Имеется ряд очень интересных предложений по дальнейшему уменьшению насыщения тяговых двигателей, что позволит значительно повысить использование электровазов путем увеличения их силы тяги в зоне высоких скоростей.

Значительный эффект в этой же области может дать внедрение автоматического регулирования тягового процесса на электровозе. Проведенные в МИИТ исследования показали возможность повышения напряжения в контактной сети до 5 ... 6 кВ за счет увеличения числа последовательно соединенных двигателей, при одновременном улучшении тяговых свойств электровоза. Это может быть достигнуто и при тяговых двигателях с неявно выраженными полюсами, шихтованной сталью статора и компенсационной обмоткой.

Реализация этих и других изложенных выше предложений может дать немалое увеличение экономической эффективности системы электрической тяги на постоянном токе. Вопросы модернизации этой системы (в первую очередь 3,3 кВ) заслуживают самого серьезного внимания.

[26. 11. 1956]



Давление ветра на провода и тросы¹

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

При больших расчетных скоростях ветра давление его на провода, тросы и опоры воздушных линий в нормальных режимах работы определяет размеры бревен деревянных опор и веса металлических опор.

Давление ветра на провода по Правилам устройства электротехнических установок подсчитывается по формуле

$$P = kaqF \sin \theta,$$

где F — площадь диаметрального сечения провода или троса;

q — скоростной напор ветра;

k — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления;

a — коэффициент неравномерности распределения ветра по пролету;

θ — угол встречи воздушного потока с проводом.

Давление P находится по наибольшей расчетной скорости ветра, при этом предполагается, что он направлен горизонтально и перпендикулярно к трассе линии.

Расстояния между опорами, поддерживающими провода воздушных линий высокого напряжения, составляют 100 ... 500 м.

Наблюдения показывают, что расчетная скорость ветра не бывает наибольшей одновременно по всей длине пролета. Кроме того, вследствие турбулентности воздушного потока горизонтальное направление струй воздушного потока сохраняется только на части пролета. Углы встречи воздушного потока с проводом на большей части пролета меньше 90°.

Для учета указанных факторов в формулу определения давления ветра вводится коэффициент неравномерности распределения ветра по пролету a . По Правилам устройства электротехнических установок a принимается равным 0,85. Эта величина коэффициента установлена без каких-либо опытных данных.

Отметим, что все остальные коэффициенты, входящие в формулу для определения давления ветра на провода и тросы, установлены на основании опытных данных.

Полевые испытания последних лет [Л. 1, 2] подтвердили имевшиеся предположения, что коэффициент неравномерности a зависит от ряда причин — скорости ветра, длины пролета, рельефа местности и т. д.

При скоростях ветра $v \leq 15$ м/сек и высоте 20 ... 25 м над уровнем земли коэффициент неравномерности a для линий с любыми пролетами равен 0,8 ... 0,85; в отдельных случаях он достигает единицы. Такое же значение коэффициента a характерно для линий с пролетами $l \leq 100$ м и при более низких скоростях ветра ($v > 15$ м/сек).

По мере увеличения скорости ветра и длины пролета коэффициент неравномерности уменьшается. Для линий с пролетами, большими 100 м, при скоростях ветра 20 ... 30 м/сек он лежит в пределах 0,30 ... 0,55, а при скоростях 30 ... 40 м/сек — 0,30 ... 0,40.

В прибрежных районах Швеции коэффициент a примерно в 2 раза больше, чем во внутренних районах страны. Последнее объясняется тем, что воздушный поток, проходящий во внутренних районах над неровной поверхностью земли, имеет более турбулентное строение, чем над поверхностью моря.

Давления ветра, измеренные в Швеции, Франции и Бельгии при многолетних наблюдениях на воздушных линиях, приведены в таблице [Л. 2]. Для сравнения в ней даны и давления ветра, получаемые по формуле, рекомендуемой Правилами устройства электротехнических установок.

Скорости ветра, м/сек	Давление ветра на провода, кг/м ²						полученные по формуле, рекомендуе- мой Правила- ми устройств
	полученные путем измерений						
	в Швеции		во Франции		в Бельгии		
	наиболь- шее	среднее	наиболь- шее	среднее	наиболь- шее	среднее	
20 ... 25	19,6	13,8	26,1	16,0	24,6	18,9	25,5 ... 39,8
25 ... 30	17,4	14,5	29,0	20,3	37,7	27,5	39,8 ... 57,3
30 ... 35	—	—	29,0	24,8	—	—	57,3 ... 78,0
35 ... 40	—	—	49,3	29,0	—	—	78,0 ... 102

Из таблицы видно, что полученные в результате измерений давления ветра на провода, а следовательно и коэффициенты неравномерности значительно меньше предписываемых Правилами устройства электротехнических установок.

Поскольку давление ветра на провода и тросы, как указывалось ранее, в ряде случаев определяет размеры и веса опор и их элементов, необходимо, по мнению автора, не дожидаясь общего пересмотра раздела «Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 000 в» Правил устройства, уточнить рекомендацию по определению давления ветра на провода и тросы при расчетах линий. Это мероприятие даст значительную экономию денежных и материальных средств при строительстве линий в Советском Союзе.

По мнению автора, впредь до установления коэффициента a опытным путем следовало бы с достаточной перестраховкой принять следующие значения коэффициента неравномерности.

1. Для линий с пролетами $l \leq 100$ м при всех скоростях ветра и для линий с любыми пролетами при скоростях ветра $v \leq 15$ м/сек, $a = 0,80$.

2. Для линий с пролетами больше 100 м при скоростях ветра 20 ... 29 м/сек $a = 0,70 ... 0,65$, а при скоростях ветра 30 ... 40 м/сек $a = 0,60 ... 0,55$.

¹ Печатается в порядке обсуждения.

О перспективах применения электропередач постоянного тока в Советском Союзе¹

Инж. Н. М. МЕЛЬГУНОВ

Ленинград

В настоящее время можно считать доказанной возможность создания устойчиво работающих электропередач постоянного тока. Вместе с этим при достаточно большой дальности и передаваемой мощности передачи постоянного тока экономически выгоднее трехфазных, так как может быть осуществлена дешевле не только их линейная часть, но и подстанционные устройства [Л. 1].

При каждом данном уровне развития высоковольтной техники электропередачи постоянного тока могут быть осуществлены на более высокие номинальные напряжения, чем трехфазные, причем в первом случае имеется в виду междуполюсное, а во втором междуфазное напряжение. Как показывают исследования и проектные разработки НИИПТ и ТЭП, уровень изоляции, принятый у нас до настоящего времени для воздушных трехфазных линий 400 кВ, достаточен для линий постоянного тока с номинальным междуполюсным напряжением более 800 кВ. Уровни изоляции основного подстанционного оборудования трехфазной электропередачи 400 кВ и передачи постоянного тока 800 кВ примерно одинаковы.

Важнейшей технической особенностью электропередач постоянного тока является возможность осуществления их линейной части кабелем.

В Советском Союзе начаты исследования и разработки по созданию дальних электропередач переменного тока с номинальным междуфазным напряжением 600 кВ. Можно и должно поставить вопрос об осуществлении электропередач постоянного тока на напряжение между проводами 1 200 кВ (± 600 кВ относительно земли), так как в таких передачах предвидится необходимость, а уровень их изоляции и габариты примерно одинаковы с уровнем изоляции и габаритами электропередач переменного тока 600 кВ.

Как показали разработки, проводившиеся в Советском Союзе и в Швеции, трехфазная высоковольтная воздушная линия стоит примерно на 17% дороже линии постоянного тока, номинальное напряжение которой в 2 раза выше напряжения указанной трехфазной линии, а сум-

марное сечение проводов сравниваемых линий одинаково [Л. 1].

Важным преимуществом электропередач постоянного тока является возможность использования земли в качестве обратного провода в случае выхода из работы одного из проводов. Следовательно, при блочном выполнении электропередачи постоянного тока потребует меньшего числа цепей, чем передача трехфазного тока.

Для повышения дальности и пропускной способности электропередач постоянного тока не требуется каких-либо специальных мер (продольная и поперечная компенсация, промежуточные переключательные пункты и т. п.), которые необходимы для трехфазных передач и весьма сильно повышают стоимость подстанционных устройств последних. Электропередачи постоянного тока имеют высокую кратковременную перегрузочную способность, которой не обладают дальние передачи переменного тока вследствие ограничений по устойчивости.

Основным недостатком передач постоянного тока является необходимость иметь на конечных подстанциях преобразователи с высоковольтными вентилями, усложняющие эксплуатацию передачи и удорожающие стоимость ее сооружения. Стоимость конечных подстанций электропередачи постоянного тока напряжением 800 кВ и мощностью 500...600 Мвт обычно выше стоимости конечных подстанций передачи переменного тока напряжением 400 кВ и той же мощности. Если же ввиду большой дальности и мощности передача трехфазного тока 400 кВ потребует промежуточных устройств для повышения устойчивости (продольная компенсация, переключательные пункты, поперечные реакторы и пр.), то преимущество в отношении стоимости подстанционных устройств будет, как правило, на стороне электропередачи постоянного тока.

Для мощных и дальних электропередач трехфазного тока напряжением 600 кВ требуется большая степень продольной и поперечной компенсации. Поэтому подстанционные устройства этих передач будут всегда значительно дороже подстанционных устройств соответствующих передач постоянного тока напряжением 1 200 кВ.

¹ Печатается в порядке обсуждения.

3. Давление ветра на провода и тросы при высоте подвески их $h \leq 30$ м ни при каких условиях не должно приниматься более 50 кг/м^2 диаметрального сечения проводов.

При таких коэффициентах неравномерности давления ветра на провода и тросы для скоростей выше 20 м/сек , принимаемое при расчетах линий, снизится в 1,2...1,55 раза. При большом объеме строительства линий в СССР это даст существенный народнохозяйственный эффект.

Литература

1. O. D. Zetterholm, S. Sandin. Давление ветра на провода воздушных линий. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 1954.

2. G. H. Marchal, A. Jacques, G. Dienne. Действие ветра на провода воздушных линий. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 1956.

[7. 9. 1956]



Необходимые уточнения стоимости, очевидно, будут возможны только после дальнейших исследований, проектных разработок и составления смет.

Как показывают производившиеся в последние годы эскизные проектные разработки по передачам постоянного тока, их применение может давать значительную экономическую выгоду по сравнению с трехфазными при дальностях свыше 500 ... 600 км и мощностях 700 ... 800 Мвт и выше.

Возможные в Советском Союзе электропередачи постоянного тока. Как известно, две ближайшие по времени ввода в действие электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва (1 Гвт) и Сталинградская ГЭС — Москва (1,5 Гвт) на расстояние около 1 000 км выполняются на переменном токе 400 кВ. Кроме этого, дальнюю электропередачу Куйбышевская ГЭС — Урал предполагается выполнить также на переменном токе 400 кВ.

По своей дальности и мощности эти электропередачи подходят для осуществления их на постоянном токе; на них в полной мере могли бы быть реализованы большие технико-экономические преимущества этой системы. Расчеты (с учетом промежуточных нагрузок), произведенные в конце 1952 г., показали, что при выполнении электропередачи Сталинградская ГЭС — Москва на постоянном токе (вместо переменного) средняя ежегодная экономия составила бы 45 ... 65 млн. руб. в зависимости от варианта. Однако сооружение этих электропередач потребовалось раньше, чем была подготовлена необходимая для передач такого масштаба техника постоянного тока.

Большие перспективы применения электропередач постоянного тока в Советском Союзе определяются тем, что основные наиболее крупные районы потребления электроэнергии территориально удалены от возможных районов экономического производства электроэнергии.

До последнего времени было распространено мнение, что дальняя передача больших количеств электроэнергии целесообразна только от гидроэлектростанций. Однако проведенные в последнее время предварительные подсчеты позволяют поставить вопрос о том, что дальняя передача энергии от тепловых электростанций, расположенных в районах добычи дешевого угля, более целесообразна, чем перевозка этого угля по железной дороге.

Конечно, окончательное суждение о целесообразности в том или ином случае дальней электропередачи постоянного тока по сравнению с перевозкой энергетического топлива по железной дороге можно иметь только после всестороннего анализа, учета наличия или отсутствия технических возможностей требуемого увеличения перевозок, необходимости нового строительства или реконструкций, например перевода на электрическую тягу и т. п. Такие разработки пока отсутствуют.

На данной, начальной, стадии разработок по единой энергетической системе целесообразно предварительно наметить различные возможные и экономически вероятные перспективные пере-

дачи постоянного тока, учитывая предполагаемое размещение будущих тепловых и гидроэлектростанций и ожидаемые от них потоки энергии в основные центры потребления.

Новым фактором является возможность сооружения в районах потребления электроэнергии мощных атомных электростанций, однако эту возможность мы здесь не учитываем.

В Европейской части СССР имеется два основных района потребления электроэнергии, которые не обеспечены в достаточной мере местным энергетическим топливом и для которых может потребоваться дальняя передача больших количеств электроэнергии на постоянном токе. К этим районам относятся: Центральный, включая Москву, и Уральский (от Молотова и Серова на севере до Челябинска и Магнитогорска на юге).

Значительная часть потребного топлива завозится в Центральный район из Донбасса на расстояние около 1 000 км. Если необходимая для Центрального района электроэнергия будет и впредь вырабатываться на тепловых электростанциях, располагаемых на территории этого района, то в дальнейшем потребность в привозном топливе резко возрастет.

Можно предполагать, что в перспективе в Северную часть Центрального района уголь будет завозиться также из Воркутинского угольного бассейна на расстояние около 2 000 км.

Возрастающая потребность Урала в энергетическом топливе может покрываться прежде всего за счет привоза дешевых сибирских углей из района Красноярска на расстояние около 2 000 км и района Павлодара (Экибастузское месторождение) на расстояние около 1 200 ... 1 300 км, а также за счет привоза воркутинских углей на расстояние около 1 000 ... 1 200 км, если будет сооружена прямая железная дорога Воркута—Ивдель, и значительно дальше, если перевозки будут производиться через Котлас.

Однако развитие электроснабжения Центрального района и Урала можно базировать и не на дальнепривозном топливе, а на получении ими готовой энергии по проводам сверхдальних электропередач постоянного тока. Наиболее вероятным является оптимальное сочетание этих возможностей, которые надлежит выяснить путем всесторонней разработки вариантов и их сопоставления.

В соответствии с ожидаемыми в перспективе главными потоками электроэнергии и энергетического топлива (рис. 1) наметим возможные электропередачи постоянного тока большой дальности и мощности.

Двухцепная электропередача Донбасс—Центр напряжением ± 600 кВ, пропускной способностью 5 Гвт, дальностью 1 000 км, с годичной передачей энергии 40 млрд. кВтч позволила бы сократить примерно вдвое объем железнодорожных перевозок энергетического угля для некоторого перспективного года в пятилетии 1965—1970 гг.

Если бы было признано целесообразным осуществлять электроснабжение Центра от тепловых электростанций, построенных в Печорском угольном бассейне, то оказалось бы необходимым

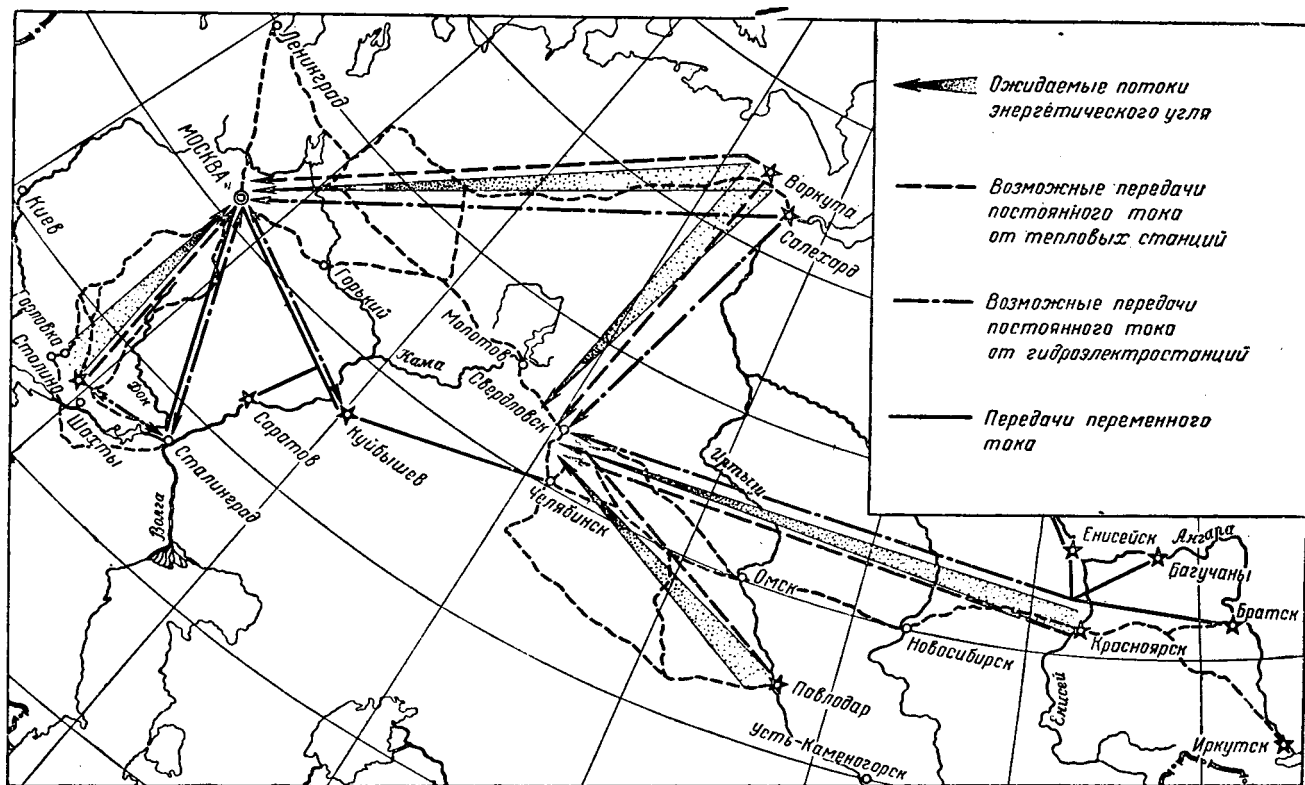


Рис. 1. Возможные электропередачи постоянного тока.

сооружение электропередачи Воркута—Центр дальностью около 2 000 км.

Если в результате производимых изысканий окажется целесообразным строительство гидроэлектростанции в низовьях р. Оби, то возникнет необходимость в электропередаче Нижне-Обская ГЭС—Центр, примерно совпадающей с предыдущей по направлению и мощности. Годовая передача энергии от этой станции составит около 30 ... 35 млрд. кВт·ч.

При установленной мощности трех крупнейших волжских гидроэлектростанций—Куйбышевской, Сталинградской и Саратовской—в 5,4 Гвт и особенно в случае сооружения еще одной ГЭС ниже Сталинградской запроектированная пропускная способность электропередач переменного тока Куйбышевская ГЭС—Москва и Сталинградская ГЭС—Москва (около 2,5 Гвт) окажется недостаточной. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос об увеличении пропускной способности указанных электропередач и повышении их к. п. д. путем перевода одной цепи передачи Куйбышевская ГЭС—Москва на постоянный ток напряжением 800 ... 1 200 кв, а также сооружения одной цепи электропередачи Сталинградская ГЭС—Москва не на переменном, а на постоянном токе напряжением 800 ... 1 000 кв, что позволит увеличить пропускную способность этих двух цепей до 2 ... 3,5 Гвт. Питание промежуточных нагрузок при этом можно осуществить от двух других цепей указанных электропередач.

Для электроснабжения районов промышленного Урала возможны две предположительно двухцепные дальние электропередачи постоянного тока: от гидроэлектростанций Енисейско-Ангар-

ского каскада дальностью около 2 300 км, напряжением 1 200 (± 600) кв, пропускной способностью 5 Гвт, с годовой передачей энергии около 35 ... 40 млрд. кВт·ч и от тепловых электростанций района Красноярск дальностью около 2 000 км, напряжением 1 200 (± 600) кв, пропускной способностью 5 Гвт, с годовой передачей энергии около 40 млрд. кВт·ч.

Кроме указанных, возможны следующие предположительно двухцепные электропередачи на Урал: из Экибастузского угольного месторождения дальностью около 1 200 км, напряжением 1 200 (± 600) кв, пропускной способностью около 5 Гвт, с годовой передачей энергии около 40 млрд. кВт·ч; от упоминаемой выше Нижне-Обской ГЭС дальностью около 1 300 км, напряжением 1 200 (± 600) кв или тепловых станций Воркутинского угольного бассейна, пропускной способностью 5 Гвт, с годовой передачей энергии около 30 ... 35 млрд. кВт·ч.

Основные инженерные вопросы осуществления дальних электропередач постоянного тока. Принципиальная схема одной блочной цепи электропередачи постоянного тока представлена на рис. 2. Линейная часть передачи разделена двусторонними заземлениями средних точек схемы на две полуцепи (полюса)—положительную и отрицательную. В случае необходимости каждая полуцепь может работать независимо от другой с возвратом тока через землю. Преобразователи показаны условно прямоугольниками, также условно показано их присоединение к системам переменного тока.

Очевидно, при очень большой протяженности линий важно иметь минимально возможное число

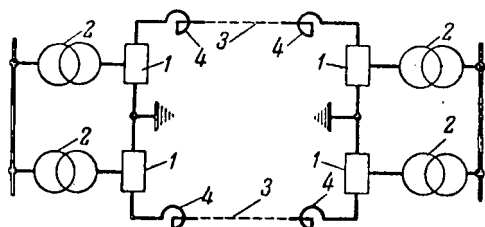


Рис. 2. Принципиальная схема одной цепи электропередачи постоянного тока.
1 — преобразователи; 2 — трансформаторы; 3 — полюса электропередачи; 4 — линейные реакторы.

цепей, так как с ростом числа цепей быстро растет стоимость и снижаются экономические показатели передачи. Для линий сравнительно небольшой протяженности и пропускной способности, характерных для некоторых передач Европейской части СССР, вероятно одноцепное исполнение.

Возможно кабельное исполнение. В настоящее время сконструирован кабель на напряжение 400 кВ относительно земли, с алюминиевой жилой сечением 1 000 мм², бумажной изоляцией, вязкой пропиткой и свинцовой оболочкой. В связи с предлагаемым сооружением особо дальних и мощных электропередач с Научно-исследовательским институтом кабельной промышленности и заводом «Москабель» предварительно была согласована возможность изготовления в дальнейшем кабеля постоянного тока такого же типа, но напряжением 1 200 кВ (± 600 кВ относительно земли), с сечением жилы до 1 500 мм² и алюминиевой оболочкой.

Важно отметить, что с увеличением номинального напряжения кабеля постоянного тока толщина бумажной изоляции изменяется примерно следующим образом:

Напряжение, кВ	400	600	800	1 000	1 200
Толщина изоляции, мм	12	16	18	21	24 . . . 25

С другой стороны, с увеличением сечения жилы кабеля длина окружности и объем изоляции кабеля растут значительно медленнее, чем сечение. Следовательно, рост напряжения и сечения жилы кабеля не приводит к резкому увеличению стоимости кабеля. Например, при переходе от кабеля с сечением жилы 1 000 мм² и напряжением 600 кВ к кабелю 1 500 мм² и 1 200 кВ, чему соответствует увеличение пропускной способности линии почти в 6 раз, стоимость кабеля повышается приблизительно только в 1,5 раза. Таким образом, чем мощнее передача, тем экономически вероятнее применение кабеля. Учитывая допускаемые кабелями максимальные токи, возможна прокладка двух кабелей на полюс цепи.

Провод-полюс воздушной мощной дальней электропередачи будет выполняться расщепленным на три—четыре сталеалюминиевых провода большого сечения. Предполагается, что для менее мощных европейских электропередач суммарное сечение алюминия в проводе-полюсе одной цепи составит примерно 1 200 ... 2 100 мм², а для более дальних и мощных сибирских — 2 800 ... 3 000 мм².

Применение расщепленных проводов целесообразно с точки зрения снижения потерь на корону.

ну, которые значительно возрастают с повышением напряжения. Это возрастание характеризуется следующими ожидаемыми среднегодовыми потерями на корону (кВт на 1 км цепи) для климатических условий Европейской части СССР при расположении на одной опоре проводов разной полярности:

	800 кВ	1 000 кВ	1 200 кВ
3×580 мм ²	0,36	1,40	4,60
3×712 мм ²	0,28	0,84	2,96
4×712 мм ²	0,10	0,17	0,47
1×1 740(3×580) мм ²	1,55	4,30	7,30
1×2 136(3×712) мм ²	0,81	2,72	6,05

Для сравнения в нижних строчках приведены потери в нерасщепленных проводах равного суммарного сечения.

В последнее время выдвигается предложение о снижении уровня изоляции мощных трехфазных линий и подстанций напряжением 400 кВ и выше путем ограничения внутренних перенапряжений при помощи разрядников. Следует отметить, что имеются не меньшие возможности для снижения внутренних перенапряжений и в линиях электропередачи постоянного тока.

В настоящее время можно ориентироваться только на преобразователи с металлическими ртутными вентилями, которые разрабатываются и исследуются в СССР пока на максимальные токи 900 а и напряжения до 100 ... 130 кВ. Для перечисленных выше возможных электропередач постоянного тока потребуются вентили на токи до 2 000 ... 2 500 а и напряжения до 180 ... 200 кВ.

Два варианта принципиальной схемы преобразовательного устройства полупериода передачи постоянного тока напряжением относительно земли 400 кВ представлены на рис. 3. Каждый из вариантов имеет последовательно включенные мостовые преобразователи (мосты), причем в варианте а два одинаковых моста с несколькими последовательно включенными вентилями в плече моста (маломостовая, многовентильная схема), а в варианте б несколько последовательно включенных мостов с одним вентилем в плече моста (многомостовая, одновентильная схема).

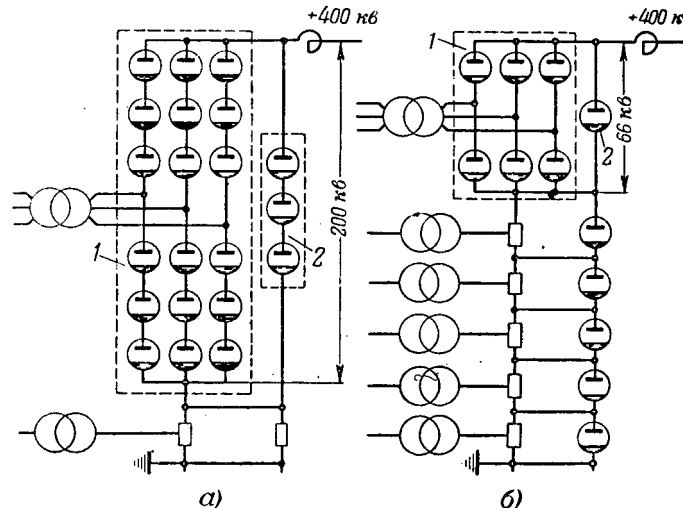


Рис. 3. Варианты принципиальной схемы преобразовательного устройства.
1 — мост; 2 — удлиняющее устройство.

Вариант	Потери энергии, %			Капиталовложения, млн. руб.			Эксплуатационные расходы, млн. руб.		Себестоимость передачи 1 квт·ч, коп	
	в линии	на подстанциях	всего	в линиях	на подстанциях	всего	при передаче от ГЭС	при передаче от ТЭС	при передаче от ТЭС	при передаче от ТЭС
Первый	4,17	2,39	6,56	590	620	1 210	85,3	118,7	0,26	0,36
Второй	6,11	2,39	8,50	1 360	620	1 980	128	174	0,36	0,54

По мере роста мощности и дальности электропередач постоянного тока и повышения их напряжения потребуются увеличение мощности и напряжения преобразователей выпрямительных и инверторных подстанций, которого можно достигнуть следующими путями: повышением напряжения и тока вентилей или групповым соединением вентилей [Л. 4]; увеличением мощности отдельных мостов или увеличением числа последовательно включаемых мостов.

В настоящее время еще нет возможности указать на ту или иную схему преобразования как на достаточно проверенную опытом эксплуатации. Поэтому необходимо продолжать исследование как вентилей, так и схем преобразования. В частности, следует предусмотреть возможность таких исследований на электропередаче Сталинградская ГЭС — Донбасс.

О технико-экономическом эффекте электропередач постоянного тока. Для предварительного и сугубо ориентировочного выяснения основных показателей намеченных выше электропередач постоянного тока были произведены расчеты двух вариантов электропередачи, которая по исполнению, дальности и мощности близка к намеченным выше. Первый вариант — электропередача с двухцепной воздушной линией длиной 1 000 км с проводами $3 \times 712 \text{ мм}^2$. Второй вариант — электропередача с такой же линией длиной 2 000 км с проводами $4 \times 712 \text{ мм}^2$.

Передаваемая мощность и номинальное напряжение для обоих вариантов приняты одинаковыми — 5 Гвт и 1 200 (± 600) кв. Оба варианта без промежуточных подстанций.

На основе предыдущих разработок, с учетом шведских данных [Л. 1] стоимость 1 км воздушной линии постоянного тока принята равной 85,5% стоимости линии переменного тока вдвое меньшего номинального напряжения (600 кв), но одинакового суммарного сечения проводов. Исходные стоимости линии переменного тока 600 кв приняты по последним данным Теплоэлектропроекта. Для первого варианта стоимость 1 км оказалась равной 2×295 , а для второго — 2×360 тыс. руб. В принятых стоимостях местные климатические особенности не учитываются; для их уточнения требуются специальные проектные разработки.

Стоимость инверторных подстанций оценена ориентировочно с учетом компенсирующих устройств, обеспечивающих коэффициент мощности, выдаваемой инвертором, равным 1, причем одна половина этих устройств принята в виде синхронных компенсаторов, а другая — статических конденсаторов.

Стоимость 1 квт·ч потерянной энергии при передаче от тепловых станций принята равной 3 коп., а от гидроэлектростанций 1 коп. Головные

отчисления на эксплуатационные расходы для линий приняты в 3,5%, а для подстанций в 7%.

Полученные в результате расчета данные приведены в таблице. Из этих данных предположительно можно сделать вывод о том, что стоимость передачи энергии по рассматриваемой линии постоянного тока будет по крайней мере в 1,8 ... 2 раза меньше, чем по линиям переменного тока напряжением 600 кв. Очевидно, для особо дальних электропередач повышение номинального напряжения линий переменного тока не может изменить в их пользу это соотношение.

Особо следует остановиться на одном возращении против дальних электропередач постоянного тока, которое часто выдвигается и состоит в том, что от них, якобы, невозможен промежуточный отбор мощности ввиду отсутствия выключателей постоянного тока.

Во-первых, намеченные выше особо дальние и мощные электропередачи постоянного тока предназначаются для решения важнейшей народнохозяйственной задачи — электроснабжения основных промышленных районов страны (Центр, Урал) и будут иметь весьма высокую постоянную загрузку. Поэтому ни технически, ни экономически нецелесообразно возлагать на них решение еще частной задачи — снабжение энергией промежуточных, по значению и масштабу во много раз меньших потребителей.

Во-вторых, в любой промежуточной точке электропередачи постоянного тока принципиально возможен отбор мощности через присоединенный к этой точке без выключателя инвертор. При наличии особого шунтирующего устройства отключение и включение инвертора можно осуществлять при помощи сеточного управления вентилей. Это подтверждается опытами на модели.

Возвращаясь к вопросу об экономической целесообразности замены массовых дальних перевозок энергетического топлива по железной дороге передачей энергии на постоянном токе, следует отметить, что если принять себестоимость перевозки по железной дороге в среднем 1,5 коп. за тоннокилометр, калорийность перевозимого топлива 3 500 ... 5 000 кал, расход условного топлива 0,4 кг/квт·ч, то стоимость перевозки количества угля, которое необходимо для выработки 1 квт·ч энергии, составит примерно 1,8 ... 2,7 коп., что в 2 ... 4 раза дороже передачи энергии по проводам на постоянном токе.

Литература

1. F. Lane, G. Rathsmann, U. Lamm, K. Smedsfelt. J. Direct Current, июнь 1956.
2. Л. Р. Нейман, С. Р. Глинттерник, А. В. Емельянов и Н. А. Шипулина. Групповое соединение вентилей как метод повышения надежности работы мощных преобразователей. Электричество, № 6, 1956.

Об одной из мер экономии цветного металла в городских сетях¹

Доктор техн. наук, проф. М. Д. КАМЕНСКИЙ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Кандидат техн. наук Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ

Ленинградский инженерно-экономический институт им. Молотова

Инж. Н. И. МЕДВЕДСКИЙ

Ленинградское отделение Гипрогора

Известно, что путем применения в городских электросетях вместо кабелей большого сечения двоянных кабелей малого сечения можно получить экономию меди [Л. 1 ... 4]. Однако такое «расщепление» кабельных линий нашло некоторое применение лишь в питающих сетях 6 (10) кВ, но в распределительных сетях 6 (10) кВ и в сетях низкого напряжения оно не получило распространения.

До настоящего времени широкому применению двоянных кабелей препятствовали: увеличение расхода свинца (табл. 1), не менее дефицитного, чем медь; недопустимость применения кабелей малых сечений из-за малой их устойчивости термическому действию тока короткого замыкания.

В настоящее время уже начат выпуск кабелей низкого напряжения без свинцовой оболочки, например, кабелей АБ. Можно ожидать выпуска таких кабелей и для напряжений 6 и 10 кВ. С внедрением кабелей без свинцовой оболочки будет устранено первое препятствие, и применение двоянных кабелей даст, как это видно из табл. 1, весьма значительную (20 ... 40%) экономию меди. Это будет иметь место во всех случаях, когда выбор сечения кабелей высокого и низкого напряжения определяется нагревом от тока нагрузки аварийного режима [Л. 5].

Применение двоянных кабелей только в отдельных случаях приведет к незначительному

удорожанию сети. Например, при усовершенствованных уличных покровах (асфальт, диабаз) стоимость прокладки 1 км одиночного кабеля 6 кВ, $3 \times 150 \text{ мм}^2$ составляет 97 тыс. руб., а стоимость прокладки 1 км двоянного кабеля 6 кВ, $2 \times 3 \times 70 \text{ мм}^2$ — 107 тыс. руб. Однако может быть и обратное соотношение затрат. Например, при обычных уличных покровах (булыжная мостовая, тротуар из бутовой плиты) стоимость прокладки 1 км одиночного кабеля 6 кВ, $3 \times 70 \text{ мм}^2$ составит 50,8 тыс. руб., а 1 км двоянного кабеля 6 кВ, $2 \times 3 \times 25 \text{ мм}^2$ — 43 тыс. руб.

Для кабелей с медной токоведущей жилой минимально-допустимое с точки зрения термической устойчивости тока короткого замыкания сечение

$$s_{\min} = \frac{I_{\infty} \sqrt{t_{\phi}}}{165} \quad (1)$$

Если на кабельной линии, отходящей от распределительной подстанции, установлены масляные выключатели, то даже при наименьшей выдержке времени максимальной токовой защиты (0,25 сек) и наибольшем в сети 6 кВ токе короткого замыкания (20 кА) сечение s_{\min} будет равно 60 мм², в то время как при обычном для сети 6 кВ токе короткого замыкания 10 кА оно равно 30 мм².

Чтобы преодолеть и это (второе) препятствие внедрению двоянных кабелей, необходимо каждый из кабелей двоянной линии 6 (10) кВ защи-

¹ Печатается в порядке обсуждения.

Таблица 1

Напряжение, кВ	Одиночный кабель					Двоянный кабель				
	Площадь поперечного сечения, мм ²	Пропускная способность при температуре грунта +16° С, а	Расход цветного металла, кг/км			Площадь поперечного сечения, мм ²	Пропускная способность с учетом двух кабелей в траншее, а	Расход цветного металла, кг/км		
			медь	свинец	всего			медь	свинец	всего
6	3×25	135	659	1 079	1 738	2×3×10	144	520	1 760	2 280
6	3×35	160	923	1 316	2 239	2×3×16	189	834	2 110	2 944
6	3×50	200	1 319	1 448	2 767	2×3×16	189	834	2 110	2 944
6	3×70	245	1 846	1 575	3 421	2×3×25	243	1 318	2 158	3 476
6	3×95	295	2 505	1 895	4 400	2×3×35	288	1 846	2 632	4 478
6	3×120	340	3 164	2 202	5 366	2×3×50	360	2 638	2 896	5 534
6	3×150	390	3 956	2 406	6 362	2×3×70	443	3 692	3 150	6 842
1	3×50+1×25	215	1 539	1 079	2 618	2×3×16+1×10	207	1 008	1 268	2 276
1	3×70+1×35	265	2 154	1 390	3 544	2×3×25+1×16	270	1 596	1 552	3 148
1	3×95+1×50	310	2 523	1 595	4 518	2×3×35+1×16	315	2 004	1 742	3 746
1	3×120+1×50	350	3 604	1 918	5 522	2×3×50+1×25	377	3 078	2 158	5 236
1	3×150+1×70	395	4 571	2 220	6 791	2×3×50+1×25	377	3 078	2 158	5 236
10	3×25	120	659	1 432	2 091	2×3×10	126	520	2 600	3 120
10	3×35	150	923	1 532	2 455	2×3×16	171	834	2 812	3 646
10	3×50	180	1 319	1 788	3 107	2×3×16	171	834	2 812	3 646
10	3×70	215	1 846	1 946	3 792	2×3×25	216	1 318	2 864	4 182
10	3×95	265	2 505	2 268	4 773	2×3×35	270	1 846	3 064	4 910
10	3×120	310	3 164	2 449	5 613	2×3×50	324	2 638	3 576	6 214
10	3×150	355	3 956	2 825	6 781	2×3×70	388	3 692	3 892	7 584

шать плавкими предохранителями, например, типа ПК-6 или ПК-10, так как длительность перегорания вставок этих предохранителей при токе короткого замыкания весьма мала.

При номинальном токе плавкой вставки предохранителя ПК-100 a и токе короткого замыкания на головном участке одной из сдвоенных линий распределительной сети 6 (10) кВ $I_{\infty} \approx I'' = 20$ ка полную длительность перегорания вставки, включая длительность гашения дуги, можно принять [Л. 6] равной $t_{\phi} \approx t_{\phi}'' = 0,0045$ сек. Тогда

$$s_{мин} \approx 8 \text{ мм}^2.$$

При $I'' = 10$ ка $s_{мин} \approx 6 \text{ мм}^2$, при $I'' = 7$ ка $s_{мин} \approx 5 \text{ мм}^2$, при $I'' = 5$ ка $s_{мин} \approx 4 \text{ мм}^2$.

Таким образом, при защите плавкими предохранителями применение сдвоенных кабелей 6 (10) кВ сечением $2 \times 3 \times 16 \text{ мм}^2$ и даже $2 \times 3 \times 10 \text{ мм}^2$ с точки зрения термической устойчивости вполне допустимо.

Для сдвоенных кабелей сети низкого напряжения аналогичный расчет дает следующие результаты.

При сетевом трансформаторе мощностью 320 кВА, напряжение короткого замыкания которого $e_k = 5,5\%$, ток короткого замыкания на стороне низкого напряжения

$$I'' \approx I_{\infty} = \frac{320 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} \cdot \frac{100}{5,5} = 8,4 \text{ ка}.$$

Если каждый из сдвоенных кабелей низкого напряжения сечением $(3 \times 50 + 1 \times 25) \text{ мм}^2$ защищен плавким предохранителем открытого типа с обычной вставкой из двух медных проволок на номинальный ток $I_n = 200$ а, то площадь поперечного сечения вставки $s_{вст} = 2,86 \text{ мм}^2$, а полная длительность ее расплавления при коротком замыкании:

$$t_{\phi} \approx t_{\phi}'' = \left(A' + \frac{A''}{n} \right) K_0 \frac{s_{вст}^2}{I_{\infty}^2}. \quad (2)$$

Для медной вставки $A' = 80\,000$, $A'' = 11\,600$; $n = 3$, $K_0 = 1,3$ [Л. 7, 11]. Следовательно,

$$t_{\phi} = 0,0125 \text{ сек}, \\ s_{мин} \approx 6 \text{ мм}^2$$

При сетевом трансформаторе мощностью 180 кВА $s_{мин} = 5 \text{ мм}^2$, 100 кВА — $2,5 \text{ мм}^2$.

Если обычную полузакнутую сеть 380/220 в и петлевую сеть 6 (10) кВ с замкнутой петлей

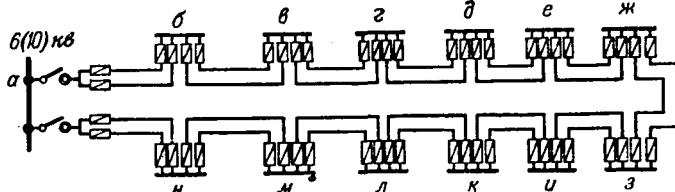


Рис. 1.

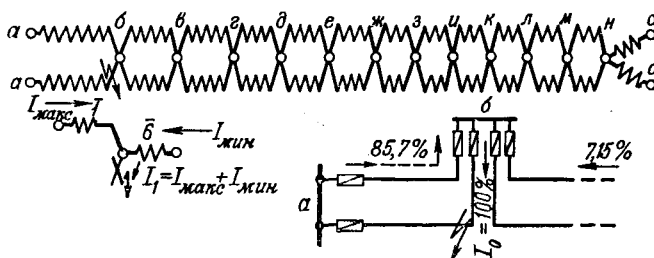


Рис. 2.

выполнить сдвоенными кабелями с защитой каждого кабеля плавкими предохранителями, то обеспечивается не только надежное, но и бесперебойное электроснабжение потребителей как в случае повреждения кабеля 6 (10) кВ или сетевого трансформатора, так и в случае повреждения кабеля низкого напряжения.

На рис. 1 показан участок обычной петлевой сети 6 (10) кВ, выполненный сдвоенными кабелями и работающий по замкнутой схеме. Согласно Руководящим указаниям по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока от петлевой линии рекомендуется питать от 10 до 14 сетевых подстанций, а на рис. 1 принято 12 подстанций при среднем расстоянии между ними 250 м. Сечение всех кабелей, которыми выполнена петлевая линия, одинаково и равно 50 мм^2 .

На рис. 2 даны расчетная схема этой сети, ее преобразование и показано распределение токов при коротком замыкании на одном из кабелей вблизи подстанции б, т. е. для наиболее неблагоприятного случая. Как видно, токи короткого замыкания, протекающие через предохранители в начале участка аб и через предохранитель поврежденного кабеля на подстанции б отличаются всего на 16%:

$$\frac{I_0}{I_{макс}} = \frac{100}{85,7} = 1,16.$$

Такая незначительная разница не позволяет считать обеспеченной селективность защиты, так как одновременно с перегоранием вставок предохранителей сдвоенного кабеля аб на подстанции б могут перегореть вставки предохранителей этого кабеля на подстанции а (рис. 2). Однако такая работа защиты, как видно из схемы сети, не вызовет перерыва в электроснабжении потребителей. Подстанция б будет продолжать питаться по второй половине петли.

На рис. 3 приведен такой же расчет для случая короткого замыкания на одном из кабелей участка бв вблизи подстанции в, т. е. тоже для наиболее неблагоприятного с точки зрения селективности защиты случая.

Здесь отношение $\frac{I_0}{I_{макс}} = \frac{100}{73,3} = 1,36$, т. е. более благоприятно, и можно быть уверенным в том, что перегорят вставки только у предохранителей на концах поврежденного кабеля, как это и показано на рис. 3.

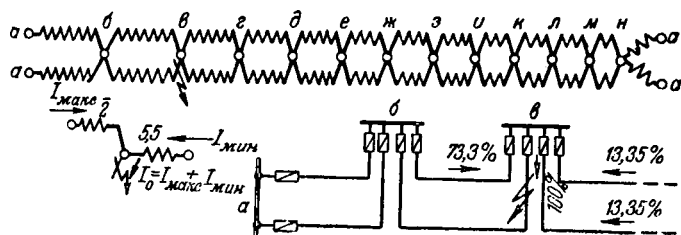


Рис. 3.

Чтобы установить возможность селективного перегорания плавких вставок предохранителей типа ПК в сети 6 (10) кВ при новой схеме, следует выяснить, при каком соотношении токов короткого замыкания, протекающих через эти предохранители, перегорит вставка ближайшего к месту короткого замыкания предохранителя и не успеет нагреться до температуры плавления такая же вставка следующего предохранителя, т. е. найти минимально необходимое для обеспечения селективности отношение $\frac{I_2}{I_1}$.

Длительность перегорания плавкой вставки предохранителя можно считать состоящей из трех частей [Л. 7, 11]:

$$t = t' + t'' + t''',$$

где t' — длительность нагрева вставки до температуры плавления;
 t'' — длительность перехода вставки из твердого состояния в жидкое;
 t''' — время разрыва металлической цепи тока и гашения дуги.

Если длительности, относящиеся к первому по ходу энергии предохранителю, обозначить индексом 1, а ко второму — индексом 2, то условие селективности будет иметь вид:

$$t'_1 \geq t'_2 + t''_2 + t'''_2. \quad (3)$$

Наиболее неблагоприятным с точки зрения селективности будет короткое замыкание вблизи трансформаторной подстанции б или н (рис. 1). Наибольший общий ток короткого замыкания в этом случае в среднем будет равен примерно 10 кА. Этот ток распределится по четырём кабелям «петли». Для указанного на рис. 2 и 3 токораспределения наибольший ток, протекающий по отдельному кабелю, будет равен примерно 5 кА. Следовательно, определение селективности предохранителей типа ПК следует производить для токов, равных 5 кА и менее.

Таблица 2

Ток короткого замыкания, а	t'	t''	t'''	t
2 500	0,0360	0,0040	0,0100	0,0500
3 000	0,0235	0,0025	0,0090	0,0350
3 500	0,0162	0,0018	0,0080	0,0260
4 000	0,0145	0,0015	0,0070	0,0230
5 000	0,0090	0,0010	0,0060	0,0160

Полученные на основании характеристик плавких предохранителей типа ПК [Л. 6] величины длительностей (сек) перегорания вставки предохранителя типа ПК-6 с номинальным током 100 а для различных токов короткого замыкания, протекающих по кабелю, приведены в табл. 2.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что условие селективности (3) обеспечивается при следующих отношениях $\frac{I_2}{I_1}$:

$$\frac{3,0}{2,5} = 1,2; \quad \frac{4,0}{3,0} = 1,33; \quad \frac{5,0}{3,5} = 1,43.$$

При меньших значениях отношений $\frac{I_2}{I_1} \left(\frac{3,5}{3,0} = 1,17, \frac{4,0}{3,5} = 1,14 \right)$ условие селективности (3) не обеспечивается.

В 1954 г. в Ленинградской кабельной сети было проведено испытание селективности перегорания вставок предохранителей типа ПК-6. Последовательно установленные в цепи тока предохранители включались на короткое замыкание в сети 6 кВ.

Расчетное значение тока короткого замыкания в месте испытаний составило 7 кА, а фактическое (по осциллограммам) 5 ... 6 кА.

Результаты повторных включений предохранителей типа ПК-6 с вставками разного номинального тока на двухфазное короткое замыкание приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что результаты испытаний показали полное совпадение опытных данных с расчетными.

Подобные же испытания, но с включением предохранителей на трехфазное короткое замыкание, были проведены в 1955 г. и дали те же результаты.

На основании расчетов и испытаний можно считать, что отношение токов $\frac{I_2}{I_1} = 1,25$ вполне обеспечивает селективность как при двухфазных, так и трехфазных коротких замыканиях; оно, повидимому, может быть принято за основу в дальнейших расчетах.

В приведенных выше примерах в первом случае (рис. 2) $\frac{I_2}{I_1} = 1,16 < 1,25$ и селективность не обеспечивается, а во втором (рис. 3) $\frac{I_2}{I_1} = 1,36 > 1,25$ и селективность обеспечивается.

Для обеспечения селективности перегорания предохранителей открытого типа с медными проволочными вставками, применяемых в сети низкого напряжения, требуется значительно меньшее, чем для предохранителей типа ПК, отношение $\frac{I_2}{I_1}$, равное 1,15 [Л. 7, 11].

На рис. 4 приведены схемы сети низкого напряжения и расчет селективности для случая короткого замыкания в кабеле. Как видно из этого расчета, селективность защиты сети низкого напряжения обеспечивается даже при

Таблица 3

Номинальный ток вставки предохранителя типа ПК-6, а	50	75	2×50	100	150	200
Диаметр проволоки, мм	0,38	0,47	0,38	0,38	0,38	0,38
Число проволок	6	6	2×6	12	18	24
Плщадь поперечного сечения, мм ²	0,675	1,04	1,35	1,35	2,03	2,7
Обеспечивается ли селективность	Обеспечивается по расчету и в действительности (перегорала вставка 50 а) $s_{75} : s_{50} = 1,54 > 1,25$		Не обеспечиваются ни по расчету, ни в действительности (перегорают обе вставки) $s_{100} : s_{2 \times 50} = 1,0 < 1,25$		Обеспечивается по расчету и в действительности (перегорала вставка 150 а) $s_{200} : s_{150} = 1,33 > 1,25$	
	Обеспечивается по расчету и в действительности (перегорала вставка 75 а) $s_{2 \times 50} : s_{75} = 1,3 > 1,25$			Обеспечивается по расчету и в действительности (перегорала вставка 100 а) $s_{150} : s_{100} = 1,5 > 1,25$		

коротком замыкании на первом от подстанции участке кабеля ($\frac{I_0}{I_{\max}} = 1,5 > 1,15$).

Схема сети, показанная на рис. 1, легко осуществима и в ряде случаев приемлема, но она далеко не наиболее экономична.

Более экономичной является схема, показанная на рис. 5. В случае выхода из строя одной из линий 6 (10) кВ ее нагрузка при этой схеме переходит не на одну линию, как при схеме рис. 1, а на две. Следовательно, в нормальном режиме каждая линия загружена не на 50% ее пропускной способности, как при схеме рис. 1, а на 67%.

То же можно сказать и относительно сети низкого напряжения. В случае выхода из строя сетевого трансформатора нагрузка магистральной линии низкого напряжения при схеме рис. 4 повышается вдвое, а при схеме рис. 5 только в 1,5 раза.

Применение сдвоенных кабелей наряду с уменьшением затрат цветного металла приводит к увеличению загрузки кабеля и, следовательно, к значительному повышению потери мощности и электрической энергии как в распределительной сети 6 (10) кВ, так и в сети низкого напряжения. Однако, как показывают расчеты [Л. 5, 8], плотности тока в распределительных

сетях 6 (10) кВ и низкого напряжения значительно ниже экономических, рекомендуемых Техническим управлением Министерства электростанций. На практике они составляют примерно 1,5 ... 2,0 а/мм² при выборе сечения кабелей 6 (10) кВ по термическому действию тока короткого замыкания и около 2 а/мм² — при выборе сечения кабелей сети низкого напряжения по нагреву током нагрузки аварийного режима. Экономическая плотность тока, рекомендуемая Техническим управлением МЭС для кабелей с определенной вдоль линии нагрузкой при годовом числе часов использования максимума $T < 3000$ час, что обычно имеет место в городской распределительной сети, равна $2,5 \cdot 1,5 = 3,75$ а/мм² [Л. 9].

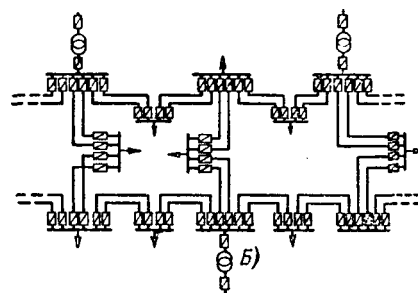
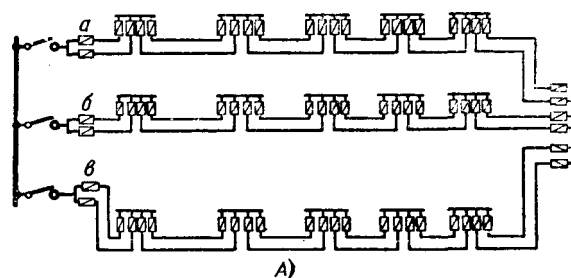


Рис. 5.

А — сеть 6 (10) кВ; Б — сеть низкого напряжения.

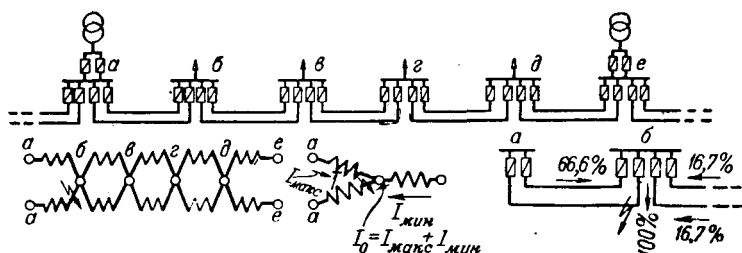


Рис. 4.

Таким образом, в результате применения в распределительной сети сдвоенных кабелей будут достигнуты снижение затрат металла на 30% и повышение плотности тока примерно в $\frac{100}{70} = 1,43$ раза, т. е. загрузка кабелей окажется более близкой к экономически наивыгоднейшей. Так как по мере удаления от начала распределительных линий нагрузки уменьшаются, экономически целесообразно применять для них кабели ступенчатого сечения. На практике число ступеней на одну линию не должно превышать двух.

Применение сдвоенных кабелей и схем, предлагаемых в настоящей статье, вносит некоторое усложнение в конструкции сетевых подстанций и вводных щитков. Поэтому в дальнейшем необходимо работать в направлении упрощения конструктивных решений. Некоторые из таких упрощений можно наметить уже сейчас. Например, предохранители могут устанавливаться только на двух фазах, в существующих же подстанциях их следует размещать в специальных шкафах [Л. 10].

Литература

1. М. Д. Каменский. Электрические сети. ОНТИ, 1934.
2. С. Г. Егоров. Электричество, № 7, 1939.
3. Б. Л. Айзенберг, М. Н. Карасик и Н. И. Медведский. Электричество, № 7, 1939.
4. М. Д. Каменский. Экономические показатели городских замкнутых электрических сетей. Труды Второй научно-технической сессии по городским электрическим сетям. Госэнергоиздат, 1953.
5. Б. Л. Айзенберг. Электричество, № 12, 1952.
6. А. М. Мелькумов. Высоковольтные предохранители типа ПК с кварцевым песком. Изд. ЦБТИ МЭП, 1946 и 1950.
7. Б. Л. Айзенберг. Электричество, № 8, 1950.
8. Б. Л. Айзенберг. Электричество, № 2, 1951.
9. И. А. Сыромятников. Электричество, № 2, 1955.
10. В. К. Косарев. Из опыта автоматизации кабельных сетей Ленинграда. Доклады к Третьей научно-технической сессии по городским электрическим сетям. Вып. 1, НТОЭП, 1955.
11. Б. Л. Айзенберг. Плавкие предохранители в установках напряжением до 1000 в. Госэнергоиздат, 1955.

[4. 6. 1956]



Устойчивость электромашинного усилителя с отрицательной гибкой обратной связью

Инж. Ю. Р. РЕЙНГОЛЬД

ЦКБ „Электропривод“ МЭП

В промышленных автоматизированных электроприводах с электромашинным управлением в качестве стабилизирующих устройств широко используются стабилизирующие трансформаторы типов ТС-144-110 и ТС-72-60. При этом в большинстве промышленных электроприводов стабилизирующий трансформатор подключается к выходу электромашинного усилителя для получения отрицательной гибкой обратной связи по его напряжению, которая обычно способствует повышению устойчивости системы регулирования в целом и служит также для получения требуемого характера переходного процесса. Однако опыт показывает, что при некоторых параметрах гибкой обратной связи внутренний замкнутый контур системы регулирования, состоящий из электромашинного усилителя и стабилизирующего трансформатора, становится неустойчивым. Условие устойчивости этого контура накладывает на выбор параметров гибкой обратной связи определенные ограничения.

В настоящей статье методом частотных характеристик проведено теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости усилителя ЭМУ-50 со стабилизирующим трансформатором ТС-144-110. При составлении передаточных функций усилителя и стабилизирующего трансформатора учитываются рассеяния в трансформаторе, внутренние обратные связи, взаимоиндукция обмоток управления и нелинейность статических характеристик усилителя. Все расчеты подтверждены экспериментальными данными.

Частотные характеристики и передаточная функция стабилизирующего трансформатора. Холостой ход. Постоянные времени обмоток. Динамические свойства стабилизирующего трансформатора при холостом ходе характеризуются постоянными времени его обмоток. Зависимость постоянных времени T_{10} и T_{20} первичной и вторичной обмоток трансформатора

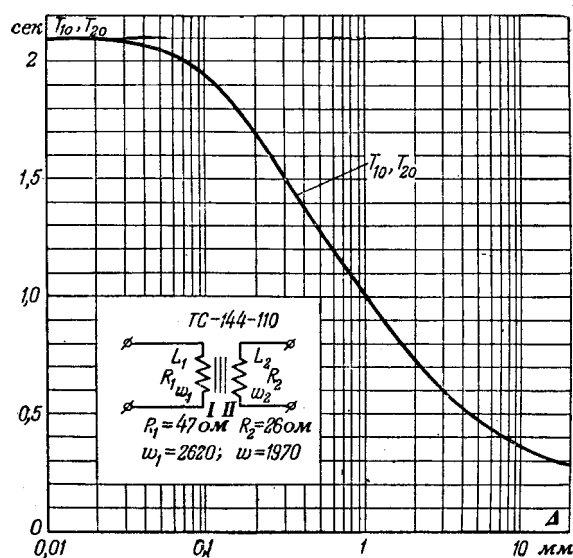


Рис. 1. Зависимость постоянных времени обмоток стабилизирующего трансформатора ТС-144-110 от частоты.

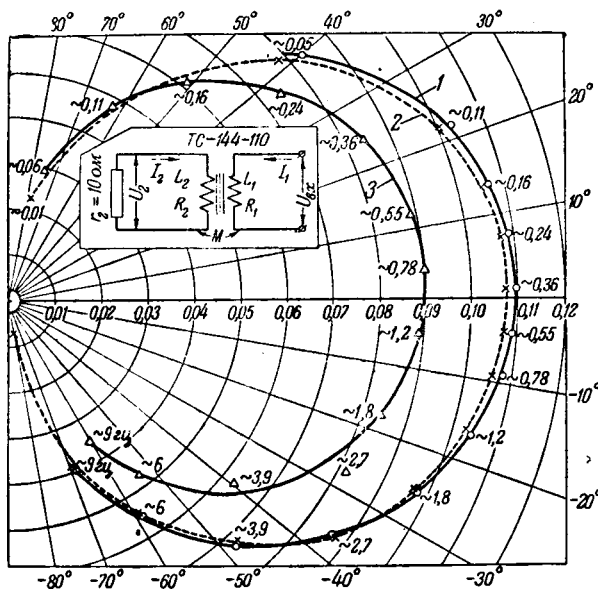


Рис. 2. Частотные характеристики стабилизирующего трансформатора ТС-144-110 при активной нагрузке.

1 — экспериментальная характеристика; 2 — расчетная характеристика (зазор $\Delta=0$); 3 — экспериментальная характеристика (зазор $\Delta=6$ мм).

ТС-144-110 от воздушного зазора представлена на рис. 1. Постоянные времени определялись по осциллограммам переходных процессов токов в соответствующих обмотках при работе на линейном участке кривой намагничивания.

Стабилизирующий трансформатор нагружен на активную нагрузку (рис. 2). Передаточная функция ненасыщенного трансформатора без рассеяния и потерь в стали при нагрузке на активное сопротивление r_2 имеет следующий вид:

$$K_T(p) = \frac{U_2}{U_{ex}} = \frac{r_2 \sqrt{L_1 L_2}}{R_1(r_2 + R_2)} \frac{p}{(T_2 + T_{10})p + 1}, \quad (1)$$

$$\text{где } T_{10} = \frac{L_1}{R_1}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2 + r_2}.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика, соответствующая передаточной функции (1), как известно, представляет собой полуокружность, расположенную в правом верхнем квадранте комплексной плоскости. На рис. 2 приведена экспериментальная частотная характеристика стабилизирующего трансформатора ТС-144-110 без зазора, нагруженного на сопротивление $r_2 = 10$ Ом.

Вид этой частотной характеристики, расположенной в правой полуплоскости, указывает на то, что передаточная функция реального нагруженного трансформатора должна учитывать рассеяние. Если положить взаимоиндуктивность между обмотками трансформатора равной $M = \delta \sqrt{L_1 L_2}$, то передаточная функция будет:

$$K_T(p) = \frac{U_2}{U_{ex}} = \frac{r_2 \delta \sqrt{L_1 L_2}}{R_1(r_2 + R_2)} \frac{p}{T_{10}T_2(1 - \delta^2)p^2 + (T_{10} + T_2)p + 1}. \quad (2)$$

Коэффициент связи легко определяется непосредственно по экспериментальной частотной характеристике (рис. 2). Действительно:

$$\frac{1}{T_{10}T_2(1 - \delta^2)} = \omega_0^2,$$

где ω_0 — частота, при которой сдвиг фаз между напряжениями на входе и выходе трансформатора равен нулю.

Отсюда коэффициент связи δ будет:

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{1}{T_{10}T_2\omega_0^2}}. \quad (3)$$

Расчетная частотная характеристика реального стабилизирующего трансформатора, вычисленная по формуле (2) после подстановки $p = j\omega$, приведена на рис. 2 пунктиром. На рис. 2 приведена также экспериментальная частотная характеристика трансформатора ТС-144-110 для воздушного зазора $\Delta = 6$ мм. В области высоких частот частотные характеристики при $\Delta = 0$ и $\Delta = 6$ мм весьма близки друг к другу.

Зависимость коэффициента связи трансформатора ТС-144-110 от воздушного зазора, полученная по экспериментальным частотным характеристикам, приведена на рис. 3.

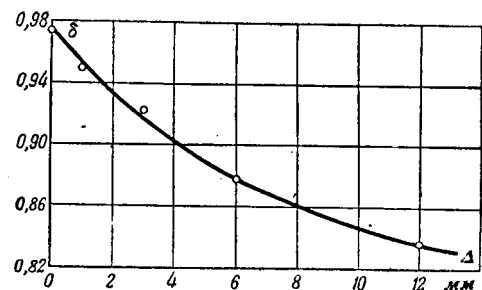


Рис. 3. Зависимость коэффициента связи δ стабилизирующего трансформатора ТС-144-110 от воздушного зазора Δ .

Стабилизирующий трансформатор нагружен на обмотку управления электромашинного усилителя. Дифференциальные уравнения реального стабилизирующего трансформатора, нагруженного на обмотку управления $ou-II$, имеющую индуктивность L_{y2} и сопротивление r_2 будут:

$$\left. \begin{aligned} [(L_{y2} + L_2)p + (r_2 + R_2)]I_2 + MpI_1 &= 0; \\ MpI_2 + (L_1p + R_1)I_1 &= U_{ex}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Отсюда передаточная функция стабилизирующего трансформатора будет:

$$K_T(p) = \frac{U_2}{U_{ex}} = \frac{r_2 \delta \sqrt{L_1 L_2}}{R_1(r_2 + R_2)} \frac{p(\tau_{20}p + 1)}{[T_{10}T_2(1 - \delta^2) + T_{10}\tau_{22}]p^2 + (T_2 + T_{10} + \tau_{22})p + 1}, \quad (5)$$

где U_2 — напряжение на обмотке управления усилителя;

$$\tau_2 = \frac{L_{y2}}{R_2 + r_2}; \quad \tau_{20} = \frac{L_{y2}}{r_2}.$$

Из полученного выражения следует, что частотная характеристика реального стабилизирующего трансформатора при нагрузке на обмотку управления усилителя расположена в правом верхнем квадранте комплексной плоскости.

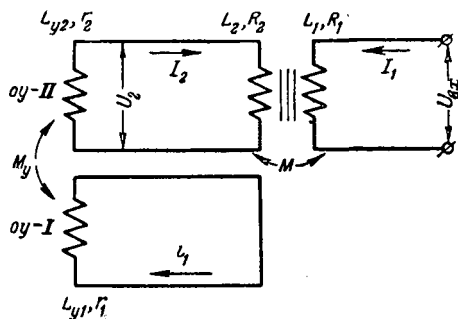


Рис. 4.

Влияние взаимной индукции между обмотками управления электромашинного усилителя. Рассмотрим схему, представленную на рис. 4. Выходное напряжение U_2 может быть выражено следующим образом:

$$(L_{y2}p + r_2)I_2 + M_{y1}pI_1 = U_2.$$

Если принять, что коэффициент связи между обмотками управления усилителя равен единице, т. е. $M_{y1} = \sqrt{L_{y1}L_{y2}}$, то передаточная функция системы (рис. 4) запишется в следующем виде:

$$K_T(p) = \frac{U_2}{U_{ex}} = \frac{r_2 \sqrt{L_1 L_2}}{R_1(r_2 + R_2)} \cdot \frac{p[(\tau_{20} + \tau_{10})p + 1]}{T_2 T_{10} \tau_{10} (1 - \delta^2) p^3 + [\tau_{10}(T_{10} + T_2) + \tau_2 T_{10} + T_{10} T_2 (1 - \delta^2)] p^2 + (\tau_{10} + T_{10} + \tau_2 + T_2) p + 1}, \quad (6)$$

где $\tau_{10} = \frac{L_{y1}}{r_1}$.

Если имеется несколько обмоток управления усилителя, замкнутых на активные сопротивления, то в полученном выражении следует вместо постоянной времени τ_{10} взять сумму постоянных времени всех магнитно связанных контуров. При учете взаимной индукции с замкнутым контуром компенсационной обмотки следует принимать в целях упрощения коэффициент связи этого контура с обмотками управления усилителя равным единице [Л. 1].

На рис. 5 представлены экспериментальная и расчетная частотные характеристики стабилизирующего трансформатора ТС-144-110 при $\Delta = 6$ мм, нагруженного на обмотку управления усилителя при наличии замкнутого контура компенсационной обмотки ($\tau_k = 0,005$ сек) и замкнутой накоротко обмотки управления $ou-I$.

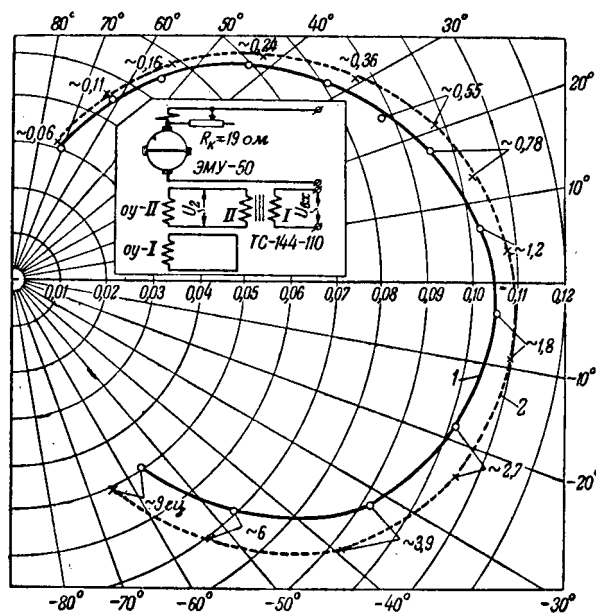


Рис. 5. Частотные характеристики стабилизирующего трансформатора ТС-144-110 при нагрузке на обмотку управления усилителя.

1 — экспериментальная характеристика (зазор $\Delta = 6$ мм);
2 — расчетная характеристика (зазор $\Delta = 6$ мм).

При расчете согласно полученным ранее результатам приняты следующие значения параметров трансформатора: $T_{10} = 0,43$ сек; $T_{20} = 0,43$ сек; $\delta = 0,875$. Параметры усилителя ЭМУ-50 приведены в приложении.

Передаточная функция и частотные характеристики разомкнутой системы электромашинный усилитель — стабилизирующий трансформатор (рис. 6). Входом разомкнутой системы служит напряжение, приложенное к первичной обмотке стабилизирующего трансформатора, а выходом — э. д. с. продольной цепи усилителя. Точное выра-

жение для передаточной функции такой системы чрезвычайно сложно. Передаточная функция системы значительно упрощается, если рассматривать стабилизирующий трансформатор и усилитель в виде двух последовательно включенных

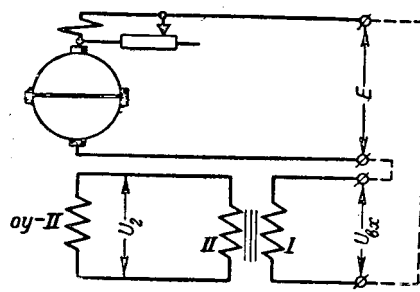


Рис. 6.

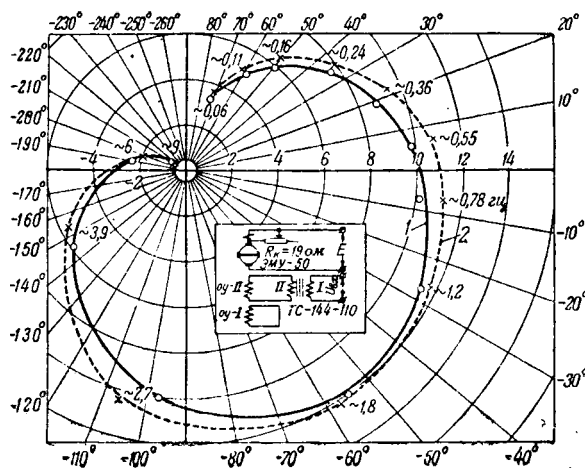


Рис. 7. Частотные характеристики разомкнутой системы усилитель ЭМУ-50 — стабилизирующий трансформатор ТС-144-110.

1 — экспериментальная характеристика; 2 — расчетная характеристика.

детектирующих звеньев. Эксперимент показывает, что такое допущение для практических расчетов вполне допустимо. Первым звеном служит стабилизирующий трансформатор, нагруженный на обмотку управления усилителя, причем напряжение U_2 на этой обмотке является его выходом. Вторым звеном — усилитель, причем напряжение U_2 является его входом. В таком случае передаточная функция $Z(p)$ разомкнутой системы представляет собой произведение передаточных функций усилителя и стабилизирующего трансформатора

$$Z(p) = K_0(p) K_r(p), \quad (7)$$

где $K_0(p)$ — передаточная функция усилителя в режиме холостого хода.

Передаточная функция усилителя и методика определения его параметров даны в [Л. 1]. Основные расчетные формулы приведены в приложении. Следует отметить, что при вычислении передаточной функции усилителя взаимную индукцию между обмотками управления и замкнутым контуром компенсационной обмотки учитывать не следует, так как влияние взаимной индукции уже учтено согласно предыдущему в передаточной функции стабилизирующего трансформатора.

На рис. 7 приведена экспериментальная частотная характеристика разомкнутой системы для случая замкнутой накоротко обмотки управления усилителя $ou-I$. Параметры гибкой обратной связи такие же, как на рис. 5. Характеристика была получена для линейного участка кривой намагничивания усилителя.

Передаточная функция разомкнутой системы, представленной на рис. 7, имеет следующий вид:

$$Z(p) = \frac{E}{U_{ex}} = \frac{K_0}{\frac{1}{v_0^2} p^2 + \frac{\beta_0}{v_0^2} p + 1} \cdot \frac{r_2 \delta \sqrt{L_1 L_2}}{R_1 (r_2 + R_2)} \times$$

$$\times \frac{p[(\tau_{20} + \tau_{10} + \tau_k) p + 1]}{(\tau_k + \tau_{10}) T_{10} T_2 (1 - \delta^2) p^3 + [(\tau_k + \tau_{10}) (T_{10} + T_2) + \tau_2 T_{10} + T_{10} T_2 (1 - \delta^2)] p^2 + (\tau_k + \tau_{10} + T_{10} + T_2 + \tau_2) p + 1}. \quad (8)$$

Вычислив коэффициенты передаточной функции (8), получим:

$$Z(p) = \frac{105}{0,0028p^2 + 0,07p + 1} \times$$

$$\times \frac{0,074p(0,125p + 1)}{0,00224p^3 + 0,09p^2 + 0,86p + 1}.$$

По этой формуле после подстановки $p = j\omega$ построена расчетная частотная характеристика, изображенная на рис. 7 пунктиром.

Устойчивость электромашинного усилителя с гибкой обратной связью. Методика исследования устойчивости. Частотная характеристика (рис. 7) охватывает точку с координатами $(j0, -1)$. Следовательно, согласно известной теореме теории регулирования замкнутая система должна быть неустойчивой. Действительно, как показывает эксперимент, в замкнутой системе усилитель — стабилизирующий трансформатор при известных условиях возникают колебания установившейся амплитуды и частоты (автоколебания). Существование автоколебаний указывает на то, что при расчете устойчивости следует учитывать нелинейность усилителя. Строго говоря, усилитель является таким нелинейным звеном, комплексный коэффициент усиления которого зависит как от частоты, так и от амплитуды входного сигнала. Исследование устойчивости системы с нелинейным элементом данного типа представляет большие трудности. Задачу можно значительно упростить, если усилитель представить в виде последовательно включенных двух элементов: линейного элемента с комплексным коэффициентом усиления, зависящим только от частоты и равным единице при $\omega = 0$, и нелинейного элемента, эквивалентный комплексный коэффициент которого зависит только от амплитуды и характеризуется статической зависимостью напряжения на продольных щетках усилителя от напряжения на его входе. Как показано ниже, такое допущение вполне приемлемо для практики и позволяет воспользоваться для расчета автоколебаний методом гармонического баланса [Л. 2].

В этом случае уравнение свободных колебаний системы, как известно, записывается в виде:

$$z(p) \cdot K_{н.э}(U_2) = -1,$$

где $K_{н.э}(U_2)$ — эквивалентный комплексный коэффициент усиления нелинейного элемента, представляющий собой зависимость амплитуды и фазы напряжения на продольных щетках усилителя от амплитуды напряжения на его входе;

$z(p)$ — передаточная функция линейной части системы.

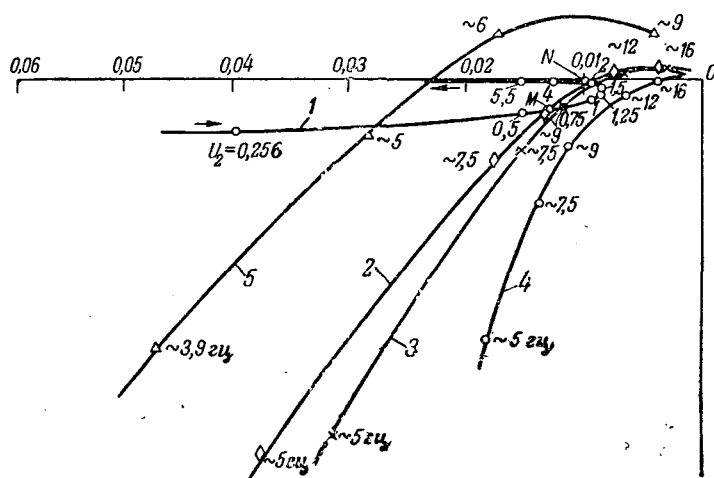


Рис. 8. Расчет автоколебаний в системе усилитель ЭМУ-50 — стабилизирующий трансформатор ТС-144-110 при холостом ходе усилителя.

Для определения амплитуды и частоты автоколебаний необходимо графически решить уравнение

$$z(j\omega) = -\frac{1}{K_{н.в}(U_2)}.$$

Эквивалентный комплексный коэффициент усиления усилителя как нелинейного элемента удобнее всего получить экспериментально, так как аналитически учесть петлю гистерезиса его статической характеристики весьма трудно. Для каждого типа усилителя экспериментальное определение эквивалентного комплексного коэффициента усиления достаточно провести только 1 раз. Эквивалентный комплексный коэффициент усиления усилителя ЭМУ-50 определялся следующим образом. На вход обмотки управления *ou-II* подавалось различной амплитуды синусоидальное напряжение частоты 0,06 гц. При этом в обмотку управления для уменьшения ее постоянной времени включалось сопротивление $r_0 = 20 r_2$. При этих условиях сдвиг по фазе напряжения на выходе усилителя определялся только шириной петли гистерезиса его статической характеристики.

Напряжения на входе и выходе усилителя записывались осциллографом, и для каждой амплитуды входного напряжения вычислялись коэффициент усиления и сдвиг по фазе для первой гармоники выходного напряжения. Для режима холостого хода и нагрузки на сопротивление, равное 13 ом, зависимость эквивалентного комплексного коэффициента усиления ЭМУ-50 от амплитуды напряжения U_2 , приложенного к обмотке управления *ou-II*, представлена на рис. 8 и 9.

Расчет автоколебаний усилителя ЭМУ-50 со стабилизирующим трансформатором ТС-144-110. Определим частоту и амплитуду автоколебаний при следующих условиях: холостой ход усилителя; вторичная обмотка стабилизирующего трансформатора включена на обмотку управления *ou-II*; дополнительные сопротивления в цепи гибкой обратной связи равны нулю; зазор трансфор-

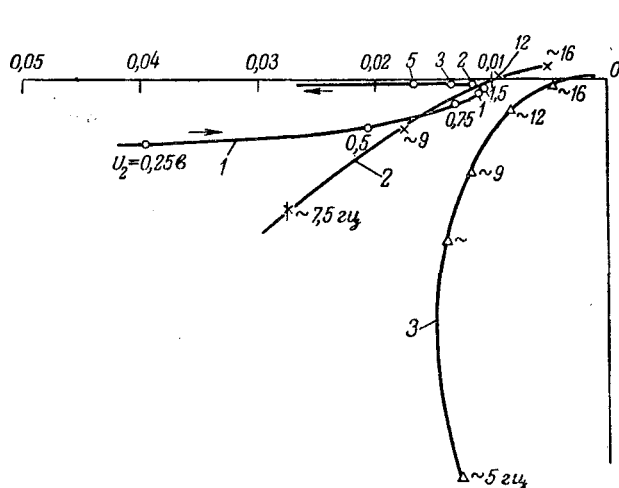


Рис. 9. Расчет автоколебаний в системе усилитель ЭМУ-50 — стабилизирующий трансформатор при нагрузке усилителя на обмотку возбуждения генератора и активное сопротивление.

матора $\Delta = 0$; взаимдукция между обмотками управления усилителя отсутствует (обмотки управления *ou-I*, *ou-III* и *ou-IV* разомкнуты).

Передаточная функция линейной части системы $z(p)$, вычисленная для этих условий по приведенным выше формулам, запишется в следующем виде:

$$z(p) = k_0(p) K_T(p),$$

где $k_0(p) = \frac{1}{0,0028p^2 + 0,07p + 1}$ — передаточная функция линейной части усилителя при холостом ходе;

$$K_T(p) = \frac{0,404p(0,065p + 1)}{0,8 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,21p^2 + 3,6p + 1}.$$

Соответствующая частотная характеристика приведена на рис. 8 (кривая 2). Кривая 2 пересекает характеристику нелинейного элемента (кривая 1) в двух точках М и N. Можно показать [Л. 2], что устойчивым автоколебаниям будет соответствовать точка N. Устойчивые автоколебания, как это следует из рис. 9, будут возникать при амплитуде входного сигнала $U_2 > 0,6$ в и иметь амплитуду около 250 в и частоту примерно 11,5 гц*.

Влияние на устойчивость системы параметров гибкой обратной связи, взаимдукции обмоток управления и нагрузки электромашинного усилителя. Влияние воздушного зазора в стабилизирующем трансформаторе. Выше было показано, что частотные характеристики стабилизирующего трансформатора при разных воздушных зазорах в области высоких частот мало отличаются друг от друга. Поэтому влияние воздушного зазора трансформатора на устойчивость системы невелико. Действительно, на рис. 8 (кривая 3) представлена частотная характеристика линейной части системы для

* Для определения амплитуды автоколебаний необходимо разделить амплитуду входного сигнала U_2 в точке N на коэффициент усиления в этой точке.

воздушного зазора $\Delta = 6$ мм. При таком зазоре постоянные времени обмоток стабилизирующего трансформатора уменьшаются примерно в 4 раза. Однако характеристика 3 весьма близка к характеристике 2. Передаточная функция линейной части системы для $\Delta = 6$ мм имеет следующий вид:

$$z(p) = k_0(p) \frac{0,074p(0,065p+1)}{0,17 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,043p^2 + 0,8p + 1}.$$

Расчетные частота и амплитуда автоколебаний равны соответственно 11 гц и 220 в.

Влияние дополнительных сопротивлений в цепи гибкой обратной связи. На рис. 8 (кривая 4) представлена частотная характеристика линейной части системы при следующих параметрах гибкой обратной связи: воздушный зазор $\Delta = 0$; дополнительное сопротивление в первичной цепи стабилизирующего трансформатора равно 47 ом и во вторичной цепи — 26 ом. Постоянные времени обмоток трансформатора уменьшаются при этом только в 2 раза, но кривая 4 уже не пересекается с характеристикой нелинейного элемента и, следовательно, система устойчива. Передаточная функция для указанных параметров гибкой обратной связи имеет следующий вид:

$$z(p) = k_0(p) \frac{0,105p(0,065p+1)}{0,235 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,0655p^2 + 1,95p + 1}.$$

Влияние взаимной индукции обмоток управления электромашинного усилителя. Кривая 5 рис. 8 представляет собой частотную характеристику линейной части системы, вычисленную для следующих условий: обмотки управления усилителя *ou-I* и *ou-III* замкнуты накоротко; воздушный зазор трансформатора $\Delta = 6$ мм; дополнительных сопротивлений в цепи гибкой обратной связи нет. Передаточная функция системы для этого случая

$$z(p) = k_0(p) \frac{0,074p(0,185p+1)}{0,0043p^3 + 0,14p^2 + 0,92p + 1}.$$

Из рис. 8 видно, что автоколебания в системе возникают при очень малых амплитудах входного сигнала, т. е. устойчивость системы при наличии взаимной индукции между обмотками управления усилителя существенно ухудшается. Устойчивые

автоколебания имеют частоту, равную 5,5 гц и амплитуду порядка 400 в.

Влияние нагрузки электромашинного усилителя. Рассмотрим два случая нагрузки усилителя: а) на обмотку возбуждения генератора постоянного тока; б) на активное сопротивление. Передаточная функция усилителя для первого случая, если считать выходной величиной напряжение на его якоре, может быть представлена в следующем виде (приложение):

$$K_{\kappa}(p) = K \frac{T_{\kappa}'p + 1}{\frac{T_{\kappa}}{\sqrt{2}}p^3 + \frac{1 + \beta_0 T_{\kappa}}{\sqrt{2}}p^2 + \frac{\beta + \sqrt{2} T_{\kappa}}{\sqrt{2}}p + 1}.$$

Зависимость эквивалентного комплексного коэффициента усиления усилителя при нагрузке от амплитуды напряжения U_2 (кривая 1) и частотная характеристика линейной части системы (кривая 2) приведены на рис. 9. Кривые построены для следующих параметров нагрузки и гибкой обратной связи: сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения генератора $R_{\kappa} = 13$ ом, $L_{\kappa} = 3$ гн; воздушный зазор трансформатора $\Delta = 6$ мм; дополнительные сопротивления в цепи гибкой обратной связи отсутствуют; обмотки управления *ou-I*, *ou-III* и *ou-IV* разомкнуты; компенсационное сопротивление усилителя $R_{\kappa} = 19$ ом ($\tau_{\kappa} = 0,005$ сек). Передаточная функция линейной части системы при указанных параметрах

$$z(p) = \frac{0,23p + 1}{0,425 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,0134p^2 + 0,27p + 1} \times \\ \times \frac{0,074p(0,065p+1)}{0,17 \cdot 10^{-3}p^3 + 0,043p^2 + 0,8p + 1}.$$

Из рис. 9 видно, что кривые 1 и 2 пересекаются и, следовательно, система неустойчива. Частота автоколебаний равна примерно 11,5 гц, а амплитуда около 190 в.

Если усилитель нагружен на активное сопротивление, то его передаточная функция (см. приложение):

$$K(p) = K \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{2}}p^2 + \frac{\beta}{\sqrt{2}}p + 1}.$$

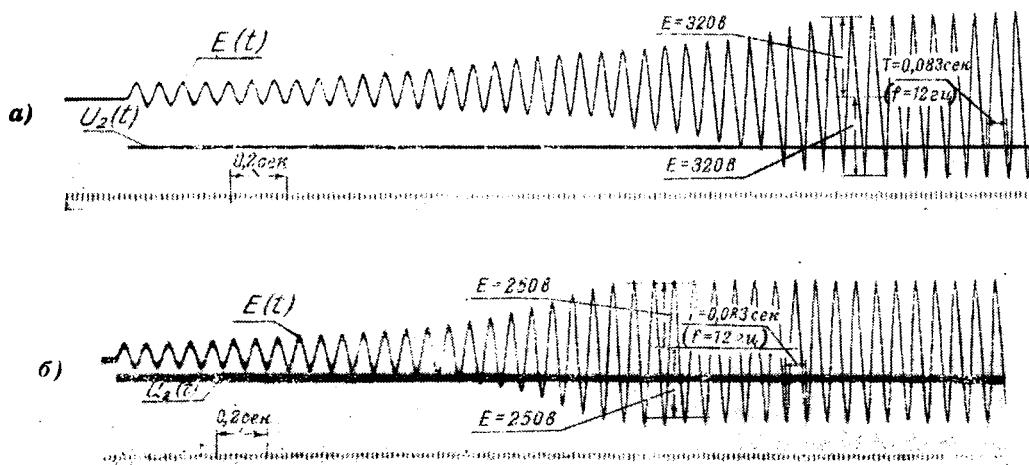


Рис. 10. Осциллограммы автоколебаний усилителя ЭМУ-50 с трансформатором ТС-144-110 при холостом ходе (обмотки управления усилителя *ou-I*, *ou-III* и *ou-IV* разомкнуты). а — при зазоре $\Delta = 0$; б — при зазоре $\Delta = 6$ мм; E — э. д. с. усилителя; U_2 — постоянное напряжение, приложенное к обмотке управления *ou-II*.

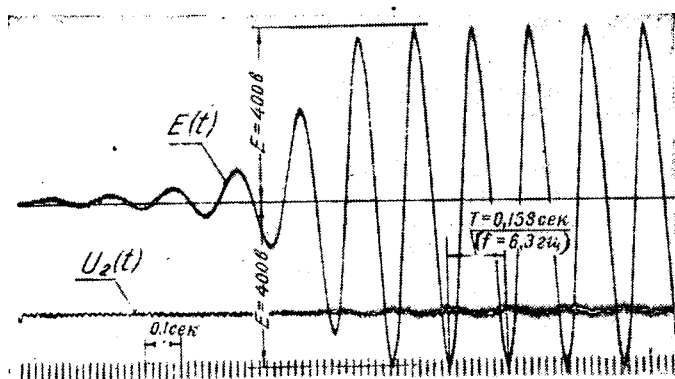


Рис. 11. Осциллограмма автоколебаний усилителя ЭМУ-50 с трансформатором ТС-144-110 при холостом ходе усилителя (обмотки управления усилителя оу-I и оу-III закорочены; воздушный зазор трансформатора $\Delta = 6$ мм).

E — э. д. с. усилителя; U_2 — постоянное напряжение, приложенное к обмотке управления оу-II.

Передаточная функция линейной части усилителя для $R_n = 13$ ом, будет:

$$K(p) = \frac{1}{0,0021p^2 + 0,097p + 1}.$$

Из рис. 9 следует, что частотная характеристика линейной части системы (кривая 3) при прежних параметрах гибкой обратной связи в этом случае не пересекает характеристики нелинейного элемента, а следовательно, автоколебания невозможны.

На рис. 10, 11 и 12 показаны осциллограммы автоколебаний для некоторых рассмотренных выше случаев. На рис. 10 приведены осциллограммы автоколебаний ненагруженного усилителя с гибкой обратной связью при двух воздушных зазорах стабилизирующего трансформатора: $\Delta = 0$ и $\Delta = 6$ мм. На рис. 11 представлена осциллограмма, показывающая влияние на устойчивость усилителя с гибкой обратной связью взаимной индукции между его обмотками управления.

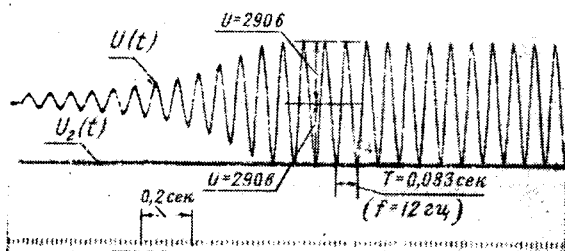


Рис. 12. Осциллограмма автоколебаний усилителя ЭМУ-50 с трансформатором ТС-144-110 при нагрузке усилителя на обмотку возбуждения генератора с параметрами $R_n = 13$ ом, $L_n = 3$ гн (обмотки управления усилителя оу-I, оу-III и оу-IV разомкнуты; воздушный зазор трансформатора $\Delta = 6$ мм).

U — напряжение усилителя; U_2 — постоянное напряжение, приложенное к обмотке управления оу-II.

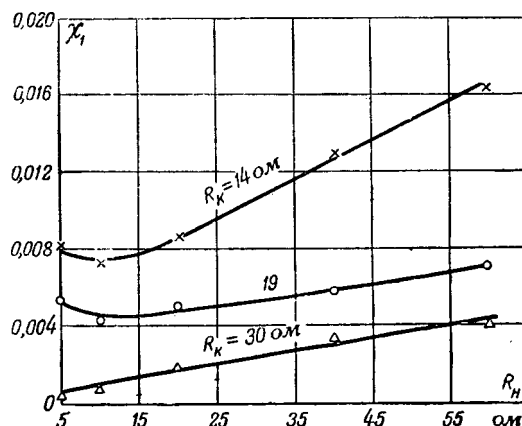


Рис. 13. Зависимость коэффициента χ_1 усилителя ЭМУ-50 от сопротивления нагрузки R_n и компенсационного сопротивления R_k .

Осциллограмма получена при замкнутых накоротко обмотках управления оу-I и оу-III. На рис. 12 показана осциллограмма автоколебаний для случая нагрузки усилителя на обмотку возбуждения генератора. Из рассмотрения приведенных осциллограмм следует, что полученные выше расчетные результаты с той точностью, которую можно ожидать при решении нелинейной задачи, совпадают с экспериментальными.

Выводы. 1. Стабилизирующий трансформатор ТС-144-110, используемый в промышленных электроприводах, обладает значительным рассеянием, которое необходимо учитывать при записи его передаточной функции.

2. Замкнутая система усилитель — стабилизирующий трансформатор при определенных параметрах гибкой обратной связи неустойчива: в системе могут возникать установившиеся колебания с частотой от 5 до 12 гц и амплитудой, достигающей 400 в (для усилителя ЭМУ-50 и стабилизирующего трансформатора ТС-144-110).

3. Для расчета амплитуды и частоты автоколебаний можно пользоваться методом гармонического баланса, т. е. учитывать только статическую нелинейность характеристики усилителя.

4. Взаимоиндукция обмоток управления электромашинного усилителя существенным образом влияет на устойчивость системы. Учет взаимной индукции между обмотками управления усилителя при расчете устойчивости обязателен.

5. Влияние воздушного зазора стабилизирующего трансформатора на устойчивость системы невелико, так как его частотные характеристики в области высоких частот (от 2 гц и выше) при различных воздушных зазорах близки друг к другу.

6. Индуктивная нагрузка усилителя (нагрузка на обмотку возбуждения генератора) существенного влияния на устойчивость системы не оказывает. Активная нагрузка усилителя благодаря демпфирующему действию внутренних обратных связей способствует улучшению устойчивости системы.

Приложение

Технические данные усилителя ЭМУ-50

Параметры	
Номинальная мощность	4,5 кВт
Номинальное напряжение	230 в
Номинальный ток	19,6 а
Номинальная скорость вращения	2 850 об/мин
Количество обмоток управления	4
Число витков и сопротивление обмоток управления:	
оу-I и оу-III	$\omega_1=\omega_2=3\ 200$ $r_1=r_2=2\ 000\ \text{ом}$
оу-II	$\omega_2=220$ $r_2=9\ \text{ом}$
оу-IV	$\omega_4=1\ 200$ $r_4=850\ \text{ом}$ $r_a=1,1\ \text{ом}$
Сопротивление обмотки якоря вместе со щетками	$r_k=0,34\ \text{ом}$
Сопротивление компенсационной обмотки	$r_{д.н}=0,14\ \text{ом}$
Сопротивление обмотки дополнительных полюсов	$r_k=0,005\ \text{сек}$
Постоянная времени контура компенсационной обмотки (для $R_k=19\ \text{ом}$)	
Постоянные времени обмоток управления оу-I, оу-II и оу-III	$\tau_{10}=\tau_{20}=\tau_{30}=0,06\ \text{сек}$
оу-IV	$\tau_{40}=0,027\ \text{сек}$
Коэффициент усиления по напряжению первого звена. Для обмоток управления:	
оу-I и оу-III	$m_1=m_3=0,55$
оу-II	$m_2=7,4$
оу-IV	$m_4=0,45$
Постоянная времени короткозамкнутой цепи (второго звена)	$T_q=0,16\ \text{сек}$
Коэффициент усиления по напряжению второго звена	$m_q=50$
Коэффициент внутренней жесткой обратной связи при холостом ходе	$\chi=0,049$
Коэффициент внутренней гибкой обратной связи при нагрузке	$\chi_2=0,016$
Зависимость коэффициента внутренней жесткой обратной связи χ_1 от сопротивления нагрузки и компенсационного сопротивления R_k	Представлена на рис. 13

где

$$K_0 = \frac{m_i m_q}{1 + \chi m_q}; \quad \beta_0 = \frac{1 + \chi m_q}{\tau_i T_q};$$

$$\beta_0 = \frac{\tau_i + T_q}{\tau_i T_q};$$

τ_i, m_i — постоянная времени и коэффициент усиления первого звена усилителя для i -той обмотки управления.

Передаточная функция усилителя при активной нагрузке

$$K(p) = \frac{K}{\frac{1}{\sqrt{2}} p^2 + \frac{\beta}{\sqrt{2}} p + 1},$$

где

$$K = \frac{m_i m_q m_n}{1 + \chi m_q + \chi_1 a m_q^2};$$

$$\sqrt{2} = \frac{1 + \chi m_q + \chi_1 a m_q^2}{\tau_i T_q};$$

$$\beta = \frac{\tau_i + T_q}{\tau_i T_q} + \frac{\chi_2 a m_q^2}{T_q};$$

$$m_n = \frac{R_n}{r_a + r_k + r_{д.н} + R_n};$$

$$\alpha = \frac{r_a}{r_a + r_k + r_{д.н} + R_n},$$

где R_n — сопротивление нагрузки.

Передаточная функция усилителя при нагрузке на обмотку возбуждения генератора (если считать выходной величиной напряжение на продольных щетках усилителя)

$$K_n(p) = K \frac{T'_n p + 1}{\frac{T_n}{\sqrt{2}} p^3 + \frac{1 + \beta_0 T_n}{\sqrt{2}} p^2 + \frac{\beta + \beta_0 T_n}{\sqrt{2}} p + 1},$$

где $T'_n = \frac{L_n}{R_n}$ — постоянная времени обмотки возбуждения генератора;
 L_n — индуктивность обмотки возбуждения генератора;
 R_n — сопротивление обмотки возбуждения генератора;

$T_n = \frac{L_n}{R_n + r_a + r_{д.н} + r_k}$ — постоянная времени цепи нагрузки усилителя.

Литература

1. Е. Л. Эттингер и Ю. Р. Рейнгольд. Электричество, № 3, 1956.
2. Л. С. Гольдфарб. Автоматика и телемеханика. т. VIII, № 5, 1947.

[9. 3. 1956]



Основные расчетные формулы. Передаточная функция усилителя при холостом ходе

$$K_0(p) = \frac{K_0}{\frac{1}{\sqrt{2}} p^2 + \frac{\beta_0}{\sqrt{2}} p + 1},$$

Схемы дифференциальных защит с магнитным торможением

Кандидат техн. наук, доц. А. Д. ДРОЗДОВ

Новочеркасский политехнический институт им. Орджоникидзе

Простой и известный еще с 1930 г. принцип магнитного торможения начинает применяться в дифференциальных защитах. В настоящее время разработаны: теория этого принципа, способы уничтожения зависимости работы реле от угла сдвига фаз и рациональные конструкции реле с одной и несколькими тормозными обмотками [Л. 1 ... 4].

В настоящей статье приведены методы составления, преобразования и расчета схем дифференциальных защит.

На рис. 1, а приведена симметричная схема с разделенными надвое и включенными в плечи защиты тормозными или подмагничивающими катушками и с уравнивающей обмоткой. Вместо двух двухстержневых сердечников, показанных на рис. 1, может быть применен один трехстержневой сердечник, при этом, как показывают опыты, результаты получаются почти те же, что и при двухстержневых сердечниках.

На основании закона полного тока схема рис. 1, а может быть упрощена без существенного изменения характеристик. Вместо трех катушек, которые расположены на крайних и средних стержнях и по которым протекает один и тот же ток, достаточно иметь две катушки с измененными числами витков.

Устраним катушку $\frac{w_{na}}{2}$ на правом стержне, а для сохранения результирующих н. с. на $\frac{w_{na}}{2}$ уменьшим число витков рабочей обмотки и на то же число увеличим число витков подмагничивающей катушки левого стержня или, что то же самое, $\frac{w_{na}}{2}$ витков перенесем с правого стержня на средние и левый стержни. Новое число витков рабочей катушки

$$w_p' = w_p - \frac{w_{na}}{2}.$$

Для сохранения на средних стержнях н. с., создаваемой током I_b , следует число витков уравнивающей обмотки увеличить на $\frac{w_{na}}{2}$.

Далее устраним $\frac{w_{nb}}{2}$ витков с катушки левого стержня и соответственно уменьшим число витков уравнивающей обмотки и увеличим число витков подмагничивающей катушки правого стержня. Новое число витков уравнивающей катушки

$$w_y' = w_y + \frac{w_{na}}{2} - \frac{w_{nb}}{2}.$$

Полученная таким образом схема показана на рис. 1, б. В ней подмагничивающие катушки частично играют роль рабочей обмотки. Поэтому для такой схемы можно ввести понятие

полных чисел витков рабочей и уравнивающей обмоток и определить их на основании формул:

$$w_p' = w_p + \frac{w_{na}}{2}; \quad w_y' = w_y - \frac{w_{na}}{2} + \frac{w_{nb}}{2}.$$

Полные числа витков могут быть дробными.

Ниже приводятся формулы и пример расчета обмоток схемы рис. 1, б.

Исходя из экспериментально найденной при срабатывании реле без торможения н. с. $F = 70$ а, определяем полное число витков рабочей обмотки

$$w_p' = \frac{cF}{I_{ca}} = \frac{1,05 \cdot 70}{5} = 14,7,$$

где $I_{ca} = 5$ а — ток срабатывания со стороны обмотки а;

$c = \frac{I_{ca}}{I_{c0}}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока срабатывания при одностороннем питании внутреннего повреждения по сравнению с током при симметричном двустороннем питании.

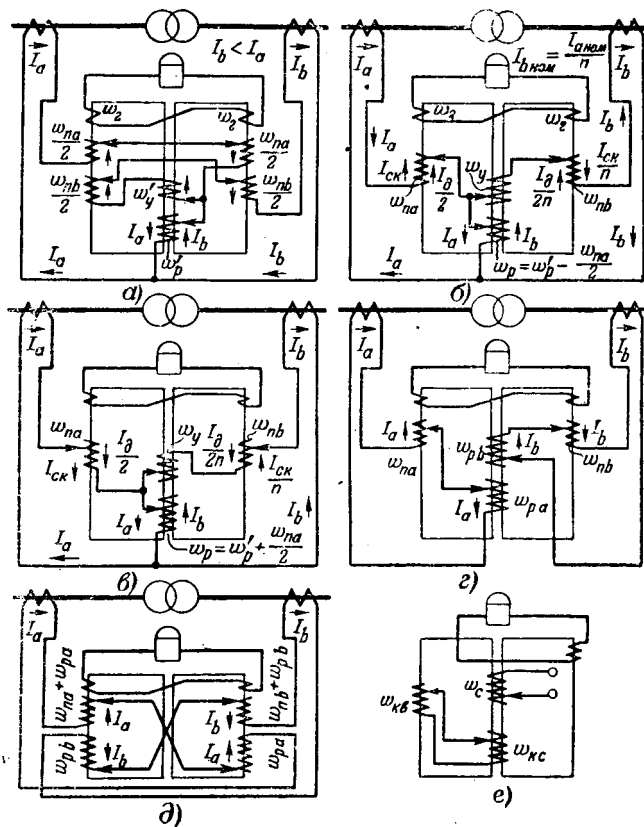


Рис. 1. Схемы дифференциальных защит с одинаковыми суммарными н. с. контуров.

а — с разделенными рабочими и подмагничивающими обмотками; б — эквивалентная с подмагничивающими обмотками, частично выполняющая роль рабочей катушки; в — та же, но с противоположным направлением подмагничивающих катушек; г и д — с разделенными цепями; е — насыщающийся трансформатор с короткозамкнутыми витками.

Коэффициент c для механических реле определяется по известной формуле:

$$c = \frac{2}{\sqrt{4 - k_m^2}}.$$

Коэффициент торможения k_m принимается равным 0,6, поэтому $c = 1,05$.

Таким же образом можно определять коэффициент c и для реле с магнитным торможением, так как при малых токах их характеристики близки к характеристикам механических реле. Число витков подмагничивающей обмотки [Л. 1, 2]:

$$w_{na} = k_m w_p' = 0,6 \cdot 14,7 = 9.$$

При больших токах действительный коэффициент торможения будет больше, что может быть установлено опытным путем или на основании кривых двойного намагничивания [Л. 2].

Если отношение номинальных токов $n = \frac{I_a}{I_b}$ принять равным 1,46, то число витков второй подмагничивающей катушки

$$w_{nb} = n w_{na} = 1,46 \cdot 9 = 13,$$

число витков рабочей катушки

$$w_p = w_p' - \frac{w_{na}}{2} = 14,7 - 4,5 \approx 10.$$

Ток в плечах защиты можно разбить на сквозной $I_{ск}$ и дифференциальный I_{δ} . Считая, что ток I_{δ} притекает от вторичных обмоток трансформаторов тока к дифференциальной цепи с двух сторон,

$$I_a = I_{ск} + \frac{I_{\delta}}{2}; I_b = \frac{I_{ск}}{n} - \frac{I_{\delta}}{2n}.$$

Намагничивающие силы от сквозного тока в правом и левом контурах должны быть равны и противоположны, что достигается при условии

$$n(w_p + w_{na}) - w_p - w_y = w_p + w_y + w_{nb} - n w_p, \quad (1)$$

на основании которого можно определить число витков уравнивающей обмотки:

$$w_y = (n - 1) w_p + 0,5(n w_{na} - w_{nb}) = 0,46 \cdot 10 + 0,5(1,46 \cdot 9 - 13) = 4,67 \approx 5. \quad (2)$$

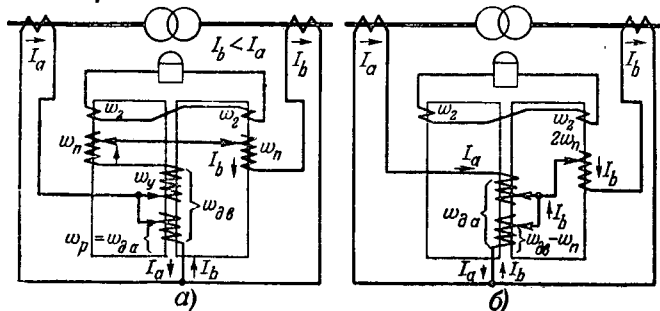


Рис. 2. Схемы дифференциальных защит с подмагничивающими обмотками в одном плече.

а — с разделенными рабочими и подмагничивающими обмотками; б — эквивалентная упрощенная схема.

Последний член правой части равенства (2) учитывает несоответствие отношения округленных чисел витков подмагничивающих обмоток отношению токов.

Вследствие округления числа витков уравнивающей обмотки равенство (1) будет удовлетворяться не при номинальном, а при другом отношении токов, которое соответствует принятым обмоточным данным и определяется из уравнения (1):

$$n_{об} = \frac{w_p + w_y + 0,5 w_{nb}}{w_p + 0,5 w_{na}} = \frac{10 + 5 + 6,5}{10 + 4,5} = 1,482. \quad (3)$$

Ввиду сказанного сквозной ток создаст дополнительный небаланс потоков двух сердечников, что равносильно увеличению тока небаланса на величину

$$\Delta i_{\kappa\delta} = \frac{n - n_{об}}{n_{об}} 100 = \frac{1,46 - 1,482}{1,482} 100 = -1,5\%.$$

Если принять $w_y = 4$, то $n_{об} = 1,414$; $\Delta i_{\kappa\delta} = 3,25\%$. При токе срабатывания $I_{ca} = 10$ а $w_p = 5$; $w_y = 2,22 \approx 2$; $\Delta i_{\kappa\delta} = 2,1\%$, а при $w_y = 3$ ток $\Delta i_{\kappa\delta} = -7,0\%$. Даже при неудачном выборе числа витков уравнивающей обмотки, что имеет место в последнем случае, действие тока небаланса вполне компенсируется торможением ($7\% \ll 60\%$). Таким образом, для компенсации необходимо, чтобы соблюдалось неравенство:

$$i_{\kappa\delta} + \Delta i_{\kappa\delta} < k_m.$$

Следует отметить, что при достаточном торможении отпадает надобность в точном выравнивании коэффициентов трансформации трансформаторов тока.

Преобразование схемы рис. 1, а можно осуществить иным путем, а именно: перенести $\frac{w_{na}}{2}$ с левого стержня на средние и правый стержни. Число витков рабочей катушки при этом увеличится:

$$w_p = w_p' + 0,5 w_{na} = 14,7 + 4,5 \approx 19.$$

В результате получим схему рис. 1, б, которая отличается от предыдущей направлением подмагничивающих обмоток, имеющих такое же число витков, как у обмоток схемы рис. 1, а.

Формулы (1...3) могут быть применены и для схемы рис. 1, б, если знаки у витков подмагничивающих обмоток в этих формулах поменять на обратные:

$$w_y = (n - 1) w_p - 0,5(n w_{na} - w_{nb}) = 8,7 \approx 9;$$

$$n_{об} = \frac{w_p + w_y - 0,5 w_{nb}}{w_p - 0,5 w_{na}} = 1,482;$$

$$\Delta i_{\kappa\delta} = -1,5\%.$$

Если принять $w_y = 8$, то $n_{об} = 1,414$, а $\Delta i_{\kappa\delta} = 3,25\%$. Следовательно, цифры получаются те же, что и в предыдущем случае, из чего

можно заключить, что схемы рис. 1,б и в в отношении выравнивания вторичных токов равноценны, хотя на первый взгляд схема рис. 1, в вследствие большего числа витков имеет преимущества.

Иногда для включения других защит может потребоваться разделение вторичных цепей. Тогда схему рис. 1,б можно выполнить, как это показано на рис. 1,г. Применима также схема рис. 1,д, которая получается в результате разделения общих обмоток в схеме рис. 1,г.

Если не учитывать рассеяния, то тормозные характеристики рассмотренных схем должны быть одинаковыми. В действительности же они несколько отличаются друг от друга кривизной [Л. 2]. Если тормозные и вторичные обмотки располагаются на одних стержнях, а рабочие на противоположных (рис. 1,а), то вследствие добавочного подмагничивания одного участка магнитопровода характеристика будет вогнутой и при больших токах возрастет коэффициент торможения. В схеме рис. 1,б подмагничивающие катушки частично играют роль рабочих, поэтому вогнутость характеристик этой схемы по сравнению с характеристиками схемы рис. 1,а будет меньше. Характеристики схем рис. 1,г и б одинаковы. Вогнутость характеристики схемы рис. 1,в значительно больше, чем схемы рис. 1,а. Схема рис. 1,д имеет приблизительно прямолинейные характеристики, так как все обмотки расположены на одних стержнях.

Предпочтение следует отдать схеме рис. 1,б, так как она отличается простотой, универсальностью, меньшим числом витков и имеет симметричные характеристики. При необходимости включение подмагничивающих катушек в этой схеме можно изменить на обратное (схема рис. 1,в) или осуществить разделение цепей (схема рис. 1,г). При этом не требуется каких-либо конструктивных изменений.

Из схемы рис. 1,б можно получить насыщающийся трансформатор с короткозамкнутыми витками, обладающий пониженной чувствительностью при апериодических токах. Одна из схем такого трансформатора показана на рис. 1,е.

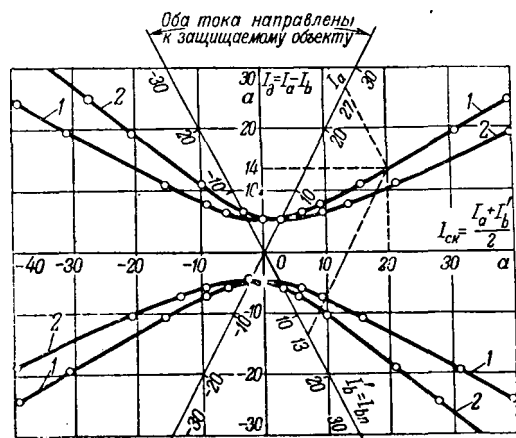


Рис. 3. Экспериментальные характеристики дифференциальных защит.

1 — симметричная схема; 2 — несимметричная схема.

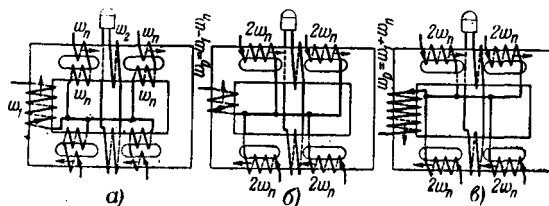


Рис. 4. Схемы дифференциальных защит многообмоточных трансформаторов, имеющих одинаковые суммарные н. с. контуров.

а — с разделенными первичными и подмагничивающими обмотками; б — с подмагничивающими обмотками, частично играющими роль первичной катушки; в — с противоположным включением подмагничивающих обмоток.

Здесь правый сердечник с обмотками является собственно трансформатором. В короткозамкнутой цепи левого сердечника создается ток, который частично компенсирует действие первичного (переменного) тока на правый сердечник, как бы уменьшая число витков первичной обмотки. Действие же постоянного тока не уменьшается, что приводит к понижению чувствительности¹.

Схема упростится, если подмагничивающие катушки расположить несимметрично, т. е. только в одном плече (рис. 2,а). Дальнейшее упрощение схемы можно осуществить перенесением левой подмагничивающей катушки на средние и правый стержни, как это показано на рис. 2,б. Недостаток схемы рис. 2,б состоит в том, что при протекании одного сквозного тока поток рассеяния несимметричен. В случае совпадения по фазе тока небаланса и сквозного тока в подмагничивающих обмотках ($nI_b > I_a$) обе схемы рис. 2 имеют большое торможение, что иллюстрируется кривыми 2 на рис. 3, которые относятся к схеме рис. 2,а. Симметричные схемы имеют симметричные характеристики (кривые 1). Характеристики, представленные на рис. 3, являются универсальными и позволяют определять токи в плечах защиты в косоугольных координатах: I_a ; nI_b . Характеристики 2 можно сделать ближе к симметричным, если увеличить число витков уравнивающей обмотки (рис. 2), но тогда в нормальном состоянии в сердечниках будет иметь место небаланс потоков, который трудно контролировать.

Схемы рис. 2 prone схем рис. 1, но их торможение зависит от направления тока небаланса, которые трудно предугадать. Кроме того, для этих схем имеет некоторое значение вопрос о том, куда включать тормозные катушки. В несимметричные схемы рис. 2 может быть легко превращена схема рис. 1,б.

Дифференциальную защиту с несколькими тормозными катушками можно выполнять при помощи трансформатора с прорезями (рис. 4,а). Здесь четыре подмагничивающие катушки действуют независимо друг от друга. Схему рис. 4,а можно упростить указанным выше способом и получить эквивалентную схему, представленную на рис. 4,б, у которой подмагничивающие обмотки частично играют роль первичной катушки. Мож-

¹ Более подробно о насыщающихся трансформаторах см. в другой нашей работе [Л. 4].

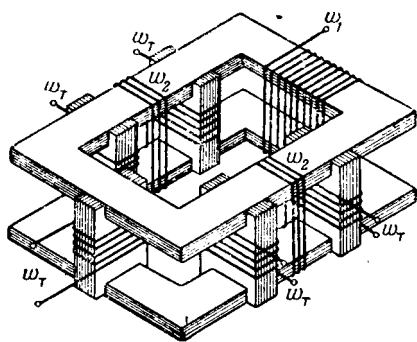


Рис. 5. Насыщающийся трансформатор с пятью подмагничивающими катушками на поперечных стержнях.

но также составить схему с обратным включением подмагничивающих обмоток (рис. 4, в), которая имеет резко вогнутую характеристику. Однако предпочтение следует отдать схеме рис. 4, б как более простой и имеющей меньшее число витков.

Подмагничивающие катушки можно расположить на поперечных связях (рис. 4), продевая витки сначала через одно, а затем через другое отверстие. В этом случае выгодно применить из-

мененную конструкцию с поперечными стержнями (рис. 5). Она отличается простотой выполнения подмагничивающих катушек и позволяет изменять их число. У такого трансформатора отсутствует торможение при симметричном питании внутреннего повреждения, что увеличивает надежность действия реле. Тормозные характеристики такой схемы имеют некоторый разброс ввиду неидентичности расположения катушек. У схемы с продольными отверстиями легче выполняются рабочая катушка и магнитная система, а конструкция получается более жесткой и компактной. Ее можно считать более выгодной.

Литература

1. В. И. Иванов. Реле и релейная защита. Госэнергоиздат, 1932.
2. А. Д. Дроздов. Основные уравнения дифференциальных насыщающихся трансформаторов тока для релейной защиты. Электричество, № 6, 1954.
3. М. Б. Цфасман. О выполнении дифференциальной защиты трансформаторов с магнитным торможением. Электрические станции, № 3, 1955.
4. А. Д. Дроздов. Насыщающиеся трансформаторы тока с короткозамкнутыми витками для релейной защиты. Электричество, № 10, 1953.

[19. 10. 1955]



Модификация формулы Хевисайда

Кандидат техн. наук О. М. БОГАТЫРЕВ

Москва

Формула разложения Хевисайда выводится обычно в литературе для случая разных корней многочлена знаменателя преобразуемого выражения. При наличии кратных корней применяются другие формулы преобразования, требующие специального вывода, а иногда и специальных знаний, например, теории вычетов. Кроме того, при преобразованиях Карсона и Лапласа вышеупомянутые формулы приобретают два вида. Все это приводит к довольно большому числу различных формул преобразования и так называемых формул включения, применяемых к различным частным случаям. Выводы этих формул также излишне громоздки. В итоге создаются ненужные трудности при расчетах переходных процессов.

Ниже предлагается элементарный вывод универсальной формулы разложения Хевисайда, пригодной для всех случаев, когда изображение искомой функции представляется рациональной дробью с любыми корнями знаменателя. При этом безразлично, каким из двух названных выше преобразований пользовались.

Для простоты рассуждений рассмотрим некоторую правильную рациональную дробь, знаменатель которой имеет один нулевой корень и по одному корню первой и второй кратности:

$$\frac{G(p)}{H(p)} = \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{p(p-p_1)(p-p_2)^2}. \quad (1)$$

Такая дробь, как известно, разлагается на простейшие дроби по правилу

$$\frac{G(p)}{H(p)} = \frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p-p_1} + \frac{A_2}{(p-p_2)^2} + \frac{A'_2}{p-p_2}, \quad (2)$$

причем сначала надо убедиться в том, что числитель $G(p)$ не содержит корней знаменателя $H(p)$. В противном случае дробь надо сократить на множитель, соответствующий общему корню.

Числители простых дробей A_0, A_1, A_2, A'_2 определяются следующим элементарным путем.

Найдем A_0 . Для этого умножим правую часть равенства-тождества (2) на p и разделим знаменатель левой части на p . Будем иметь:

$$\frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{p}\right]} = A_0 + p \left[\frac{A_1}{p-p_1} + \frac{A_2}{(p-p_2)^2} + \frac{A'_2}{p-p_2} \right]. \quad (3)$$

Полагая $p=0$ (корню), получим:

$$A_0 = \left[\frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{p}\right]} \right]_{p=0}. \quad (4)$$

Совершенно аналогично умножением и делением на $(p - p_1)$ и затем, полагая $p = p_1$, найдем коэффициент A_1 :

$$A_1 = \frac{G(p_1)}{\left[\frac{H(p)}{p - p_1} \right]_{p=p_1}}. \quad (5)$$

Чтобы найти A_2 , умножим правую часть равенства (2) и разделим знаменатель левой части на $(p - p_2)^2$. Получим:

$$\frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_2)^2} \right]} = A_2 + A_2'(p - p_2) + (p - p_2)^2 \left[\frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p - p_1} \right]. \quad (6)$$

Полагая $p = p_2$, получим A_2 :

$$A_2 = \frac{G(p_2)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_2)^2} \right]_{p=p_2}}. \quad (7)$$

Чтобы найти A_2' , продифференцируем сначала равенство (6):

$$\frac{d}{dp} \left\{ \frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_2)^2} \right]} \right\} = A_2' + 2(p - p_2)[\dots] + (p - p_2)^2 \frac{d}{dp} [\dots]. \quad (8)$$

Полагая теперь $p = p_2$, получим:

$$A_2' = \left\{ \frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_2)^2} \right]} \right\}'_{p=p_2}. \quad (9)$$

Если бы знаменатель преобразуемого выражения $H(p)$ содержал трехкратный корень, например, множитель $(p - p_3)^3$, то соответствующие этому корню простейшие дроби были бы:

$$\frac{G(p)}{H(p)} = \dots + \frac{A_3}{(p - p_3)^3} + \frac{A_3'}{(p - p_3)^2} + \frac{A_3''}{p - p_3} + \dots \quad (10)$$

и коэффициенты A_3 , A_3' и A_3'' определились бы так:

$$A_3 = \frac{G(p_3)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_3)^3} \right]_{p=p_3}}; \quad A_3' = \left\{ \frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_3)^3} \right]} \right\}'_{p=p_3};$$

$$A_3'' = \frac{1}{2} \left\{ \frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_3)^3} \right]} \right\}''_{p=p_3}. \quad (11 \text{ а, б, в})$$

Для корня n -ной кратности при множителе в знаменателе $(p - p_k)^n$ последний коэффициент $A_k^{(n-1)}$ при дроби $\frac{A_k^{(n-1)}}{p - p_k}$ будет иметь следующий вид:

$$A_k^{(n-1)} = \frac{1}{(n-1)!} \left\{ \frac{d^{n-1}}{dp^{n-1}} \left[\frac{G(p)}{\left[\frac{H(p)}{(p - p_k)^n} \right]} \right] \right\}_{p=p_k}. \quad (12)$$

Формула (12) и является той универсальной и единственной формулой, о которой говорилось выше; она может служить для определения не только последнего коэффициента $A_k^{(n-1)}$, но также и всех предыдущих — A_k , A_k' , A_k'' , A_k''' и т. д., получаемых из (12) подстановкой в двучлен $(n-1)$ значений $n=1, 2, 3, \dots$ [при этом принимается: $0! = 1$, $A_k^{(0)} = A_k$].

Порядок вычисления по формуле (12) следующий. Сначала сокращается в знаменателе дробь на множитель $(p - p_k)^n$, затем дифференцируется выражение в квадратных скобках и потом производится подстановка $p = p_k$.

Если изображение искомой функции определялось из уравнений, преобразованных по Лапласу, то оно, как правило, выражается правильной дробью, и дробь разлагается на простейшие без осложнений.

Если при расчете применялось преобразование Карсона, то для удобства нахождения оригиналов простейших дробей следует иметь в числителе множитель p . Его следует вынести за скобку в числителе, если он там имеется, или ввести искусственно, если его там нет, при этом в знаменатель также вводится множитель p . После такого выделения множителя p дробь, подлежащая разложению, всегда будет правильной.

Найденным простейшим дробям соответствуют элементарные табличные оригиналы:

Изображения	по Лапласу	$\frac{1}{p}$	$\frac{1}{p^2}$	$\frac{1}{p^3}$	$\frac{1}{p^{n+1}}$	$\frac{1}{p - p_k}$	$\frac{1}{(p - p_k)^2}$	$\frac{1}{(p - p_k)^3}$	$\frac{1}{(p - p_k)^n}$
	по Карсону	1	$\frac{1}{p}$	$\frac{1}{p^2}$	$\frac{1}{p^n}$	$\frac{p}{p - p_k}$	$\frac{p}{(p - p_k)^2}$	$\frac{p}{(p - p_k)^3}$	$\frac{p}{(p - p_k)^n}$
Оригинал $f(t)$		1	t	$\frac{1}{2} t^2$	$\frac{t^n}{n!}$	$e^{p_k t}$	$t e^{p_k t}$	$\frac{1}{2} t^2 e^{p_k t}$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} e^{p_k t}$

Пример.

Пусть найдено изображение переходного тока (по Карсону) в виде:

$$I(p) = \frac{6p^3 - p^2 + 4}{p(p+2)^3}.$$

Вводим в числитель и знаменатель множитель p ; убедившись подстановкой, что числитель не имеет корней знаменателя и разлагая выражение на простейшие дроби, получим:

$$I(p) = p \left\{ \frac{6p^3 - p^2 + 4}{p^2(p+2)^3} \right\} = p \frac{G(p)}{H(p)} =$$

$$= p \left\{ \frac{A_0}{p^2} + \frac{A'_0}{p} + \frac{A_1}{(p+2)^3} + \frac{A'_1}{(p+2)^2} + \frac{A''_1}{p+2} \right\}.$$

Используя универсальную формулу (12), найдем коэффициенты A :

$$(n=1): A_0 = \left[\frac{6p^3 - p^2 + 4}{(p+2)^3} \right]_{p=0} = \frac{1}{2};$$

$$(n=2): A'_0 = \left[\frac{6p^3 - p^2 + 4}{(p+2)^3} \right]'_{p=0} =$$

$$= \left[\frac{(p+2)^3(18p^2 - 2p) - (6p^3 - p^2 + 4)3(p+2)^2}{(p+2)^6} \right]_{p=0} =$$

$$= -\frac{3}{4};$$

$$(n=1): A_1 = \left[\frac{6p^3 - p^2 + 4}{p^2} \right]_{p=-2} =$$

$$= \left[6p - 1 + \frac{4}{p^2} \right]_{p=-2} = -12;$$

$$(n=2): A'_1 = \left[6p - 1 + \frac{4}{p^2} \right]'_{p=-2} =$$

$$= \left[6 - \frac{8}{p^3} \right]_{p=-2} = 7;$$

$$(n=3): A''_1 = -\frac{1}{2} \left[6 - \frac{8}{p^3} \right]'_{p=-2} =$$

$$= \frac{1}{2} (24p^{-4})_{p=-2} = \frac{3}{4}.$$

Таким образом, получим:

$$I(p) = \frac{0,5}{p} - 0,75 - \frac{12p}{(p+2)^3} +$$

$$+ \frac{7p}{(p+2)^2} + \frac{0,75p}{p+2}$$

и по таблице изображений

$$i(t) = 0,5t - 0,75 - 12 \left(\frac{1}{2} t^2 e^{-2t} \right) + 7te^{-2t} +$$

$$+ 0,75e^{-2t} = -0,75 + 0,5t +$$

$$+ (0,75 + 7t - 6t^2) e^{-2t}.$$

Предложенный вывод формулы Хевисайда не требует никаких специальных знаний и не ограничен никакими условиями.

В заключение отметим, что сделанные автором в свое время рекомендации (Электричество, № 7, 1952) в части, касающейся кратных корней, теряют силу, в части же отделения свободных токов от принужденного и методов вычисления их сохраняются.

[18. 10. 1956]



О „броске“ намагничивающего тока при включении трансформатора

Кандидат техн. наук А. Г. БОГУШ

Новочеркасский политехнический институт

В связи с широким применением насыщающихся трансформаторов тока для дифференциальной защиты силовых трансформаторов в настоящее время уделяется большое внимание исследованию «броска» намагничивающего тока при включении ненагруженных трансформаторов.

В опубликованных работах главное внимание уделялось случаю, когда кривая намагничивающего тока непосредственно после включения трансформатора почти полностью смещена относительно оси времени. Однако анализ ряда осциллограмм тока включения ненагруженных трехфазных трансформаторов показал, что при некоторых условиях в одной из фаз может возникнуть затухающий периодический намагничивающий ток, кривая которого симметрична относительно оси времени. Исследование этого явления имеет большое значение для анализа работы и настройки дифференциальной защиты с насыщающимися трансформаторами, так как последние, как известно, хорошо трансформируют периодический ток.

Одна из характерных осциллограмм, иллюстрирующих случай возникновения «броска» намагничивающего периодического тока, снятая автором в лаборатории, приведена на рис. 1. На ней показаны напряжение фазы A и токи в фазах A , B и C при включении трехфазного трансформатора мощностью 2,5 кВа и напряжением 220 в. Включаемая обмотка соединена звездой, нейтраль обмотки изолирована. Замыкание контактов выключателя произошло в момент, когда мгновенное значение напряжения фазы A было максимальным. Шлейфы осциллографа были включены в первичную цепь включаемой обмотки при помощи шунтов.

На величину и характер изменения периодического намагничивающего тока могут оказывать влияние трансформаторы тока, включенные в первичную цепь силовых трансформаторов высокого напряжения. Ввиду этого были сняты осциллограммы тока включения мощных трехфазных трансформаторов в одной из энергосистем. Одна из них, снятая в фазах A и B обмотки 110 кВ

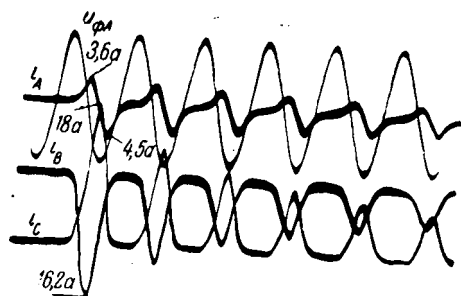


Рис. 1.

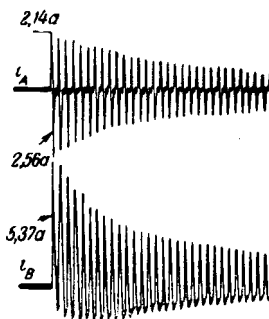


Рис. 2.

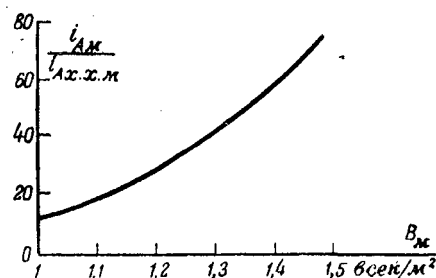


Рис. 3.

ненагруженного трансформатора типа ТДТГ 15 000 кВа, приведена на рис. 2. Шлейфы осциллографа были включены во вторичную цепь трансформаторов тока с коэффициентом трансформации 200/5, встроенных в масляный выключатель МКП-160. При испытании нулевая точка включаемой обмотки трансформатора была разземлена.

Исследование показало, что при включении трехфазных трансформаторов «бросок» периодического тока может иметь место в двух случаях: 1) при соединении включаемой обмотки трансформатора в звезду без нулевого провода, если в момент замыкания контактов выключателя мгновенное значение напряжения в одной из фаз равно максимуму; 2) при соединении включаемой обмотки трансформатора в треугольник, если в момент замыкания контактов выключателя мгновенное значение линейного напряжения между двумя какими-либо фазами равно максимуму.

Возникновение «броска» периодического тока включения физически можно объяснить смещением нейтрали в трехфазной системе напряжений (или токов), вызываемого наложением аperiodической составляющей тока включения и насыщением стали стержней магнитосвязанной системы сердечника трехфазного трансформатора.

Для определения максимальной амплитуды периодического тока включения ненагруженного трансформатора произведем приближенный математический анализ, например, для первого случая, когда $u_{A(t=0)} = U_m$.

Для определения магнитного потока при включении на синусоидальное напряжение катушки со стальным сердечником воспользуемся известной формулой:

$$\Phi_t = \pm \Phi_0 + \Phi_m \cos \psi - \Phi_m \cos (\omega t + \psi) - \frac{r}{\omega} \int_0^t i dt, \quad (1)$$

где Φ_0 — остаточный магнитный поток в стали трансформатора при $t=0$;

Φ_m — магнитный поток при стационарном режиме;

ψ — начальный угол включения напряжения;

r — активное сопротивление цепи;

ω — число витков катушки.

Положим, что активное сопротивление цепи равно нулю и остаточный магнитный поток в стали трансформатора отсутствует. Среднюю длину пути магнитного потока в сердечнике трансформатора примем одинаковой для всех трех фаз и равной l . Начальный угол ψ включения напряжения фазы A , примем равным 90° . Тогда на основании уравнения (1) магнитная индукция в стержнях фаз A , B и C сердечника трансформатора при включении в трехфазную симметричную систему напряжений будет равна:

$$\left. \begin{aligned} B_{At} &= B_m \sin \omega t; \\ B_{Bt} &= B_m \sin (\omega t - 120^\circ) + 0,87 B_m; \\ B_{Ct} &= B_m \sin (\omega t - 240^\circ) - 0,87 B_m. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля выразить уравнением $H = a \text{ sh } bB$, то, как известно, уравнение для тока фазы A трехстержневого трехфазного трансформатора примет вид:

$$i_{At} = \frac{al}{3\omega} \{ 2 \text{sh } [bB_m \sin \omega t] - \text{sh } [bB_m \sin (\omega t - 120^\circ) + 0,87bB_m] - \text{sh } [bB_m \sin (\omega t - 240^\circ) - 0,87bB_m] \}. \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает закон изменения намагничивающего тока включения трехфазного трансформатора при принятых выше допущениях и позволяет найти возможную максимальную амплитуду периодического тока. Исследование уравнения (3) показало, что для значений $bB_m > 4$ (где $B \left[\frac{\text{А} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} \right]$), т. е. для значений, имеющих место в практике, максимум выражения (3) наступает при $\omega t = 150^\circ$, а минимум при $\omega t = 210^\circ$.

Определим значение тока при $\omega t = 150^\circ$. На основании уравнения (3):

$$i_{Am} = \frac{al}{3\omega} [2 \text{sh } (0,5bB_m) - \text{sh } (1,37bB_m) + \text{sh } (1,87bB_m)]. \quad (4)$$

Примем в качестве базисной величины максимальную амплитуду тока холостого хода трансформатора, которая при данных условиях будет равна:

$$i_{Ax.x.m} = \frac{al}{3\omega} [2 \text{sh } (bB_m) + 2 \text{sh } (0,5bB_m)]. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) относительная величина максимальной амплитуды периодического тока включения трехфазного трехстержневого трансформатора будет равна:

$$\frac{i_{Am}}{i_{Ax.x.m}} = \frac{2 \operatorname{sh}(0,5bB_m) - \operatorname{sh}(1,37bB_m) +}{2 \operatorname{sh}(bB_m) +} \rightarrow \frac{+ \operatorname{sh}(1,87bB_m)}{+ 2 \operatorname{sh}(0,5bB_m)} \quad (6)$$

Как видно из уравнения (6), относительное значение максимальной амплитуды периодического тока включения (при $r=0$ и $B_0=0$) зависит от магнитной индукции при стационарном режиме B_m . Эта зависимость показана кривой рис. 3, построенной по уравнению (6), причем в уравнении $H = a \operatorname{sh} bB$ для трансформаторной стали принято $b = 4 \left[\frac{\text{в сек}}{\text{м}^2} \right]^{-1}$.

Выводы. 1. Приведенные в статье осциллограммы тока включения трехфазных трехстержневых трансформаторов и расчеты показывают, что максимальная амплитуда периодического то-

ка включения может иметь значение, близкое к амплитуде номинального тока трансформатора.

2. Опыты показали, что периодический ток включения трансформируется трансформаторами тока без искажений. При включении ненагруженных силовых трансформаторов, имеющих дифференциальную защиту с насыщающимися трансформаторами тока (типа БНТ или ВТН-561), периодический ток включения будет протекать в цепи небаланса дифференциальной защиты и может вызвать ложное срабатывание реле, если уставка тока срабатывания реле будет меньше номинального тока силового трансформатора.

3. При испытании дифференциальной защиты с насыщающимися трансформаторами тока с целью отстройки от тока включения следует иметь в виду, что если включаемая обмотка соединена в звезду, то наиболее тяжелые условия будут при разземленной нейтрали.

4. При лабораторных испытаниях различных типов насыщающихся трансформаторов тока для получения «броска» намагничивающего тока следует применять в качестве нагрузочных трехфазные трехстержневые силовые трансформаторы.

[2. 1.1956]



Регулирование скорости двигателя постоянного тока при помощи дросселей и полупроводников

Кандидат техн. наук К. Н. БОРИСОВ

Москва

Среди многочисленных способов регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока заслуживает внимания регулирование при помощи дросселей с подмагничиванием и полупроводников.

На рис. 1 приведена простейшая схема регулирования. Принцип регулирования по этой схеме сводится к тому, что при изменении тока управления в обмотке дросселя I_y изменяются сопротивление дросселя и напряжение U_d на зажимах двигателя, что приводит к плавному изменению его скорости вращения.

Для сравнения этой системы регулирования с другими системами следует более подробно остановиться на ее работе.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема системы регулирования, изображенной на рис. 1. Здесь двигатель постоянного тока представлен в виде переменного активного сопротивления

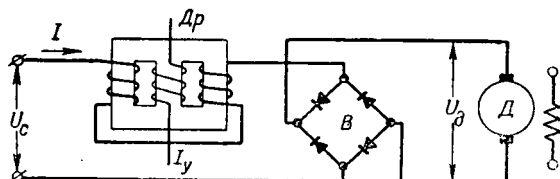


Рис. 1. Принципиальная схема системы регулирования.
Др — дроссель; В — выпрямитель; Д — двигатель.

R_a , величина которого зависит от э. д. с. и сопротивления обмотки якоря. Ток в цепи $I = \frac{U_d - E}{r_a} = \frac{U_d}{r_a + r_n} = \frac{U_d}{R_a}$, откуда следует, что

величина $r_n = r_a \frac{E}{U_d - E}$ является условной: при $n=0$, $E=0$, $r_n=0$; при $n=n_0$, $E=U_d$, $r_n=\infty$.

Таким образом, при изменении скорости вращения двигателя от нуля до скорости идеального холостого хода n_0 сопротивление r_n изменяется в пределах $0 \dots \infty$; сопротивление $R_a = r_n + r_a$ будет изменяться от $R_a = r_a$ до $R_a = \infty$. В целях удобства для дальнейших теоретических рассуждений активными сопротивлениями дросселя и выпрямительного моста пренебрегаем и будем считать, что цепь состоит только из индуктивного сопротивления дросселя x и активного (эквивалентного) сопротивления $R_a = r_a + r_n$.

Как известно, для цепи, состоящей из x и R зависимость между напряжениями и током определяется уравнением эллипса:

$$\left(\frac{U_p}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{I}{I_k} \right)^2 = 1,$$

где U_p — падение напряжения на индуктивном сопротивлении,

U_c — напряжение сети (номинальное);

$$I = \frac{U_c}{\sqrt{x^2 + R^2}} \text{ — ток сети;}$$

$$I_k = \frac{U_c}{R} \text{ — максимальный ток сети при } x = 0.$$

Применяя указанное рассуждение для эквивалентной схемы (рис. 2), где переменными

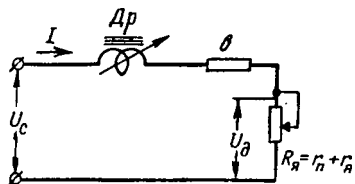


Рис. 2. Эквивалентная схема системы регулирования.

величинами являются x и R_a , можно также получить уравнение эллипса с полуосями U_c и I_k , при этом только полуось $I_k = \frac{U_c}{R_a}$ является

величиной переменной, зависящей от скорости вращения двигателя.

Если на семейство кривых дросселя $U_p = f(I)$ при различных значениях тока управления I_y наложить кривую эллипса, то можно получить наглядную картину работы дросселя при изменении скорости вращения двигателя. На рис. 3 по оси абсцисс отложен ток I . При изменении скорости вращения двигателя полуось тока I_k изменяется. Так, например, с уменьшением скорости вращения сопротивление R_a уменьшается, а полуось тока увеличивается до максимального значения $I_{k\max} = \frac{U_c}{r_a}$, когда $n = 0$.

При отсутствии подмагничивания ($I_y = 0$) в цепи протекает ток, определяемый пересечением эллипса с кривой $I_y = 0$ (точка a на рис. 3); при увеличении I_y ток в цепи растет (соответственно точки b, c и т. д.). При этом если двигатель находился в неподвижном состоянии, то ток якоря будет изменяться соответственно эллипсу с самой большой полуосью $I_{k\max}$.

Как только ток якоря превысит значение тока трогания (в данном случае это соответствует точке c), двигатель придет во вращение. Эллипс начнет сжиматься, а так как подмагничивание остается неизменным, то установившийся процесс будет соответствовать уже точке d . Если увеличить ток управления до значения I_{y3} , работа дросселя будет соответствовать точке e , когда ток якоря снова больше I_k . В этом случае скорость вращения двигателя вновь увеличивается, эллипс сжимается и

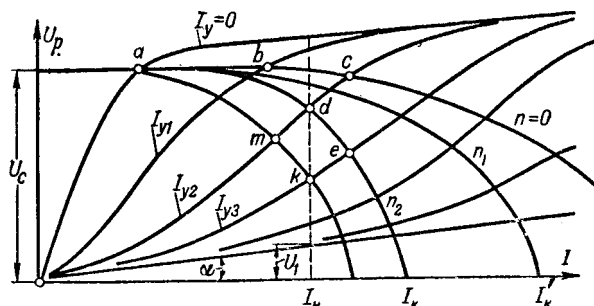


Рис. 3.

установившийся процесс наступит в точке k . Если теперь уменьшить ток управления до значения I_{y2} , то процесс будет протекать от точки k через m в точку d . В точке d вновь установившийся процесс.

Таким образом, если момент двигателя на валу постоянен ($I_k = \text{const}$), то при изменении подмагничивания напряжение на дросселе будет изменяться от $U_p = U_c$ до $U_p = U_1$. Практически путем только подмагничивания невозможно получить напряжение на дросселе $U_p = 0$.

Минимальное напряжение на дросселе определяется отрезком U_1 (рис. 3), равным произведению тока дросселя на сопротивление обмотки дросселя (без сердечника). Отношение $\frac{U_1}{I_k} \equiv \text{tg } \alpha$ представляет сопротивление рассеяния обмоток дросселя и зависит от числа витков и геометрических размеров катушки переменного тока дросселя. Эти обстоятельства приходится учитывать при выборе напряжения переменного тока и напряжения двигателя постоянного тока.

Потери в дросселе при регулировании. При регулировании двигателя с постоянным моментом на валу ($I_k = \text{const}$) сопротивление всей цепи $z = \sqrt{x^2 + R_a^2} = \text{const}$, в то время как $x = z \sin \varphi = \text{var}$ и $R_a = z \cos \varphi = \text{var}$.

Напряжение на дросселе будет $U_p = U_c \sin \varphi$ и на двигателе $U_d = U_c \cos \varphi$. Из последних уравнений

$$U_p = \sqrt{U_c^2 - U_d^2} = U_c \sqrt{1 - \left(\frac{U_d}{U_c}\right)^2}.$$

На рис. 4 приведены кривые зависимости (в относительных единицах) I_k, U_d, U_p от скорости вращения двигателя.

Если принять, что потери в сердечнике дросселя пропорциональны квадрату напряжения U_p , то в зависимости от скорости вращения двигателя их можно представить (в относительных единицах) в виде кривой I рис. 4.

Из проведенных построений (рис. 4) следует:

а) при изменении скорости вращения двигателя потери в меди остаются неизменными;

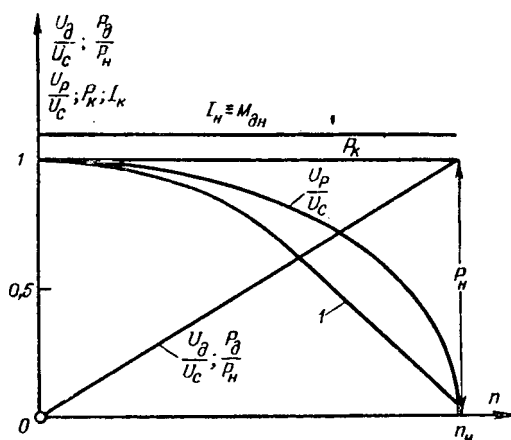


Рис. 4.

б) потери в стали с увеличением скорости вращения уменьшаются, что приводит к увеличению к. п. д. дросселя при больших скоростях;

в) кажущаяся мощность остается неизменной, так как напряжение сети и ток в цепи во всем диапазоне регулирования неизменны;

г) коэффициент мощности уменьшается с уменьшением скорости вращения двигателя.

Регулирование скорости двигателя при использовании трехфазной схемы Ларионова. На рис. 5 приведена принципиальная схема управления двигателем постоянного тока, по которой производилось снятие регулировочных характеристик системы.

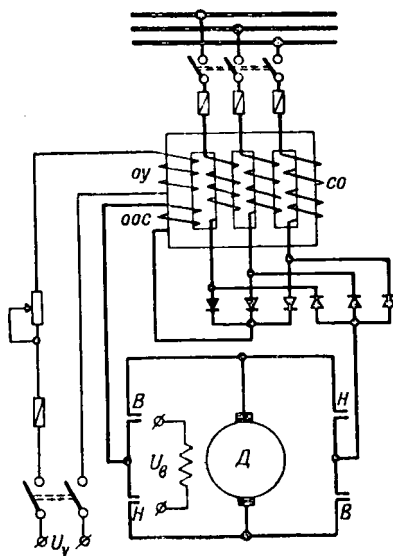


Рис. 5. Принципиальная схема системы регулирования с питанием от сети трехфазного тока.

Питание осуществлялось от сети трехфазного тока напряжением 220 в. Двигатель Д постоянного тока с независимым возбуждением на напряжение $U_{дн} = 220$ в; дроссель Др броневого типа.

Как известно, среднее выпрямленное напряжение без учета падения напряжения в выпрямителях определяется по формуле

$$U_d = \sqrt{2} U_A \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = \\ = \sqrt{2} U_A \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = 1,35 U_A$$

и в данном случае равно 297 в, т. е. превышает номинальное напряжение двигателя. Так как при работе двигателя имеет место падение напряжения в дросселе и выпрямителях, то некоторое превышение выпрямленного напряжения над номинальным напряжением двигателя является нормальным и желательным. Выбор его величины определяется конструктивными размерами дросселя, постоянной времени системы, соотношением потерь в меди и стали и т. д. Этот вопрос требует самостоятельного освещения.

На рис. 6, а приведены опытные механические характеристики двигателя без применения обратной связи. Как видно, механические характеристики двигателя получились мягкими. Путем применения обратных связей по току и скорости можно получить требуемые характеристики двигателя. На рис. 6, б показано влияние обратной связи по току на форму характеристик двигателя. Как видно из рис. 6, механические характеристики не пересекают ось ординат в точке идеального холостого хода, что объясняется шунтирующим действием выпрямителей.

Рассматриваемая система регулирования имеет как преимущества, так и недостатки. К числу преимуществ следует отнести следующие:

1. Широкие пределы регулирования скорости вращения двигателя.

2. Отсутствие вращающихся (кроме основного двигателя) машин.

3. Высокий к. п. д. системы, равный $\eta = \eta_{др} \eta_{в} \eta_{д}$,

где $\eta_{др}$ — к. п. д. дросселя; $\eta_{в}$ — к. п. д. выпрямителей;

$\eta_{д}$ — к. п. д. двигателя.

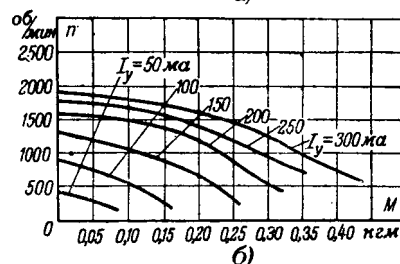
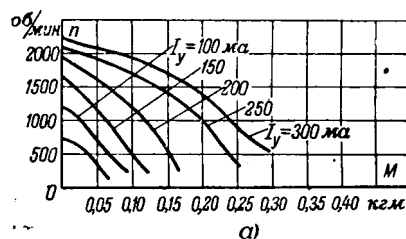


Рис. 6. Опытные механические характеристики двигателя без применения обратной связи (а) и с применением обратной связи по току (б).

М — момент на валу двигателя; I_y — ток управления дросселем.

Коэффициент полезного действия дросселя при максимальном токе управления не менее 0,95... 0,97; к. п. д. выпрямителя зависит от его типа и внутреннего падения напряжения.

Применение кристаллических полупроводников в схеме наиболее желательно и перспективно. В этом случае $\eta = 0,95 \cdot 0,98$ $\eta_d = 0,93 \eta_o$. При низких напряжениях даже применение селеновых выпрямителей может дать лучшие показатели рассматриваемой системы по отношению к любой другой системе регулирования. При высоких напряжениях можно применять ртутные выпрямители.

4. Мощность, затрачиваемая на управление двигателем, невелика.

5. Система проста и надежна.

Недостатки системы:

1. Система инерционна вследствие большой постоянной времени дросселя.

2. С уменьшением скорости вращения двигателя уменьшается коэффициент мощности системы.

3. Реверс усложнен, так как требует применения реверсивного моста или второй выпрямительной системы, как это осуществляется, например, в системе регулирования с ионными преобразователями.

4. Рекуперацию энергии в сеть при торможении осуществить невозможно.

Заключение. Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока при помощи дросселей и полупроводников представляет практический интерес. Это способ регулирования может быть применен при различных мощностях двигателя (от единиц ватт до десятков киловатт) и во многих случаях способен заменить систему генератор—двигатель и др.

Литература

1. Электричество, № 5, 1948.
2. В. К. Попов. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1951.

[4. 1. 1956]



Рабочий процесс контактной машины с накоплением энергии в магнитном поле

Кандидат техн. наук, доц. О. Н. БРАТКОВА

Московское высшее техническое училище им. Баумана

Легкие сплавы и цветные металлы обладают рядом специфических особенностей, вследствие чего создаются некоторые трудности при применении контактной сварки и возникают особые требования к электросварочным машинам.

Контактная машина должна обеспечивать расходование одной и той же порции энергии в сварочном контакте при образовании литого ядра каждой точки и сохранять постоянство закона изменения этой энергии во времени.

Простое присоединение к обычным однофазным контактными машинами переменного тока специальных регуляторов времени для дозирования энергии не дало надлежащего эффекта.

Контактные машины с накоплением энергии создают широкие возможности для стабилизации доз энергии и для автоматизации процесса точечной сварки легких сплавов на основе электромашинной автоматики. Кроме того, они имеют также ряд преимуществ энергетического порядка.

Проектирование машин с накоплением энергии в магнитном поле до настоящего времени затруднено из-за отсутствия теории рабочего процесса и научно обоснованной методики расчета. Первые опытные отечественные машины не обеспечивали сварку листов запроектованной толщины и не были переданы заводу для серийного выпуска, а вопрос о целесообразности и области их применения не был решен до конца.

В настоящей статье приведены результаты исследования рабочего процесса машины с накоплением энергии в магнитном поле.

Экспериментальное исследование было произведено в лаборатории НИАТ на машине с накоплением энергии в магнитном поле типа МТПИМ-200, изготовленной заводом «Электрик», имевшей быстродействующий однополюсный контактор с воздушным дутьем конструкции НИАТ.

В исследовании использован предложенный автором метод расчета магнитной цепи трансформатора контактной машины с накоплением энергии в магнитном поле на заданную величину энергии. В основе этого метода лежит положение, что любая неоднородная магнитная цепь может быть приведена к эквивалентной однородной цепи с постоянной магнитной индукцией по длине / средней силовой линии. Введение воздушного зазора эквивалентно замене данной неоднородной магнитной цепи некоторой другой однородной, изготовленной из материала с худшей магнитной проницаемостью. Кривая намагничивания такой цепи названа нами приведенной кривой намагничивания [Л. 1].

При аналитическом исследовании были сделаны следующие допущения: взаимоиндуктивность и индуктивности обмоток трансформатора приняты постоянными на основании линейности приведенной кривой намагничивания; явления гистерезиса

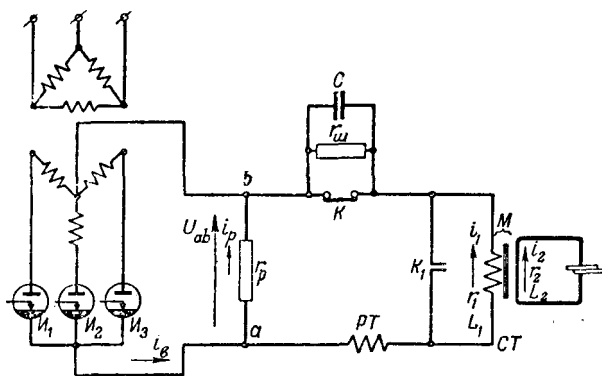


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема машины с накоплением энергии в магнитном поле.

$I_1 \dots I_3$ — игнитроны; СТ — сварочный трансформатор; РТ — реле тока с регулируемым воздушным зазором; К — контакты быстродействующего однополюсного контактора с воздушным дутьем, отключающие источник питания за время 0,006...0,007 сек; K_1 — контакты контактора, закорачивающие первичную обмотку СТ в конце процесса сварки перед поднятием верхнего электрода во избежание искрения между электродами.

зиса и поверхностного эффекта в контурах машины, а также влияние вихревых токов в расчетах не учитывались; среднее значение сопротивления участка электрод — электрод $r_{\text{эв}}$ принято равным 20% величины сопротивления всего сварочного контура r_2 ; колебания сопротивления $r_{\text{эв}}$ не оказывают на r_2 существенного влияния.

Процесс накопления энергии в магнитном поле. При подключении контактной машины к силовому выпрямителю по мере нарастания тока i_1 в магнитном поле трансформатора накапливается энергия. При токе i_1 (t_1) срабатывает реле тока и размыкаются контакты К (рис. 1).

Особенностью данного случая включения нагруженного трансформатора на постоянное напряжение является то, что трансформатор контактной машины из-за специфичности конструкций сварочного контура имеет очень большое рассеяние. При условии работы магнитной системы трансформатора без насыщения было получено достаточно хорошее совпадение расчетных и опытных кривых токов процесса накопления энергии (рис. 2).

По данным осциллограмм режима накопления энергии можно построить приведенную кривую намагничивания эквивалентного магнитопровода трансформатора СТ контактной машины, а по ней, используя метод графического интегрирования, определить энергию, накопленную в магнитном поле трансформатора.

Пренебрегая потоком рассеяния первичной обмотки и остаточным потоком, вначале строят кривые $\Phi(t)$ и $H_s(t)$ по формулам:

$$\Phi(t) = \frac{r_1 + r_0}{w_1} \left(i_{1\text{уст}} t - \int_0^t i_1 dt \right); \quad (1)$$

$$H_s(t) = \left(i_1 + i_2 \frac{w_2}{w_1} \right) \frac{w_1}{l}, \quad (2)$$

где $i_{1\text{уст}}$ — установившийся ток к концу процесса накопления энергии;

w_1, w_2 — числа витков обмоток;

$$r_0 = \frac{r' r_p}{r_p + r'};$$

r' — внутреннее сопротивление источника в проводящем направлении.

Используя (1), (2) и расчетные выражения для токов трансформатора в процессе накопления энергии, можно кривую намагничивания эквивалентного магнитопровода получить также и расчетным путем.

Как видно из рис. 3, точки, полученные по данным опытных осциллограмм, хорошо совпадают с расчетной кривой.

Уравнение энергетического баланса режима накопления энергии может быть записано в следующем виде:

$$W_u = W_{\kappa} + W_1 + W_{r_0} + W_2, \quad (3)$$

где $W_u = \int_0^t U_d i_1 dt$ — энергия, потребляемая от источника;

$W_{\kappa} = 0,5(L_1 i_1^2 + L_2 i_2^2 + M i_1 i_2)$ — энергия, накапливаемая в магнитном поле;

$W_1 + W_{r_0} + W_2$ — энергия, переходящая в тепло в контурах машины.

Величина доли энергии, аккумулируемой в магнитном поле трансформатора, названа нами коэффициентом использования потребляемой энергии при накоплении:

$$\eta_{\kappa} = \frac{W_{\kappa}}{W_u}. \quad (4)$$

В начале процесса накопления η_{κ} растет, а затем по мере насыщения магнитной системы уменьшается.

При некоторой продолжительности накопления, при которой доля суммы потерь на нагрев наименьшая, η_{κ} имеет наибольшее значение.

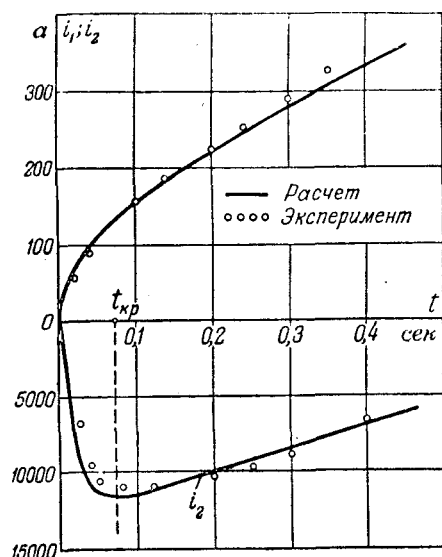


Рис. 2. Сравнение расчетных кривых с опытными данными токов машины с накоплением энергии.

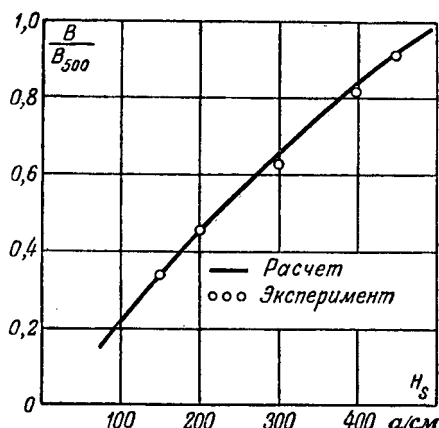


Рис. 3. Кривая намагничивания эквивалентного магнитопровода сварочного трансформатора.

У машины МТПИМ-200 (без реактора) $\eta_{\text{н макс}} = 54\%$.

На основе анализа процесса накопления можно сделать вывод, что машина исследуемого типа как накопитель энергии должна проектироваться с ненасыщенной магнитной системой.

Процесс отдачи накопленной энергии на сварку. В опубликованных исследованиях рабочего процесса машины с накоплением энергии [Л. 2...4] авторы в расчетах предполагали, что питание машины происходит от источника постоянного тока. При этом не учитывалось, что при питании от выпрямителя прекращение его действия запаздывает по отношению к моменту размыкания контактов выключающего устройства. Кроме того, авторы предполагали, что к началу сварки переходные процессы в контурах трансформатора заканчиваются, что также не соответствует реальным условиям работы машины.

В проведенном нами исследовании сначала предполагалось, что происходит бездуговое отключение питания. Затем было учтено влияние дуги путем замены ее переменным сопротивлением $R_d(t)$, закон изменения которого был найден на основе данных осциллограмм.

Ток в цепи выпрямительной установки

$$i_s = \frac{E_d + i_1 r_p}{r_p + r'}, \quad (5)$$

где E_d — среднее значение выпрямленной э. д. с.

Очевидно $i_1 \ll -\frac{E_d}{r_p}$ при $i_s = 0$ и $t_2 < t < t_3$ (рис. 4).

Отдельные вспышки игнитронов при $t > t_3$ наблюдаются до тех пор, пока не снято напряжение в цепи поджигания игнитронов.

В процессе отдачи энергии на сварку происходит изменение параметров первичного контура машины, что требует (при проведении

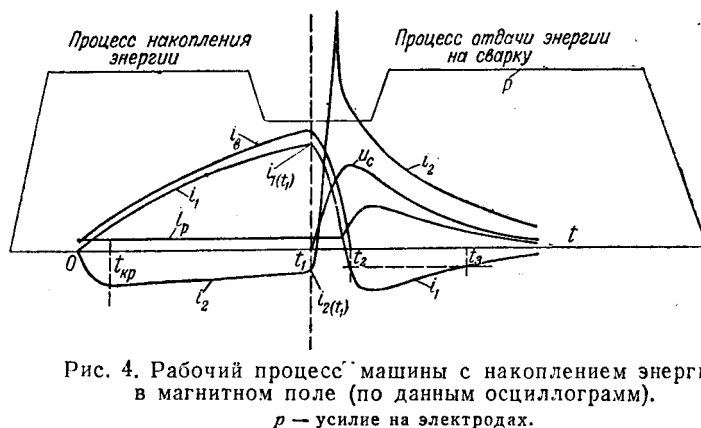


Рис. 4. Рабочий процесс машины с накоплением энергии в магнитном поле (по данным осциллограмм).

p — усилие на электродах.

расчета) деления процесса сварки на отдельные интервалы в зависимости от того, больше нуля или равен нулю ток i_s .

Переходные процессы в течение первого интервала описываются дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} (r_1 + r_0) i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + u_c &= U_d; \\ r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Характеристическое уравнение системы (6)

$$p^3 + \frac{T_1 + b_1 T_2 + \frac{\sigma T_1 T_2}{C r_{\text{ш}}}}{\sigma T_1 T_2} p^2 + \frac{b_1 + \frac{T_2}{C r_1} + \frac{T_1 + b_1 T_2}{C r_{\text{ш}}}}{\sigma T_1 T_2} p + \frac{1}{C r_1} + \frac{1}{C r_{\text{ш}}} = 0. \quad (7)$$

При $r_{\text{ш}} > 500$ ом и $C > 500$ мкф, что часто имеет место на практике, можно в (7) отбросить члены, содержащие $r_{\text{ш}}$.

Для удовлетворения технологических и энергетических требований целесообразно иметь такие параметры контуров контактной машины, при которых в течение первого интервала переходный процесс имеет колебательный характер; это имеет место и у существующих машин.

Закон изменения токов в общем виде в течение первого интервала¹:

$$y_1 = B_1 + B_{11} e^{p_1 t} + B_{21} \cos \beta t e^{\alpha t} + B_{31} \sin \beta t e^{\alpha t}, \quad (8)$$

где p_1 — вещественный отрицательный корень; α и $\pm \beta$ — действительная и мнимая части комплексных корней уравнения (7);

B_1 — установившееся значение токов, равное нулю.

¹ Для простоты записи вместо $t - t_1$ положено t . Аналогично сделано и при расчетах других интервалов.

Коэффициенты B_{11} , B_{21} и B_{31} определяются из выражений:

$$B_{11} = \frac{(\alpha^2 + \beta^2) y(t_1) - 2\alpha y'(t_1) + y''(t_1)}{\beta^2 + (\alpha - p_1)^2}; \quad (9)$$

$$B_{21} = \frac{p_1(p_1 - 2\alpha) y(t_1) + 2\alpha y'(t_1) - y''(t_1)}{\beta^2 + (\alpha - p_1)^2}; \quad (10)$$

$$B_{31} = \frac{p_1[(\alpha^2 - \beta^2) - \alpha p_1] y(t_1) - \rightarrow - [(\alpha^2 - \beta^2) - p_1^2] y'(t_1) + (\alpha - p_1) y''(t_1)}{\beta[\beta^2 + \rightarrow + (\alpha - p_1)^2]}, \quad (11)$$

где $y_1(t_1)$ — начальное значение тока, равное току в конце процесса накопления;

$y'_1(t_1)$, $y''_1(t_1)$ — начальные значения производных токов.

На втором интервале переходные процессы носят апериодический характер, так как игнитроны заперты, а в цепи тока i_1 включено значительное сопротивление r_p .

Дифференциальные уравнения получены из (6) путем приравнивания U_d нулю и замены r_0 сопротивлением r_p . Характеристическое уравнение подобно упрощенному уравнению (7).

Закон изменения токов в течение второго интервала:

$$y_{11} = C_{11} + C_{11} e^{p_1 t} + C_{21} e^{p_2 t} + C_{31} e^{p_3 t}, \quad (12)$$

где p_1 , p_2 и p_3 — вещественные отрицательные корни характеристического уравнения;

C_{11} — установившееся значение токов, равное нулю.

Коэффициенты C_{11} , C_{21} , C_{31} определяются из выражений:

$$C_{11} = \frac{p_2 p_3 [y_{11}(t_2) - y_{11\text{уст}}] - \rightarrow - (p_2 + p_3) y'_{11}(t_2) + y''_{11}(t_2)}{(p_2 - p_1)(p_3 - \rightarrow - p_1)}; \quad (13)$$

$$C_{21} = \frac{p_1 p_3 [y_{11}(t_2) - y_{11\text{уст}}] - (p_1 + p_3) y'_{11}(t_2) + y''_{11}(t_2)}{(p_3 - p_2)(p_1 - p_2)}; \quad (14)$$

$$C_{31} = \frac{p_1 p_2 [y_{11}(t_2) - y_{11\text{уст}}] - (p_1 + p_2) y'_{11}(t_2) + y''_{11}(t_2)}{(p_1 - p_3)(p_2 - p_3)}, \quad (15)$$

где $y_{11}(t_2)$ — значение тока в конце первого интервала;

$y'_{11}(t_2)$, $y''_{11}(t_2)$ — начальные значения производных токов.

Для третьего интервала расчетная схема соответствует расчетной схеме первого интервала, и переходные процессы вновь носят колебательный характер. На основе вышеизложенной методики расчета процесса отдачи накоп-

ленной энергии были получены уравнения для токов и напряжения u_c на размыкающихся контактах K , по которым были рассчитаны кривые, приведенные на рис. 5.

При экспериментальных исследованиях машины оказалась невозможной запись сварочного тока, достигающего в процессе отдачи энергии более 35 000...40 000 а, при помощи обычно применяемого в сварочной технике полоого охлаждаемого водой шунта, имеющего утонченные стенки. Такая запись, как показало исследование, дает сильное искажение кривой тока i_2 по форме и значительный сдвиг ее во времени вследствие явления поверхностного эффекта в шунте.

Поэтому построение кривой тока i_2 при отдаче энергии на сварку производилось по данным опытных осциллограмм токов процесса накопления энергии и осциллограмм тока i_1 и напряжения u_c процесса отдачи энергии (приложение).

Кривая тока i_2 , построенная по этому методу (рис. 5), несколько сдвинута от расчетной кривой в сторону отставания, так как последняя не учитывает действие дуги на контактах.

Существенное влияние на законы изменения токов при отдаче энергии оказывают величины токов к концу процесса накопления.

Увеличение рассеяния трансформатора уменьшает скорость нарастания тока i_2 . Аналогично влияет увеличение емкости батареи, шунтирующей контакты. Однако это влияние не столь значительно, чтобы им можно было воспользоваться для целей регулирования режима.

При размыкании контактов K на них возникает напряжение, достигающее 1 500...2 000 в.

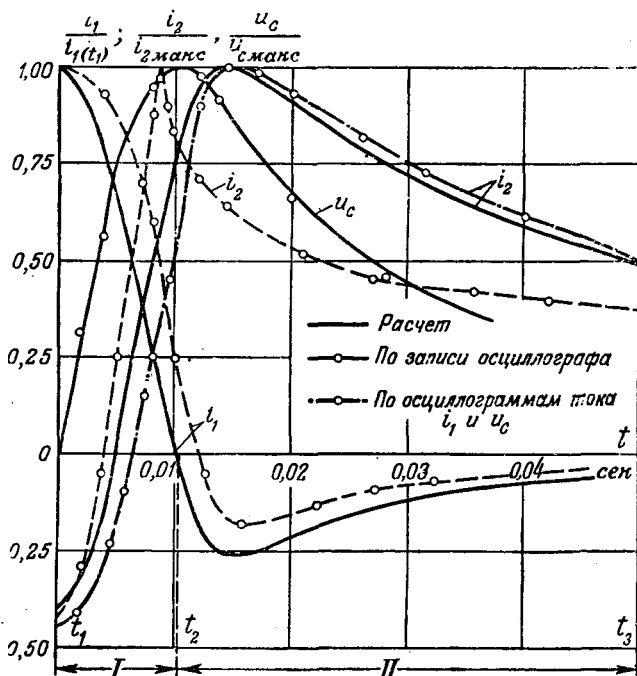


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные кривые токов и напряжения u_c на контактах в процессе отдачи накопленной энергии на сварку.

Наличие батареи, шунтирующей контакты, уменьшает скорость нарастания этого напряжения

$$u'_{cl} = \frac{i_{II}}{C} - \frac{u_{cl}}{Cr_{ш}}, \quad (16)$$

что ухудшает условия для возникновения дуги на контактах.

При выводе (16) предположено, что цепь батареи имеет пренебрежимо малые индуктивность и сопротивление.

В зависимости от конструкции выключателя, определяющей закон изменения расстояния между контактами $l_k(t)$, их материала и свойств среды, где происходит размыкание, каждому значению $l_k(t)$ соответствует некоторое наименьшее значение напряжения на дуге U_0 , определяемое вольтамперной характеристикой, соответствующей данному расстоянию.

Величина емкости батареи, обеспечивающая для данного режима машины бездуговое отключение, может быть определена из выражения:

$$C = \frac{i_1(t_1) \cdot t \cdot 10^6}{U_0} \text{ [мкф]}, \quad (17)$$

где $i_1(t_1)$ — ток, определяемый по кривой тока режима накопления;

U_0 — напряжение, меньшее того напряжения, при котором поддерживается дуга при $l_k(t)$ между контактами выключателя данной конструкции;
 t — время, равное 0,001...0,002 сек.

При выводе (17) принят линейный закон нарастания напряжения u_c в начале процесса отдачи энергии.

Однако не всегда можно подобрать емкость, обеспечивающую бездуговое отключение. С ростом $i_1(t_1)$ усиливается действие э. д. с. самоиндукции в цепи батареи, в связи с чем возникают условия, препятствующие заряду батареи, что и приводит к появлению дуги.

При увеличении разрываемых токов (400 а и более) практически не удается осуществить бездуговое отключение [Л. 5].

Дуга затягивает процесс отключения и уменьшает величину энергии, переходящей в тепло в свариваемом изделии. В случае, если энергия, теряемая в дуге, составляет 20% и более от энергии, накапливаемой в магнитном поле, ее колебания могут привести к нестабильному качеству сварных точек.

В машине МТПИМ-200 (без реактора) энергия, теряемая в дуге, составляет около 12% W_k .

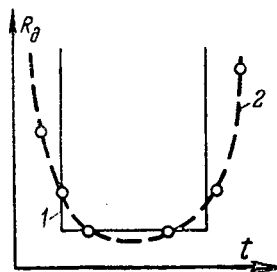


Рис. 6. Расчетный (1) и экспериментальный (2) графики $R_0 = f(t)$.

Кривая $R_0 = f(t)$, найденная по данным опытных осциллограмм при расчете переходных процессов с учетом влияния дуги, была заменена графиком, приведенным на рис. 6.

Было получено достаточно хорошее совпадение кривых нарастания энергии на участке электрод — электрод, построенных по расчету с учетом дуги и по данным осциллограмм.

Для процесса отдачи энергии уравнение энергетического баланса имеет следующий вид:

$$W_k + W_{ul} = W_{ss} + W_1 + W_{r0} + W_{2k} + W_e, \quad (18)$$

где

W_{ul} — энергия, поступающая от источника в течение первого интервала (у машины МТПИМ-200 она составляет около 10% W_k ;

на третьем интервале энергией, поступающей от источника, ввиду ее малости, пренебрегаем);

W_{ss} — энергия, переходящая в тепло на участке электрод — электрод;

$W_1 + W_{r0} + W_{2k}$ — энергия, переходящая в тепло в контурах машины;

$W_e = \int_0^\infty u_c i_1 dt = 0$ — энергия, накапливаемая в

электрическом поле конденсаторной батареи при $i_1(t_1) > i_1 > 0$, а затем расходуемая при разряде на нагрев контуров.

При $U_{смакс}$ в машине МТПИМ-200 (без реактора) W_e составляет около 20% W_k .

Как показало исследование, количество энергии, переходящей в тепло на участке электрод — электрод, составляет значительно меньшую часть накапливаемой энергии, чем энергия, расходуемая на покрытие потерь в машине.

За все время отдачи энергии на сварку у машины МТПИМ-200 (без реактора) энергия W_{ss} составляет 14% W_k , и 86% составляют потери в контурах машины. Наибольшее количество энергии W_{ss} относится к периоду спада сварочного тока от $i_{2макс}$ до $0,5 i_{2макс}$.

У машины МТПИМ-200 (без реактора) за время нарастания сварочного тока до $i_{2макс}$ энергии W_{ss} составляет около 17%, за время спада тока от $i_{2макс}$ до $0,5 i_{2макс}$ — 53% и за время дальнейшего спада тока до нуля — 30%.

Коэффициент использования накопленной энергии

$$\eta_{отд} = \frac{W_{ss}}{W_k} \cdot 100; \quad (19)$$

коэффициент использования потребляемой энергии или к. п. д. машины.

$$\eta_s = \eta_k \eta_{отд}. \quad (20)$$

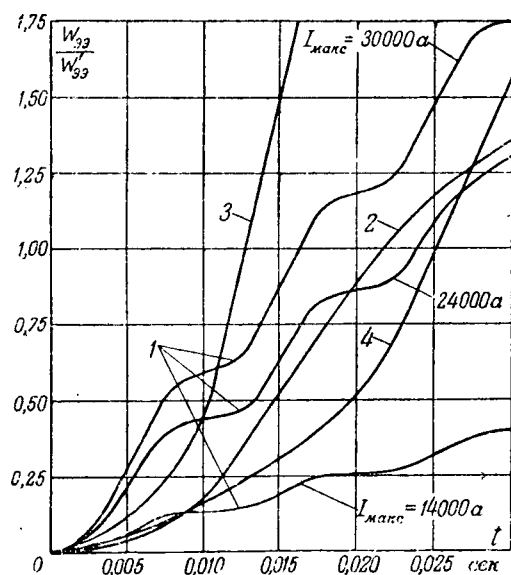


Рис. 7. Технологические характеристики контактных машин ($W_{33} = 100 \text{ вт} \cdot \text{сек}$; $r_{33} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$).

$I_{\text{макс}}$ — амплитудное значение переменного тока; 1 — однофазной контактной машины; 2 — контактной машины с накоплением энергии в магнитном поле (без реактора); 3 — то же с реактором; 4 — контактной машины для сварки импульсом постоянного тока.

У машины МТПИМ-200 (без реактора) по расчетным данным к концу процесса отдачи накопленной энергии $\eta_s = 14\%$; при $t = 0,05 \text{ сек}$, считая от начала процесса отдачи энергии на сварку, что соответствует $i_2 = 0,5 i_{2\text{макс}}$, к. п. д. $\eta_s \approx 9\%$. По данным опытных осциллограмм, $\eta_s = 6\%$. Расчетные значения η_s для машины МТПИМ-200 с учетом дуги составляет около 5% .

Закон изменения энергии $W_{33}(t)$ дает представление о возможности использования данного типа контактной машины для сварки различных металлов той или иной толщины. В силу этого закон изменения энергии $W_{33}(t)$ может быть назван технологической характеристикой контактной машины. Технологические характеристики различных типов контактных машин, построенные в относительных единицах, приведены на рис. 7.

Интенсивность нарастания энергии W_{33} у контактной машины переменного тока целиком определяется действующим значением сварочного тока, и кривая $W_{33}(t)$ носит волнообразный характер. Характер нарастания энергии W_{33} зависит от наличия или отсутствия реактора.

Включение реактора параллельно первичной обмотке трансформатора (машина фирмы Sciaky, МТПИМ-200) при условии аккумуляирования того же количества энергии уменьшает время его накопления и создает условия для работы трансформатора СТ без насыщения, а также уменьшает ток предварительного нагрева трансформатора в режиме накопления, что благоприятно для сварки тонких материалов.

В процессе отдачи энергии на сварку включение реактора приводит: а) к увеличению по-

терь в дуге выключающего устройства (у машины МТПИМ до 16%); б) к более быстрому нарастанию сварочного тока до значения $i_{2\text{макс}}$ и к более интенсивному его спаду в дальнейшем; в) к более интенсивному нарастанию энергии W_{33} . При исследовании был взят реактор, у которого магнитопровод идентичен магнитопроводу трансформатора.

Наиболее замедленное нарастание энергии W_{33} наблюдается у контактной машины для точечной сварки импульсом постоянного тока, что является благоприятным для образования развитого литого ядра точки при сварке изделий из алюминиевых сплавов значительной толщины (более $2,5 + 2,5 \text{ мм}$).

Расчет рабочего процесса машины для сварки импульсом постоянного тока и построение ее технологической характеристики были произведены с использованием методики и основных зависимостей, полученных при исследовании рабочего процесса машины с накоплением энергии в магнитном поле.

Закключение. На основе произведенного исследования, опубликованных материалов и данных опыта эксплуатации контактных машин с накоплением энергии в магнитном поле можно утверждать, что эти машины без реактора целесообразно применять для точечной сварки изделий из легких сплавов толщиной более $1 + 1 \text{ мм}$, но менее $2,5 + 2,5 \text{ мм}$.

Применение машины с реактором нецелесообразно для сварки изделий из легких сплавов большой толщины. Это следует из технологической характеристики, а также вследствие того, что отключение питания при токах более 400 а практически неосуществимо без дуги, что приводит к нестабильному качеству сварных точек. Вопрос о выборе типа машины для сварки изделий из легких сплавов малой толщины ($1 + 1 \text{ мм}$ и меньше) необходимо решать с учетом результатов сравнения технико-экономических расчетов, произведенных для конденсаторной машины и машины с накоплением энергии в магнитном поле с реактором.

Для сварки легких сплавов большой толщины, начиная с $2,5 + 2,5 \text{ мм}$, более прогрессивным типом, чем машина с накоплением энергии в магнитном поле, является контактная машина завода «Электрик», производящая сварку импульсом постоянного тока. В этой машине, обладающей хорошей технологической характеристикой для сварки сплавов большой толщины, имеются также условия для получения сварных точек стабильного качества.

Автор выражает благодарность коллективу сварочной лаборатории НИАТ за оказание содействия и помощи при экспериментальных исследованиях машины МТПИМ-200.

Приложение. Для построения кривой сварочного тока при отдаче накопленной энергии на сварку необходимо располагать двумя кривыми, построенными по данным опытных осциллограмм:

а) приведенной кривой намагничивания эквивалентного магнитопровода трансформатора;

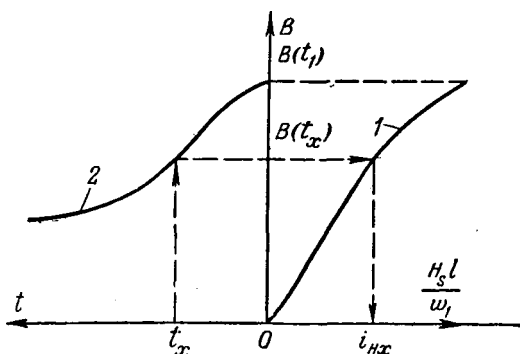


Рис. 8. Определение тока i_2 процесса отдачи энергии по экспериментальным данным.

1 — по данным осциллограмм режима накопления энергии; 2 — по данным осциллограмм тока i_1 и напряжения u_c режима сварки.

б) кривой изменения магнитной индукции в его сердечнике при отдаче энергии на сварку.

Последняя кривая для первого интервала строится по уравнению:

$$\Psi_{II} = U_d(t - t_1) - \int_{t_1}^t u_{c1} dt - (r_1 + r_0) \int_{t_1}^t i_{II} dt + \Psi_1(t_1).$$

Аналогично производятся построения и для остальных интервалов.

Сварочный ток определяется из выражения

$$i_2 = (i_k - i_1) \frac{w_1}{w_2},$$

где i_k — мгновенное значение намагничивающего тока (рис. 8);

i_1 — мгновенное значение первичного тока, взятое из опытной осциллограммы процесса отдачи энергии на сварку.

При этом методе пренебрегаем явлением гистерезиса, потоком остаточной магнитной индукции и явлением поверхностного эффекта в полой шунте при записи вторичного тока процесса накопления энергии.

Литература

1. О. Н. Браткова. Автогенное дело, № 10, 1952.
2. G. S. Mikhailarov, G. N. Weygandt. The Welding Journ., XI, 1940.
3. А. А. Батоврин. Электромагнитные процессы в импульсной машине для сварки. Диссертация ЛПИ, 1951.
4. В. К. Лебедев. Автоматическая сварка, № 4, 1953.
5. А. А. Батоврин. ВЭП, № 11, 1952.

[1. 10. 1956]



Исследование машин переменного тока при переменной скорости вращения

Кандидат техн. наук И. И. ТРЕЩЕВ

Ленинград

Введение. Современное развитие техники связано с непрерывным ростом мощностей электрических машин при одновременном ускорении режимов их работы. В этих условиях неустановившиеся процессы в машинах занимают важное место и в ряде практических случаев приобретают первостепенное значение. Известны случаи, когда синхронный генератор при глухом трехфазном коротком замыкании за малый промежуток времени значительно снижает свою скорость вращения. Это снижение скорости определяется тормозным моментом, возникающим при коротком замыкании, и маховыми массами и, следовательно, будет различным в каждом конкретном случае. Для определения условий быстрого восстановления работы синхронных генераторов в этом случае требуется знание момента при переменной скорости вращения.

Важно также знать максимальное значение момента при коротком замыкании с целью определения механической прочности конструкции генератора и его фундамента. Однако величина максимального момента зависит от изменения скорости вращения генератора в этом режиме.

Теория электропривода обычно пренебрегает влиянием скорости изменения скольжения на механические характеристики асинхронного двигателя. При этом в энергетическом балансе машины не учитывается мощность, затрачиваемая на

изменение магнитной энергии в ней. Полагают, что каждому скольжению машины соответствует вполне определенное значение момента вращения независимо от скорости изменения скольжения. В действительности же статическая механическая характеристика верна только в установившемся режиме. Даже при обычных ускорениях нормальных асинхронных двигателей отклонение действительного момента вращения от величины его в статическом режиме оказывается значительным. Например, для двигателя единой серии А92-4 при времени разгона $t = 2,6 T_n = 1$ сек максимальная разница между этими моментами будет составлять при малых скольжениях около 50% номинального.

Торможение асинхронного двигателя при заклинивании механизма происходит за очень малый промежуток времени. При этом действительный максимальный момент с учетом влияния скорости изменения скольжения может превысить максимальный момент по статической характеристике почти в 2 раза, а номинальный момент почти в 5 раз, что, безусловно, должно учитываться при расчете механической прочности как самого двигателя, так и спаренного с ним механизма. Различие между этими характеристиками будет иметь место и при регулировании скорости асинхронного двигателя путем изменения частоты. Особенно важен учет влияния скорости изме-

нения скольжения на механическую характеристику двигателя при повторно-кратковременных и быстро протекающих процессах в связи с общей современной тенденцией ускорения работы механизмов. Критерий, позволяющий найти максимальную ошибку в этих случаях, был дан ранее в [Л. 5].

Расчет момента вращения синхронной машины при коротком замыкании требует знания поперечных составляющих токов и потокосцеплений, что резко усложняет задачу даже при постоянной скорости вращения и с применением операторного метода. Между тем, токи короткого замыкания приближенно выражаются простыми формулами, которые хорошо подтверждаются экспериментом.

Большие теоретические трудности представляет исследование работы асинхронного двигателя при переменной скорости вращения.

В данной статье показано, что мощность, связанная с изменением магнитной энергии машины при коротком замыкании, может быть определена достаточно точно, если известны симметричные составляющие токов только по одной оси. Это положение и энергетический баланс в машине позволяют весьма просто и с необходимой точностью определить момент вращения при коротком замыкании с учетом изменения скорости вращения.

На основании энергетического баланса находятся рекуррентные формулы для момента вращения асинхронной машины и запаса магнитной энергии в ней, по которым рассчитывается работа машины при переменной скорости вращения.

Основные соотношения. Принимаем, что координатная система осей неподвижна относительно ротора. Уравнения равновесия напряжений для обмотки статора в относительных единицах и при допущениях, которые обычно в этом случае принимаются, имеют вид [Л. 1]:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= i_d r_s + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q; \\ u_q &= i_q r_s + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d; \\ u_0 &= i_0 r_s + \frac{d\psi_0}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для обмотки ротора

$$\left. \begin{aligned} u_{rd} &= i_{rd} r_r + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ u_{rq} &= i_{rq} r_r + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $u_d, u_{rd}, i_d, i_{rd}, \psi_d, \psi_{rd}$ — составляющие напряжений, токов и потокосцеплений по оси d ;

$u_q, u_{rq}, i_q, i_{rq}, \psi_q, \psi_{rq}$ — составляющие напряжений, токов и потокосцеплений по оси q ;

u_0, i_0, ψ_0 — то же для нулевых составляющих;
 r_s и r_r — активные сопротивления статора и ротора;

ω — угловая скорость ротора.

Нулевые составляющие для простоты в дальнейшем опускаются, так как они не связаны с остальными составляющими и легко могут быть учтены при необходимости. Для нормального асинхронного двигателя в уравнениях (2) нужно положить $u_{rd} = u_{rq} = 0$, а для нормального синхронного генератора без успокоительной обмотки эти уравнения вырождаются в одно по продольной оси для обмотки возбуждения.

Если генератор имеет успокоительную обмотку по продольной оси, то оба уравнения будут связывать величины по этой оси: одно для обмотки возбуждения, а другое для успокоительной обмотки. С увеличением числа обмоток на роторе число уравнений (2) соответственно возрастает.

Уравнения (1), (2) означают приведение машины к двум двухобмоточным трансформаторам по осям d и q , связанным между собой через э. д. с. вращения. Эти трансформаторы вращаются вместе с принятой координатной системой, т. е. со скоростью ротора (рис. 1).

Если умножить левую и правую части (1), (2) соответственно на токи i_d, i_q, i_{rd}, i_{rq} и сложить эти части, то получим:

$$p = p_r + \frac{dW_m}{dt} + \omega M, \quad (3)$$

где

p — полная электрическая мощность, подводимая к машине или отдаваемая ею;

p_r — потери в меди обмоток статора и ротора;

$\omega M = \omega (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$ — механическая мощность, подводимая к ротору или отдаваемая через ротор;

$\frac{dW_m}{dt}$ — мощность, затрачиваемая на изменение магнитной энергии в машине.

При этом

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{d\psi_d}{dt} i_d + \frac{d\psi_q}{dt} i_q + \frac{d\psi_{rd}}{dt} i_{rd} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} i_{rq}. \quad (4)$$

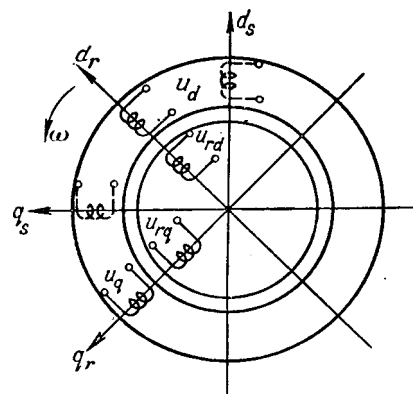


Рис. 1. Приведение трехфазной машины к двухобмоточным трансформаторам.

Уравнение (3) выражает баланс мощностей в электрической машине. Нетрудно показать, что если величина $\frac{dW_m}{dt} = 0$, то в машине отсутствуют переходные электромагнитные процессы. Следовательно, эта величина в общем балансе мощностей (3) определяет степень влияния переходных электромагнитных процессов на работу машины.

Если ввести обобщенные комплексы для потокоцеплений $\bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r$ и токов \bar{i}_s, \bar{i}_r соответственно для статора и ротора, то выражение (4) принимает вид¹:

$$\frac{dW_m}{dt} = \left(\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \bar{i}_s^* + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} \bar{i}_r^* \right)_\partial, \quad (5)$$

где \bar{i}_s^*, \bar{i}_r^* — комплексы, сопряженные с \bar{i}_s, \bar{i}_r .

Магнитная энергия, запасенная в машине,

$$W_m = \frac{1}{2} (\bar{\psi}_s \bar{i}_s^* + \bar{\psi}_r \bar{i}_r^*)_\partial. \quad (6)$$

Продифференцировав (6) и учитывая выражение (5), находим:

$$\frac{dW_m}{dt} = \left(\bar{\psi}_s \frac{d\bar{i}_s^*}{dt} + \bar{\psi}_r \frac{d\bar{i}_r^*}{dt} \right)_\partial. \quad (7)$$

Формула (7) дает значительные удобства при приближенных исследованиях. Выражения (5) и (7) также справедливы, если сопряженными будут взяты не комплексы токов, а комплексы потокоцеплений.

В современной теории машин переменного тока обычно используется операторный метод. Это возможно, если предположить, что скорость вращения постоянна, а токи изменяются по закону показательной функции. Мы будем исходить из того, что векторы токов статора \bar{i}_s и ротора \bar{i}_r вращаются с переменной скоростью, а их амплитуда является также переменной, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_s &= i_{sm} e^{j(\int \omega_s dt + \theta_{s0})}; \\ \bar{i}_r &= i_{rm} e^{j(\int \omega_r dt + \theta_{r0})} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $i_{sm}, i_{rm}, \omega_s, \omega_r$ — переменные величины.

Подставляя (8) в (7) и учитывая, что для симметричной машины $[j\bar{\psi}_s \bar{i}_s^*]_\partial = -[j\bar{\psi}_r \bar{i}_r^*]_\partial$, находим:

$$\begin{aligned} \frac{dW_m}{dt} &= \frac{1}{i_{sm}} \frac{di_{sm}}{dt} [\bar{\psi}_s \bar{i}_s^*]_\partial + \frac{1}{i_{rm}} \frac{di_{rm}}{dt} [\bar{\psi}_r \bar{i}_r^*]_\partial - \\ &- (\omega_s - \omega_r) [j\bar{\psi}_s \bar{i}_s^*]_\partial. \end{aligned} \quad (9)$$

Если амплитуды токов затухают по экспоненте, то

$$\frac{1}{i_{sm}} \frac{di_{sm}}{dt} = -\alpha_s, \quad \frac{1}{i_{rm}} \frac{di_{rm}}{dt} = -\alpha_r,$$

где α_s, α_r — коэффициенты затухания соответственно статора и ротора.

В том случае, когда векторы токов и потокоцеплений направлены по одной оси, например d , или близки к этому (симметричные составляющие при трехфазном коротком замыкании), первые два члена (9) могут быть определены с высокой степенью точности при учете величин только по оси d , ибо тогда имеем:

$$[\bar{\psi}_s \bar{i}_s^*]_\partial = \psi_d i_d + \psi_q i_q \approx \psi_d i_d,$$

так как при малых ψ_q и i_q , произведение $\psi_q i_q$ оказывается величиной второго порядка малости. Вместе с тем, для определения последнего члена (9) требуется достаточно точное знание продольных и поперечных составляющих, так как

$$[j\bar{\psi}_s \bar{i}_s^*]_\partial = \psi_d i_q - \psi_q i_d.$$

В этом и состоит трудность задачи. Однако из выражения (9) видно, что при $\omega_s = \omega_r$, т. е. при одинаковой скорости вращения векторов токов статора и ротора, этот член обращается в нуль. Если же векторы токов вращаются с разной угловой скоростью (например, при учете апериодической составляющей), то последний член в (9) не будет равен нулю. Но для его определения вполне достаточно, чтобы были известны только амплитуды токов и лишь приближенно их начальные фазы, так как векторы токов непрерывно изменяют свое положение друг относительно друга.

Это свойство величины $\frac{dW_m}{dt}$, однако, справедливо только в том случае, когда рассматривается изменение магнитной энергии во всей машине в целом. Но оно нарушается, если рассматривается изменение магнитной энергии отдельно только в статоре или в роторе.

Если машина несимметрична, то, строго говоря, соотношение (9) нарушается. Но в большинстве практических случаев погрешность, связанная с асимметрией, невелика. Следовательно, изложенное свойство величины $\frac{dW_m}{dt}$ будет практически справедливо и для несимметричных машин, т. е. синхронных генераторов с успокоительной обмоткой и без нее.

При глухом трехфазном коротком замыкании на зажимах асинхронного двигателя без учета потерь в меди и отсутствии нагрузки на валу из уравнения динамики и формулы (3) находим:

$$W_{m1} - W_{m0} \approx J \frac{\omega_0^2 - \omega_1^2}{2}.$$

Изменение магнитной энергии машины равно изменению ее кинетической энергии.

Рассмотрим применение полученных выше соотношений.

Определение момента синхронной машины при глухом трехфазном замыкании. В этом случае в формуле (3) нужно положить $p = i_{f1}$.

¹ Индекс ∂ указывает на действительную часть.

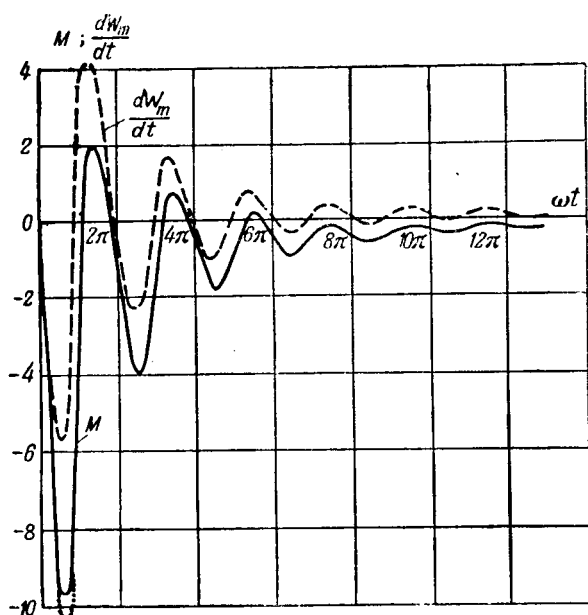


Рис. 2. Кривые изменения момента M и $\frac{dW_m}{dt}$ при глухом трехфазном коротком замыкании на холостом ходу при $E_0 = 1$ синхронного генератора W 999, 28,2 кВа; 220/380 в; 74,3/43 а; 1500 об/мин.
.... — влияние изменения скорости на M_{\max} при $\Delta n = -10\%$.

Следовательно,

$$M = -\frac{1}{\omega} \left(\frac{dW_m}{dt} + p_r - u_f i_f \right). \quad (10)$$

Выше было сказано, что $\frac{dW_m}{dt}$, а также потери в меди практически определяются полной величиной токов в статоре и роторе. В то же время токи короткого замыкания по величине могут быть достаточно рассчитаны по простым формулам, полученным при допущении, что векторы симметричных составляющих направлены по продольной оси [Л. 1, 2].

Используя эти формулы, а также выражение (4), находим для генератора без успокоительной обмотки величину $\frac{dW_m}{dt}$, полагая, что постоянные времени T'_d , T_a в радианах относительно большие (приложение):

$$\frac{dW_m}{dt} \approx \omega E_0^2 e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \beta_\omega \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] - \omega \frac{E_0}{2} e^{-\frac{2t}{T_a}} \sin 2\beta_\omega \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_q} \right). \quad (11)$$

Средние потери в меди p_r с учетом потерь от переменных токов, вызванных в роторе апериодической составляющей тока статора, могут быть рассчитаны по методике, предложенной Р. А. Лютером [Л. 2].

Для генератора с успокоительной обмоткой тем же путем и при тех же упрощениях находим:

$$\frac{dW_m}{dt} \approx \omega E_0^2 e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \beta_\omega \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] - \omega \frac{E_0}{2} e^{-\frac{2t}{T_a}} \sin 2\beta_\omega \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right). \quad (12)$$

Из формул (10)...(12) следует, что при резком снижении скорости вращения генератора влияние потерь в меди возрастает, что приводит к дополнительному увеличению тормозного момента.

В том случае, когда угловая скорость вращения генератора постоянна и равна синхронной ω_c , т. е. $\omega = \omega_c = 1$, а также, если сделать упрощение для больших значений T''_d , T'_d , T_a , то формулы для моментов совпадают с соответствующими формулами, полученными Р. А. Лютером другим путем [Л. 2]. При синхронной скорости вращения уточнение, даваемое в статье, будет существенным только для машин малой мощности, имеющих небольшие постоянные времена.

На рис. 2 показана кривая момента при глухом трехфазном коротком замыкании на холостом ходу при $E_0 = 1$ синхронного генератора W999, 28,2 кВа; 220/380 в; 74/43 а; 1500 об/мин. Здесь учтены мгновенные значения потерь в меди. Тормозной момент нарастает очень быстро, достигая почти десятикратного значения. Это приводит к резкому торможению генератора, что, в свою очередь, вызывает дополнительное увеличение максимального значения момента в соответствии с формулой (10), показанное на рис. 2.

Работа асинхронного двигателя при переменной скорости вращения. Уравнения равновесия напряжений двигателя в символической форме в осях, вращающихся с синхронной скоростью, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \bar{i}_s r_s + j \bar{\psi}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt}; \\ 0 &= \bar{i}_r r_r + j s \bar{\psi}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где \bar{i}_s , $\bar{\psi}_s$ — комплексы токов и потокосцеплений статора;
 \bar{i}_r , $\bar{\psi}_r$ — то же ротора;
 r_s , r_r — активные сопротивления статора и ротора.

Известно, что решение (13) при $s = \text{var}$ возможно в квадратурах при допущении, что $r_s = 0$ [Л. 3]. Однако даже в этом случае результат выражается через специальные функции и в конечном счете при линейной зависимости скольжения от времени при помощи рядов, которые не всегда быстро сходятся. Графо-

аналитический метод, изложенный в [Л. 4], обладает присущими ему недостатками. В этом и состоит трудность решения важной для практики задачи.

С целью использования энергетических соотношений представим токи статора и ротора в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_s &= \bar{i}_{se} + \bar{i}_{sv}; \\ \bar{i}_r &= \bar{i}_{re} + \bar{i}_{rv}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где \bar{i}_{se} , \bar{i}_{re} — комплексы токов статора и ротора, близкие, а при малой скорости изменения s равные значениям токов \bar{i}_{sy} , \bar{i}_{ry} в статическом режиме;

\bar{i}_{sv} , \bar{i}_{rv} — комплексы уравнивающих переходных токов статора и ротора.

Если принять, как обычно, линейную зависимость между токами и потокоцеплениями, то будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\psi}_s &= \bar{\psi}_{se} + \bar{\psi}_{sv}; \\ \bar{\psi}_r &= \bar{\psi}_{re} + \bar{\psi}_{rv}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Изменение магнитной энергии, связанное с изменением потокоцеплений $\frac{d\bar{\psi}_{se}}{dt}$, $\frac{d\bar{\psi}_{re}}{dt}$, в нормальных условиях невелико. Это определяет возможность разделения уравнений (13) с учетом (14), (15) на следующие четыре уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \bar{i}_{se} r_s + j \bar{\psi}_{se} + \frac{d\bar{\psi}_{se}}{dt}; \\ \bar{i}_{re} r_r + j \bar{\psi}_{re} + \frac{d\bar{\psi}_{re}}{dt} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_{sv} r_s + j \bar{\psi}_{sv} + \frac{d\bar{\psi}_{sv}}{dt} &= 0; \\ \bar{i}_{rv} r_r + j \bar{\psi}_{rv} + \frac{d\bar{\psi}_{rv}}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Решение системы (17) без свободного члена приводит к выражениям в форме элементарных функций. Решение (16) осуществляется на базе энергетического баланса путем последовательного уточнения влияния изменения магнитной энергии на токи двигателя. Определив токи и потокоцепления, находим рекуррентные формулы для момента вращения и запаса магнитной энергии, по которым рассчитывается работа асинхронного двигателя при переменной скорости вращения (приложение):

$$M_n = M_e + e^{-\alpha(t)} [\cos \beta_r (M_{n-1} - M_e) - \sin \beta_r (W_{n-1} - W_e)] - i_{sn}^2 r_s; \quad (18)$$

$$W_n = W_e + e^{-\alpha(t)} [\cos \beta_r (W_{n-1} - W_e) + \sin \beta_r (M_{n-1} - M_e)], \quad (19)$$

где M_n , W_n , i_{sn} — момент вращения, запас магнитной энергии и ток статора двигателя для n -го диапазона изменения s ;

$$M_e = \frac{M_y}{1 + \epsilon}; \quad (20)$$

$$\epsilon \approx \frac{M_y}{u^2} \frac{ds}{dt} \frac{(x_1 + c_1 x_2')}{\omega} \left(\frac{c_1}{s} + \frac{r_s}{r_r} \right); \quad (21)$$

M_y — момент вращения двигателя в установившемся режиме;

$$\beta_r \approx \beta + \alpha'_r \alpha'_s (t - \beta);$$

$$\beta = \int s dt;$$

$$\alpha(t) \approx \alpha'_r t + \alpha'_s s \beta.$$

Для обычных асинхронных двигателей в нормальных условиях скорость изменения скольжения $\frac{ds}{dt}$ мала, поэтому согласно (21) $\epsilon \approx 0$.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} M_e &\approx M_y; \\ W_e &\approx W_y \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

т. е. момент вращения и запас магнитной энергии в статоре определяются по статическим характеристикам. Соответствующее упрощение получают формулы (18) и (19).

Расчет по формулам (18) и (19), в особенности если пренебречь потерями в меди статора и принять соотношение (22), по сложности мало отличается от расчета работы двигателя по статическим механическим характеристикам.

С целью проверки формул (18) и (19) на рис. 3 показаны кривые момента при торможении с постоянным ускорением $2a = \frac{1}{48\pi}$ асинхронного двигателя, имеющего параметры: $x_s = x_r = 3,07$; $x_m = 2,99$; $r_s = r_r = 0,01$. Там же показана пунктирная кривая, полученная для этого случая на интеграторе [Л. 6]. В табл. 1

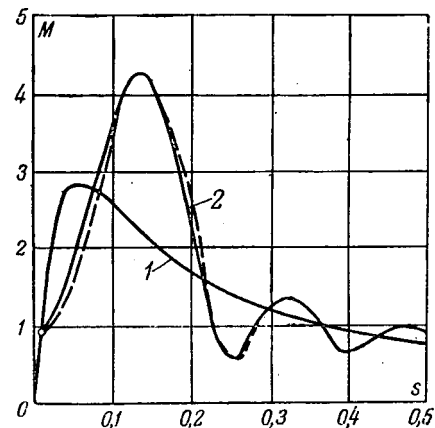


Рис. 3. Кривые момента асинхронного двигателя при торможении с постоянным ускорением $2a = \frac{1}{48\pi}$.

1 — статическая характеристика; 2 — характеристика с учетом электромагнитных переходных процессов.

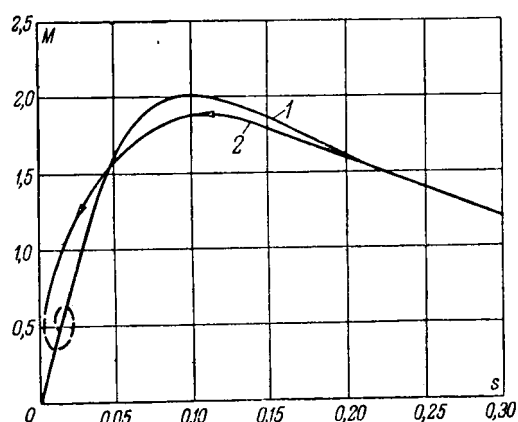


Рис. 4. Моменты вращения асинхронного двигателя А92-4 при разгоне с ускорением $2a = -1 \frac{1}{сек^2}$.

1 — статическая характеристика; 2 — характеристика с учетом влияния изменения скорости вращения.

приведены расчетные данные для этого примера. Совпадение кривых при учете активного сопротивления статора, а также величин M_e , W_e вместо M_y , W_y получается хорошим.

На рис. 4 приведена кривая вращающего момента асинхронного двигателя А92-4, 100 кВт, 1460 об/мин при разгоне за время $t = 2,6 T_m = 1 сек$ с ускорением $2a = -1 \frac{1}{сек^2}$. Такое ускорение часто может иметь место на практике. В табл. 2 приведены числовые данные для этого примера. Как видно из этого рисунка, влия-

Таблица 1

s	ε	M_y	M_e	M_n	W_y	W_e	W_n
0,01	—	0,90	0,90	0,90	0,478	0,478	0,478
0,03	0,084	2,22	2,05	1,15	1,39	1,56	0,56
0,05	0,065	2,75	2,58	1,74	2,52	2,56	0,77
0,10	0,033	2,56	2,48	3,54	4,43	4,39	2,08
0,15	0,020	2,05	2,02	4,12	5,26	5,21	4,67
0,20	0,014	1,65	1,63	2,33	5,61	5,61	6,87
0,30	0,007	1,18	1,18	1,38	6,00	6,00	5,73
0,40	0,005	0,90	0,90	0,61	6,03	6,08	5,97

Таблица 2

s	$M_e \sim M_y$	M_n	$W_e \sim W_y$	W_n
0,40	0,94	0,93	2,77	2,76
0,30	1,20	1,19	2,67	2,68
0,20	1,60	1,62	2,37	2,39
0,10	2,00	1,87	1,64	1,64
0,05	1,60	1,58	0,86	1,16
0,027	1,00	1,24	0,52	0,96
0,013	0,51	0,93	0,39	0,84
0,006	0,24	0,79	0,36	0,78

ние изменения скорости двигателя на его характеристику существенно в районе s_{max} и рабочей части характеристики.

Тем же путем, но с учетом аperiodических составляющих токов и потокоцеплений находятся формулы для расчета режима глухого трехфазного короткого замыкания на зажимах асинхронного двигателя.

Заключение. Применение энергетических соотношений для исследования электрических машин переменного тока позволяет определить сравнительно просто и с необходимой точностью моменты при переходных режимах и переменной скорости вращения путем использования приближенных выражений для токов, в частности реактивных токов при коротких замыканиях. Это расширяет возможности для решения ряда задач, важных для практики.

Соотношения (18) и (19) позволяют достаточно просто рассчитать работу асинхронного двигателя при переменной скорости вращения с учетом электромеханических переходных процессов. Учет этих процессов необходим для многих практических случаев.

Применение описанной методики для исследования колебаний синхронных машин и других сложных процессов в машинах, не рассмотренных здесь, приводит к существенным для практики результатам.

Приложение I. Токи статора i_d , i_q и в обмотке возбуждения i_f при глухом трехфазном коротком замыкании для генератора без успокоительной обмотки приближенно могут быть выражены формулами [Л. 1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} i_d &\approx E_0 \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] - \\ &\quad - \frac{E_0}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \beta_\omega; \\ i_q &\approx \frac{E_0}{x_q} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \beta_\omega; \\ i_f &\approx i_{f0} + i_{f0} \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \beta_\omega \right), \end{aligned} \right\} \quad (I,1)$$

где $\beta_\omega = \int \omega dt$;

E_0 — э. д. с. холостого хода.

Потокоцепления статора ϕ_d , ϕ_q и ротора ϕ_f будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \phi_d &= -E_0 e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \beta_\omega; \\ \phi_q &= E_0 e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \beta_\omega; \\ \phi_f &= E_0 x_{af} \left[\frac{1 - e^{-\frac{t}{T'_d}}}{x_d} - \frac{1}{x_d - x'_d} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (I,2)$$

Находим изменение магнитной энергии $\frac{dW_m}{dt}$ по формуле (4) с учетом (1,2):

$$\begin{aligned} \frac{dW_m}{dt} \approx E_0 e^{-\frac{t}{T_a}} & \left[\left(\omega \sin \beta_\omega + \frac{\cos \beta_\omega}{T_a} \right) i_d + \right. \\ & \left. + \left(\omega \cos \beta_\omega - \frac{\sin \beta_\omega}{T_a} \right) i_q \right] - \\ - \frac{E_0^2 e^{-\frac{t}{T_d}}}{T_d' x_d} & \left[1 + \frac{x_d - x_d'}{x_d'} \left(e^{-\frac{t}{T_d'}} - e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \beta_\omega \right) \right]. \end{aligned} \quad (I,3)$$

Постоянные времени T_d' , T_a выражаются в радианах и для нормальных машин исчисляются сотнями или десятками единиц. Поэтому членами, содержащими в знаменателе постоянные T_d' , T_a для простоты пренебрегаем. После подстановки в (I,2) токов из (I,1) получаем для $\frac{dW_m}{dt}$ формулу (II,1).

II. Потокосцепления статора $\bar{\psi}_{sv}$ и ротора $\bar{\psi}_{rv}$ равны:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\psi}_{sv} &= x_s \bar{i}_{sv} + x_m \bar{i}_{rv}; \\ \bar{\psi}_{rv} &= x_r \bar{i}_{rv} + x_m \bar{i}_{sv}, \end{aligned} \right\} \quad (II,1)$$

где x_s , x_r — полные индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора;

x_m — индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Из уравнений (I,7), (II,1), (II,7), находим:

$$\frac{d\bar{i}_{sv}}{dt} = - \frac{\alpha_s' \alpha_r + j \alpha_s' s + j (\alpha_r' + j s)}{j \alpha_s' \alpha_r - \alpha_s' s + \alpha_s' + j} \bar{i}_{sv}, \quad (II,2)$$

где α_s' , α_r' , α_r — коэффициенты затухания статора и ротора.

Так как $\alpha_s' \alpha_r \approx 0$, то выражение (II,2) может быть представлено в виде:

$$\frac{d\bar{i}_{sv}}{dt} \approx -j \frac{j + \alpha_s'}{j + \alpha_s' (1-s)} \bar{i}_{sv} - \frac{\alpha_r'}{1 - j \alpha_s' (1-s)} \bar{i}_{sv}.$$

Учитывая относительно малое влияние члена $\alpha_s' (1-s)$ и пренебрегая величинами второго порядка малости, находим после интегрирования выражение, приближенно учитывающее влияние активного сопротивления статора:

$$\bar{i}_{sv} \approx C e^{-j\beta_r} e^{-\alpha(t)}, \quad (II,3)$$

где $\beta_r = \beta + \alpha_r' \alpha_s' (t - \beta)$;

$$\beta = \int s dt;$$

$$\alpha(t) = \alpha_r' t + \alpha_s' s \beta.$$

Подставляя (II,3) в (I,4), находим:

$$\bar{i}_s = \bar{i}_{se} + C e^{-j\beta_r} e^{-\alpha(t)}. \quad (II,4)$$

При $t = 0$, $\beta_r = 0$, $\alpha(t) = 0$. Из (II,4) находим:

$$C = \bar{i}_{sy0} - \bar{i}_{se}.$$

Следовательно,

$$\bar{i}_s = \bar{i}_{se} + (\bar{i}_{sy0} - \bar{i}_{se}) e^{-j\beta_r} e^{-\alpha(t)}. \quad (II,5)$$

Выражение (II,5) удовлетворяет исходным дифференциальным уравнениям тем точнее, чем меньше $\frac{d\bar{i}_{se}}{ds} \frac{ds}{dt}$. Поэтому на рабочей части характеристики и при относительно больших величинах $\frac{ds}{dt}$ формула (II,5) дает достаточно точные результаты, если рассматриваются относительно небольшие диапазоны изменения скольже-

ния s . По этой причине формулу (II,5) преобразуем в следующую рекуррентную формулу:

$$\bar{i}_{sn} = \bar{i}_{se} + (\bar{i}_{sn-1} - \bar{i}_{se}) e^{-j\beta_r} e^{-\alpha(t)}, \quad (II,6)$$

где \bar{i}_{sn} , \bar{i}_{sn-1} — комплексы токов статора для n -го и $(n-1)$ -го диапазонов изменения скольжения s .

При этом \bar{i}_{se} находится для данного скольжения, а отсчет β_r и $\alpha(t)$ повторяется каждый раз. Формула (II,6) при среднем значении $\beta_r \approx \beta$, $\alpha(t) \approx \alpha_r' \Delta t$ и $\bar{i}_{se} \approx \bar{i}_{sy}$ совпадает с подобной формулой, полученной другим путем в [Л. 4].

Комплекс потокосцепления статора $\bar{\psi}_s$ при приближенном учете активного сопротивления статора равен:

$$\bar{\psi}_s \approx \frac{\bar{u}}{j} + j \bar{i}_s r_s. \quad (II,7)$$

Момент M_n и магнитная энергия статора W_n определяются формулами

$$\left. \begin{aligned} M_n &= [j \bar{\psi}_{sn} \bar{i}_{sn}^*]_{\partial}; \\ W_n &= [\bar{\psi}_{sn} \bar{i}_{sn}^*]_{\partial}. \end{aligned} \right\} \quad (II,8)$$

Подставляя (II,6) и (II,7) в (II,8), получаем формулы (18) и (19).

Для определения \bar{i}_{se} , M_e , W_e исходим из уравнений (16), используя (3). Ввиду малости $\frac{dW_e}{dt}$ принимаем в первом приближении, что ток и потокосцепления изменяются по статическим характеристикам. Если упростить эквивалентную схему асинхронного двигателя путем выноса контура намагничивания, то получаем:

$$\frac{dW_e}{dt} \approx M_y \epsilon,$$

где

$$\epsilon \approx \frac{M_y}{u^2} \frac{ds}{dt} \frac{x_1 + c_1 x_2'}{\omega} \left(\frac{c_1}{s} + \frac{r_s}{r_r} \right).$$

Последовательное уточнение влияния изменения магнитной энергии на токи двигателя и повторные расчеты энергетических соотношений по формуле (3) приводят к формуле для момента вращения:

$$M_e = M_y (1 - \epsilon + \epsilon^2 - \epsilon^3 + \dots). \quad (II,9)$$

Члены, заключенные в скобки, представляют собой ряд геометрической прогрессии, что приводит к формуле (20).

Магнитная энергия, запасенная в статоре:

$$W_e \approx \frac{u^2}{c_1 x_m} + \frac{u^2 \sqrt{x_\partial^2 + \epsilon (r_\partial^2 + x_\partial^2)}}{c_1 (1 + \epsilon) (r_\partial^2 + x_\partial^2)},$$

где

$$r_\partial = r_s + c_1 \frac{r_r}{s}; \quad x_\partial = x_1 + c_1 x_2'.$$

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины (специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.
2. Р. А. Лютер. Расчет моментов вращения асинхронных машин при коротких замыканиях. Сборник «Электросила», № 7, 1950.
3. Е. Я. Казовский. Переходные процессы в асинхронных машинах при включении и набросе нагрузки. ВЭП, № 2, 1949.
4. В. А. Шубенко и И. С. Пинчук. Графический метод расчета переходных процессов асинхронного двигателя. Электричество, № 2, 1950.
5. А. В. Иванов-Смоленский. Влияние скорости изменения скольжения на момент асинхронной машины. Электричество, № 6, 1950.
6. F. I. Maginnis, N. R. Shoulz. Характеристики асинхронных двигателей. Tr. AIEE, т. 63, стр. 641, 1944.

[26.4.1956]

Об измерении сопротивлений заземления

Инж. А. Б. ОСЛОН

г. Златоуст

Для измерения сопротивлений заземления применяется трехэлектродная схема, в которой участвуют: испытуемый заземлитель (контур); токовый электрод; потенциальный электрод. Все величины, относящиеся к заземлителю, будем обозначать индексом K , к токовому электроду — T , к потенциальному электроду — $П$.

Через испытуемый заземлитель и токовый электрод пропускается ток. При помощи потенциального электрода измеряется потенциал контура. Измеренное сопротивление равно частному от деления измеренного потенциала на пропускаемый ток.

На схеме рис. 1 в виде вольтметра и амперметра изображены органы измерения напряжения и тока прибора любой конструкции, предназначенного для измерения сопротивления заземления.

Обычно считают, что токовый электрод должен быть расположен на таком расстоянии от испытуемого заземлителя, чтобы он не искажал поле последнего и чтобы между ними оставалась достаточная зона нулевого потенциала. Потенциальный электрод должен обязательно помещаться в зоне нулевого потенциала [Л. 2].

Пусть нам заранее известно сопротивление заземления контура R_K . Можно ли, расположив токовый электрод произвольным образом, поместить потенциальный электрод в такое место, чтобы измеренное сопротивление было равно R_K . Если это возможно, то чем определяется «геометрическое место точных измерений»?

Для ответа на этот вопрос воспользуемся электростатической аналогией поля тока в проводящей среде.

Составим уравнение Максвелла с потенциальными коэффициентами для трех электродов схемы:

$$\varphi_K = \alpha_{KK} I_K + \alpha_{KT} I_T + \alpha_{KP} I_P,$$

$$\varphi_T = \alpha_{TK} I_K + \alpha_{TT} I_T + \alpha_{TP} I_P,$$

$$\varphi_P = \alpha_{PK} I_K + \alpha_{PT} I_T + \alpha_{PP} I_P.$$

За положительное направление тока принимаем направление от электродов в землю.

Пренебрегая током органа измерения напряжения, имеем: $I_P = 0$, $I_T = -I_K$.

Измеренное сопротивление

$$R_{изм} = \left| \frac{\varphi_K - \varphi_P}{I_T} \right|.$$

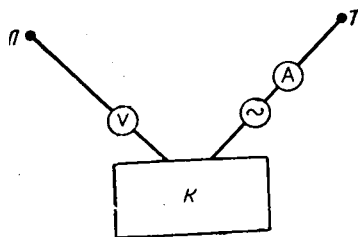


Рис. 1.

Учитывая, что $\alpha_{12} = \alpha_{21}$,

$$R_{изм} = \alpha_{KK} + \alpha_{TP} - \alpha_{KT} - \alpha_{KP}. \quad (1)$$

Действительное сопротивление заземления $R_K = \alpha_{KK}$.

Значит, чтобы $R_{изм} = R_K$, необходимо выполнить условие:

$$\alpha_{TP} = \alpha_{KT} + \alpha_{KP}. \quad (2)$$

Выражение (2) является ответом на поставленный вопрос. Из него можно сделать выводы:

1. Теоретически возможно точное измерение сопротивлений заземления при расположении измерительных электродов как угодно близко к испытуемому заземлителю.

2. При однажды установленных измерительных электродах результат измерения не зависит от того, какой из них является токовым и какой потенциальным.

Из первого вывода следует, что измерение может быть точным и в том случае, когда токовый электрод искажает поле испытуемого заземлителя, а из второго, что потенциальный электрод не обязательно должен помещаться в зоне нулевого потенциала.

Докажем применимость второго вывода для любых измерений по трехэлектродной схеме, которая применяется при снятии кривой распределения потенциалов на территории, измерении сопротивлений заземления металлических опор, связанных с грозозащитным тросом, при отсоединении заземляющего контура от опоры у ее фундамента и т. п. Для этого представим схему измерения в виде пассивного четырехполюсника, все элементы которого линейны во всем диапазоне измеряемых токов. Зажимы $1'$ и $2'$ (рис. 2) изображают испытуемый заземлитель, зажим 1 — токовый электрод, зажим 2 — потенциальный электрод. Как известно, для такого четырехполюсника

$$U_1 = AU_2 + BI_2, \quad I_1 = CU_2 + DI_2.$$

Принимая ток вольтметра $I_2 = 0$, получим

$$R_{изм} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{1}{C}.$$

Делаем токовый электрод потенциальным, а потенциальный — токовым (рис. 3). Получаем:

$$U_2 = DU_1 + BI_1, \quad I_2 = CU_1 + AI_1.$$

Теперь $I_1 = 0$,

$$R'_{изм} = \frac{U_1}{I_2} = \frac{1}{C}.$$

Равенство $R_{изм} = R'_{изм}$ является наиболее общим доказательством второго вывода.

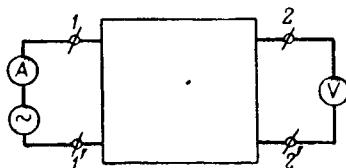


Рис. 2.

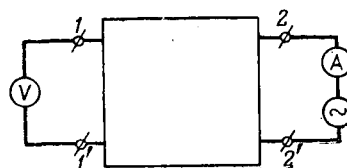


Рис. 3.

Ниже приводятся примеры расположения измерительных электродов в соответствии с условием (2). В этих примерах грунт принимается однородным с удельным сопротивлением ρ .

Сосредоточенный заземлитель. Сосредоточенным будем называть такой заземлитель, на небольшом расстоянии (порядка нескольких метров) от которого поле является радиально-сферическим. На таком расстоянии [Л. 1]

$$\alpha_{KI} = \frac{\rho}{2\pi r_{KI}},$$

где r_{KI} — расстояние (индекс I означает любой измерительный электрод).

Так как измерительные электроды являются сосредоточенными заземлителями, то всегда

$$\alpha_{KP} = \frac{\rho}{2\pi r_{KP}}.$$

Из этих выражений и условия (2) следует, что для точного измерения сопротивления заземления необходимо, чтобы

$$\frac{1}{r_{TP}} = \frac{1}{r_{KT}} + \frac{1}{r_{KP}}, \quad (3)$$

или

$$r_{TP} = \frac{r_{KT} r_{KP}}{r_{KT} + r_{KP}}.$$

На практике желательно, чтобы суммарная длина измерительных проводов $r_{KT} + r_{KP}$ была минимальной, что достигается при $r_{KT} = r_{KP}$.

Если почему-либо будет признано, что r_{KT} не должно быть меньше определенной величины, то такое же требование должно быть предъявлено и к r_{KP} , так как требования к расположению обоих электродов одинаковы. В этом случае

$$r_{TP} = \frac{r_{KI}}{2}. \quad (4)$$

Взаимное расположение электродов указано на схеме (рис. 4).

Лучевой заземлитель. Эквипотенциальные линии лучевого заземлителя на поверхности почвы представляют собой эллипсы, причем

$$\varphi = \frac{I\rho}{4\pi c} \ln \frac{a+c}{a-c}.$$

Здесь a — большая полуось эллипса, а $2c$ — фокусное расстояние, равное длине заземлителя l ; вместо 8π взято 4π , так как земля представляет собой полупространство.

Отсюда $\alpha_{KI} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2a+l}{2a-l}$, где $2a$ — сумма расстояний от измерительного электрода до концов лучевого заземлителя.

Расстояние r_{KI} будем отмерять от середины испытуемого заземлителя.

При $r_{KT} = r_{KP}$ (рис. 5)

$$\alpha_{KI} = \frac{\alpha_{TP}}{2} = \frac{\rho}{4\pi r_{TP}} = \frac{\rho}{8\pi x} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2a+l}{2a-l},$$

где x и y — координаты измерительного электрода в первом квадранте.

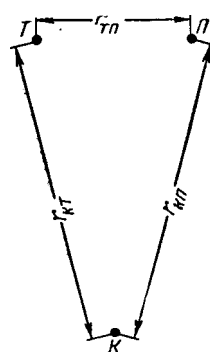


Рис. 4. Рекомендуемое расположение измерительных электродов при испытании сосредоточенного заземлителя

$$r_{TP} = \frac{r_{KP}}{2} = \frac{r_{KT}}{2}.$$

Отсюда

$$x = \frac{l}{4 \ln \frac{2a+l}{2a-l}}.$$

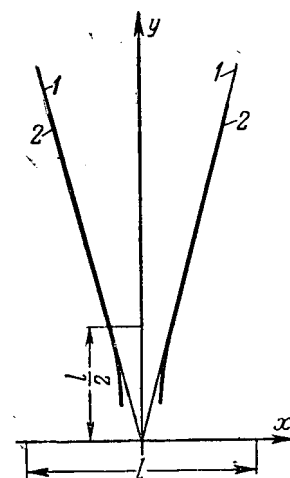


Рис. 5. Измерение сопротивления лучевого заземления.

1 — линии, на которых при симметричном расположении электродов соблюдается условие (4). Для них $x' = y'/\sqrt{5}$; 2 — линии точных измерений (колонки 3 и 4 таблицы).

Найдем зависимость между координатами x и y , обеспечивающую точные измерения. Из уравнения эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

получим:

$$y = \sqrt{\frac{b(a^2 - x^2)}{a^2}}.$$

Таким образом, получено однозначное решение для случая симметричного расположения измерительных электродов относительно оси y .

В первых шести колонках таблицы приведены результаты расчета. При этом за исходную величину взята малая полуось эллипса b .

b	a	x'	y	$\frac{\alpha_{TP}}{\rho}$	$\frac{\alpha_{KI}}{\rho}$	x'	$\frac{\alpha_{TP}}{\rho}$	$\Delta R'_K, \%$
2,5	10,6	1,41	2,47	0,0564	0,0282	0,63	0,126	77,4
5	11,2	1,73	4,94	0,0460	0,0230	1,27	0,0625	18,3
10	14,1	2,8	9,8	0,0284	0,0142	2,53	0,0315	3,44
20	22,4	5,2	19,4	0,0154	0,0077	5,0	0,0158	0,45
30	31,6	7,6	29	0,0104	0,0052	7,47	0,0106	0,22

Все расстояния в таблице даны в метрах.

Отношение $\frac{\alpha}{\rho}$ подчеркивает, что результат не зависит от качества грунта (ρ измеряется в омах).

Примем длину электрода $l = 20$ м, диаметр заземлителя $d = 1$ см, глубину заложения $t = 50$ см.

Как известно [Л. 2], для лучевого заземлителя

$$R_K = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt}.$$

В нашем случае $R_K = 0,09 \rho$.

Из таблицы видно, что если принять значения x такими, как в третьей колонке, то при значениях y из четвертой колонки $\alpha_{ПТ} = 2\alpha_{КИ}$, а $\Delta R_K = 0$.

В трех последних колонках приведен расчет погрешности измерений при расположении электродов в соответствии с равенством (4), т. е. на линиях I (рис. 5). Значения y' приняты равными значениям y , при этом практически $\alpha'_{КИ} = \alpha_{КИ}$.

Из таблицы видно, что при расположении электродов в соответствии с равенством (4) расстояния $\frac{l}{2}$ от середины лучевого заземлителя до измерительных электродов достаточно для измерений с точностью до 5%.

Контур, состоящий из прямолинейных горизонтальных участков (многоугольник, звезда и т. п.). Каждый прямолинейный участок i создает в месте расположения измерительного электрода потенциал

$$\varphi_i = \frac{I_i \rho}{2\pi l_i} \ln \frac{2a_i + l_i}{2a_i - l_i}.$$

Здесь $2a_i$ — сумма расстояний от измерительного электрода до концов участка i ;
 l_i — длина участка i ;
 I_i — ток, стекающий с него в землю.

Потенциал, создаваемый в месте расположения измерительного электрода контуром, в целом:

$$\varphi_{КИ} = \sum \varphi_i = \frac{\rho}{2\pi} \sum \frac{I_i}{l_i} \ln \frac{2a_i + l_i}{2a_i - l_i}.$$

Примем отношение $\frac{I_i}{l_i} = \frac{I_K}{L}$, где $L = \sum l_i$.

Тогда

$$\alpha_{КИ} = \frac{\varphi_{КИ}}{I_K} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \prod_i \frac{2a_i + l_i}{2a_i - l_i},$$

где Π — знак произведения.

На примере прямоугольного контура убедимся, что при правильно выбранном расстоянии от контура расположение электродов согласно равенству (4) обеспечивает достаточно точное измерение. Расстояние будем отмерять от центра тяжести контура.

На рис. 6 изображены прямоугольный контур заземления, а также два варианта размещения

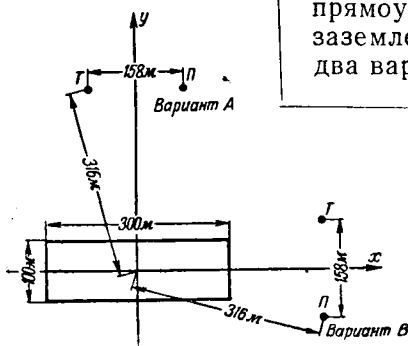


Рис. 6. Измерение сопротивления заземления прямоугольного контура.

измерительных электродов. Как известно [Л. 3], для такого контура

$$R_K = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{8L^2}{\pi b t},$$

где L — периметр контура;

b — ширина заземляющей полосы;

t — глубина заложения.

В нашем случае $L = 800$ м, $b = 50$ мм, $t = 50$ см. При этих параметрах $R_K = 3,58 \cdot 10^{-3}$ р.

На основании приведенных выше формул получаем:

	$\frac{\alpha_{КИ}}{\rho}$	$\frac{\alpha_{ТП}}{\rho}$	$\Delta R_K, \%$
Вариант А	$0,50 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	1,7
Вариант В	$0,574 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	2,5

Путем применения дополнительных внутренних полос, вертикальных заземлителей и т. п. сопротивление заземления может быть снижено, однако оно не может стать меньше сопротивления полусферы с диаметром, равным диагонали контура $D = 316$ м, для которой

$$R_K = \frac{\rho}{\pi D} = 10^{-3} \text{ р.}$$

В этом крайнем случае при варианте В погрешность достигает $8,8\%$. Обычно удовлетворяются погрешностью 10% .

В существующей литературе [Л. 2, 4] для измерения сопротивления заземления крупных объектов рекомендуется брать

$$r_{КП} \geq 5D, \quad r_{ТП} = 40 \text{ м}, \quad r_{КТ} \geq (5D + 40) \text{ м}.$$

Эти рекомендации приводят к чрезвычайно большим ошибкам. Действительно, в нашем случае будем иметь:

$$r_{КП} = 1580 \text{ м}, \quad \alpha_{КП} = \frac{\rho}{2\pi r_{КП}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ р.},$$

$$r_{ТП} = 40 \text{ м}, \quad \alpha_{ТП} = \frac{\rho}{2\pi r_{ТП}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ р.},$$

$$r_{КТ} = 1620 \text{ м}, \quad \alpha_{КТ} = \frac{\rho}{2\pi r_{КТ}} \approx 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ р.},$$

$$\Delta R_K = \alpha_{ТП} - \alpha_{КП} - \alpha_{КТ} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ р.},$$

$$\Delta R_K = \frac{\Delta R_K}{R_K} 100 = \frac{3,8 \cdot 10^{-3} \text{ р.}}{3,58 \cdot 10^{-3} \text{ р.}} \cdot 100 = 106\%,$$

а в крайнем случае при $R_K = 1 \cdot 10^{-3}$ р., $\Delta R_K = 380\%$.

Следовательно, при измерении сопротивления заземления крупных объектов расстояние между измерительными электродами и центром контура должно быть не менее диагонали контура, а расстояние между электродами — не менее половины этой диагонали.

Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1946.
2. А. И. Лурье. Испытание заземляющих устройств электрических установок. Госэнергоиздат, 1950.
3. Л. Н. Баптиданов и В. И. Тарасов. Электрооборудование электрических станций и подстанций. Госэнергоиздат, т. II, 1948.
4. Грозозащита промышленных сооружений и зданий, под редакцией И. С. Стекольников. Издательство Академии наук СССР, 1951.

Выбор напряжения для двигателей средней мощности

М. В. ГРЕЙСУХ

ГПИ „Тяжпромэлектропроект“

Двигатели трехфазного тока в зависимости от скорости вращения изготавливаются на напряжение 3 000 в от мощностей 80 ... 100 кВт, а на напряжение 6 000 в — от мощностей 180 ... 200 кВт и выше.

При напряжении питающей сети 3 и 6 кВ двигатели, начиная с указанных мощностей, естественно было бы выбирать на те же напряжения, чтобы избежать промежуточной трансформации и облегчить питающую сеть.

Однако в практике проектирования часто встречаются случаи, когда напряжение двигателей трехфазного тока средней мощности целесообразно принимать не 3 000 или 6 000 в, а 380 (500) в, что диктуется следующими соображениями:

1. Высоковольтные двигатели средней мощности имеют меньший запас электрической прочности и менее надежны в эксплуатации по сравнению с двигателями низкого напряжения, особенно в тех случаях, когда двигатели устанавливаются в сырых, пыльных и пожароопасных помещениях, а тем более в помещениях с агрессивной или взрывоопасной средой.

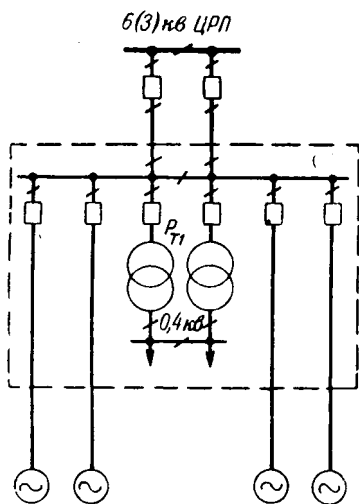


Рис. 1. Схема питания при высоком напряжении двигателей средней мощности.

2. При низком напряжении двигателей средней мощности упрощается схема коммутации подстанции, от которой питаются двигатели, так как в этом случае трансформаторы цеховых подстанций можно питать по радиальным фидерам от коммутационных пунктов или центральной подстанции, так что надобность в сооружении распределительного устройства высокого напряжения отпадает. При напряжении же питающей сети 10 кВ отпадает надобность в промежуточных трансформаторах с первичной обмоткой 10 кВ.

3. Так как размещать высоковольтную пусковую аппаратуру непосредственно в помещениях обычно не представляется возможным, особенно в цехах с ненормальной средой, то для дистанционного управления двигателями из цеха масля-

ные выключатели должны снабжаться соленоидными приводами, для питания которых требуется источник постоянного тока (аккумуляторная батарея, двигатель-генератор, селеновый выпрямитель), либо они должны снабжаться универсальными грузовыми приводами. Низковольтная же пусковая аппаратура, скомпонованная в шкафы, может быть легко размещена непосредственно у двигателей, что значительно упрощает коммутацию и управление двигателями, особенно синхронных. Если же по условиям среды пусковая аппаратура должна быть вынесена из цеха, то дистанционное управление низковольтными двигателями может быть легко осуществлено почти без дополнительных затрат.

4. Стоимость и вес пусковой аппаратуры высокого напряжения по сравнению с низковольтной аппаратурой в 2 ... 3 раза выше, и для ее размещения требуется в 3 ... 4 раза больше площади; поэтому при высоком напряжении двигателей средней мощности пусковую аппаратуру обычно приходится выносить за пределы цеха, что увеличивает протяженность силовых и контрольных сетей.

5. Стоимость и вес трехфазных двигателей на напряжение 3 000 и 6 000 в соответственно на 20 ... 50 % выше, к. п. д. на 1,5 ... 2,5 % ниже, а вес обмоточной меди в среднем на 10 % выше по сравнению с двигателями низкого напряжения.

6. В случае питания от воздушных сетей требуется защита двигателей от перенапряжений.

Наряду с этим при установке низковольтных двигателей средней мощности, как правило, увеличивается установленная мощность питающих трансформаторов и потери в них, а при значительном расстоянии подстанции от места установки двигателей средней мощности также увеличиваются расход цветных металлов и потери в кабельной сети.

Однако если вместо асинхронных двигателей средней мощности применить синхронные двигатели [Л. 1], то за счет повышения коэффициента мощности на шинах 380 (500) в подстанции можно либо вовсе не увеличивать установленную мощность трансформаторов, либо увеличивать ее незначительно.

Кроме того, подстанция, как правило, пристраивается к помещениям, в которых устанавливаются двигатели средней мощности (насосные, компрессорные, воздухоудные и т. п.); поэтому при установке низковольтных двигателей увеличение расхода цветных металлов и потерь в кабелях по сравнению с высоковольтными двигателями незначительно.

Для определения предела мощности, при котором в зависимости от числа двигателей средней мощности, расстояния от подстанции и напряжения питающей сети целесообразно принимать низкое напряжение, рассмотрим чаще всего применяемые при напряжении сети 6 (3) кВ схемы питания:

1. При напряжении сети 6 (3) кВ двигатели средней мощности питаются от шин 6 (3) кВ, а остальные потребители — от шин низкого напряжения ближайшей подстанции, на которой установлены два трансформатора 6 (3)/0,4 кВ, каждый мощностью P_{T1} [кВА] (рис. 1).

2. Все двигатели питаются от шин низкого напряжения ближайшей подстанции, на которой устанавливаются два трансформатора 6 (3)/0,4 кВ, каждый мощностью P_{T2} [кВА], питающиеся ра-

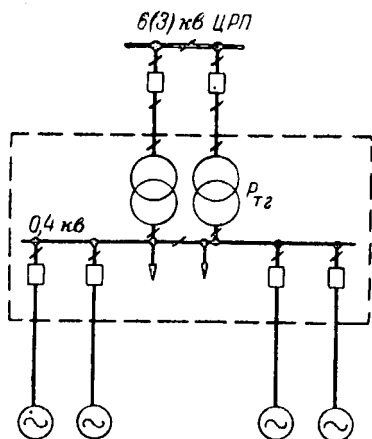


Рис. 2. Схема питания при низковольтных двигателях.

диальными фидерами от шин высокого напряжения коммутационного пункта или центральной подстанции, так что надобность в сооружении распределительного устройства высокого напряжения при цеховой подстанции отпадает (рис. 2).

Для решения поставленной задачи необходимо определить капитальные затраты и потери мощности при разных схемах питания.

Капитальные затраты. Электродвигатели. Стоимость трехфазных двигателей мощностью 100...500 кВт в зависимости от величины установленной мощности двигателей P_d [кВт] может быть ориентировочно выражена прямолинейной зависимостью:

$$d_d = a_d + b_d P_d, \quad (1)$$

где a_d и b_d — постоянные коэффициенты, зависящие от напряжения, скорости вращения и типа двигателей;

P_d — установленная мощность одного двигателя, кВт.

Стоимость двигателей взята в ценах 1952 г., а стоимость монтажа — в ценах 1950 г., накладные расходы приняты равными 4,25%, а стоимость транспорта — 350 руб. за 1 т груза.

Для сравнения стоимостей асинхронных и синхронных двигателей при одинаковых условиях стоимость синхронных двигателей с опережающим $\cos \varphi = 0,8$ отнесена к мощности при $\cos \varphi = 1$, а к стоимости асинхронных двигателей прибавлена стоимость статических конденсаторов, которые необходимо установить для повышения коэффициента мощности этих двигателей до 1.

При средних значениях к. п. д., равного 0,9, $\cos \varphi = 0,85$ и средней стоимости установки ста-

тических конденсаторов около 90 руб. за 1 квар, стоимость компенсирующей установки, требующейся для повышения коэффициента мощности одного асинхронного двигателя до 1, ориентировочно равна (в тыс. руб.):

$$d_{к.у} \approx 0,06 P_d. \quad (2)$$

На рис. 3 и 4 приведены графики изменения стоимости асинхронных двигателей типа ДАМСО и синхронных двигателей для разных напряжений при скоростях вращения 1000 и 750 об/мин.

Из графиков видно, что стоимость синхронных двигателей средней мощности на напряжение 380 в при $\cos \varphi = 1$ почти одинакова со стоимостью асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на напряжение 6000 в (кривые 1, 9 рис. 3 и 1, 5 рис. 4).

Если учесть стоимость статических конденсаторов, требующихся для повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей до 1, то при любых напряжениях стоимость последних будет значительно выше стоимости синхронных двигателей (кривые 10, 11, 12 рис. 3 и кривые 7, 8 рис. 4).

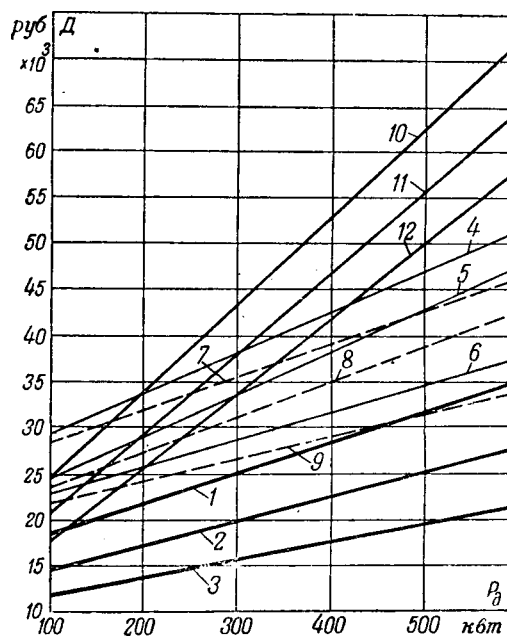


Рис. 3. Графики изменения стоимости D асинхронных и синхронных двигателей в зависимости от установленной мощности P_d при скорости вращения $n = 1000$ об/мин.

Кривая	Двигатель
1	Асинхронный типа ДАМСО, $U = 6000$ в
2	То же, $U = 3000$ в
3	То же, $U = 380$ (500) в
4	Синхронный, $\cos \varphi = 0,8$, $U = 6000$ в
5	То же, $U = 3000$ в
6	То же, $U = 380$ (500) в
7	Синхронный $\cos \varphi = 1$, $U = 6000$ в
8	То же, $U = 3000$ в
9	То же, $U = 380$ (500) в
10	Асинхронный типа ДАМСО (со статическими конденсаторами для увеличения $\cos \varphi$ до 1), $U = 6000$ в
11	То же, $U = 3000$ в
12	То же, $U = 380$ (500) в

Кабели. Допустимая нагрузка кабелей с бумажной изоляцией сечением 70...185 мм² до 1 000 в

$$I_{к.к.} = 88 + 1,72q \text{ [а]}, \quad (3)$$

где q — сечение кабеля, мм.

Так как удельный ток на 1 кВт установленной мощности асинхронного двигателя (средней мощности) при напряжении 380 в равен 1,87 а, то установленная мощность одного двигателя, который может питаться от одного двухкабельного фидера, равна:

$$P_0 = 94 + 1,72q \text{ [квт]}, \quad (4)$$

а сечение каждого из двух кабелей:

$$q = 0,58P_0 - 55 \text{ [мм}^2\text{]}. \quad (5)$$

Стоимость 100 пог. м низковольтного фидера, состоящего из двух параллельных кабелей марки СБ, с учетом средней стоимости земляных работ, равной 1,2 тыс. руб., составляет [Л. 2]:

$$d_k = 4,0 + 0,07q. \quad (6)$$

Подставив в (6) значение q из (5), получим:

$$d'_k = 0,04P_0 + 0,15 \approx 0,04P_0. \quad (7)$$

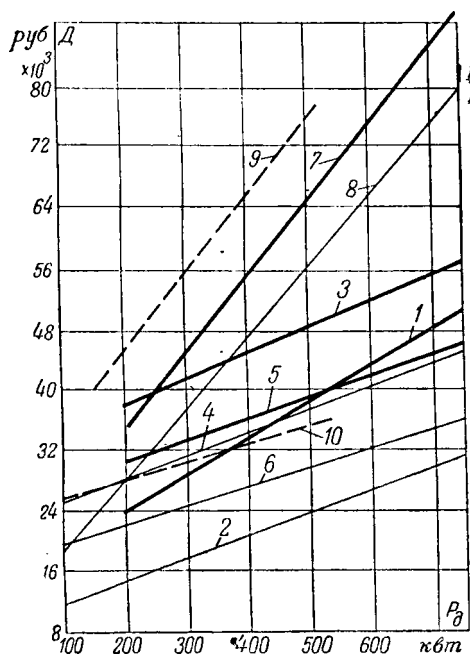


Рис. 4. Графики изменения стоимости D асинхронных и синхронных двигателей в зависимости от установленной мощности P_0 при скорости вращения $n = 750$ об/мин

Кривая	Двигатель
1	Асинхронный типа ДАМСО, $U = 6\,000$ в
2	То же, $U = 380$ (500) в
3	Синхронный, $\cos \varphi = 0,8$, $U = 6\,000$ в
4	То же, $U = 380$ в
5	Синхронный, $\cos \varphi = 1$, $U = 6\,000$ в
6	То же, $U = 380$ в
7	Асинхронный (со статическими конденсаторами для увеличения $\cos \varphi$ до 1), $U = 6\,000$ в
8	То же, $U = 380$ в
9	Асинхронный (со статическими конденсаторами и пусковой аппаратурой), $U = 6\,000$ в
10	Синхронный (с пусковой аппаратурой), $U = 380$ в

Сечения кабелей для двигателей средней мощности при напряжении 6 000 и 3 000 в принимаем ориентировочно равными соответственно 16 и 35 мм². Стоимость 100 пог. м этого кабеля с учетом земляных работ соответственно равна 3,3 и 4,0 тыс. руб.

Аппаратура. Ориентировочная стоимость аппаратуры, включая монтаж и строительную часть:

Наименование	Стоимость, тыс. руб.
Ячейка типа КСО-2,3—10 кв с двусторонним обслуживанием, одной системой шин и масляным выключателем типа ВМГ-133. То же, с двумя однофазными трансформаторами напряжения типа НОМ	12,5 7,0
Панель контактного щита для пуска низковольтного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на ток 600 а. То же, на ток 1 000 а	3,5 4,5

Дополнительная стоимость пусковой аппаратуры для одного двигателя средней мощности на напряжение 6 000 (3 000) в и коммутационной аппаратуры высокого напряжения составляет около 46,0 тыс. руб.

Трансформаторы. Стоимость установки силового трансформатора с первичной обмоткой до 10 кв и мощностью до 1 000 кВа ориентировочно равна (в тыс. руб.) [Л. 2]:

а) без учета строительной части:

$$d_{T1} = 5 + 0,0225P_T; \quad (8)$$

б) с учетом строительной части:

$$d_{T2} = 6,5 + 0,034P_T, \quad (9)$$

где P_T — номинальная мощность трансформатора, кВа.

При напряжении питающей сети 6 или 3 кв дополнительная трансформаторная мощность, которую требуется установить при низковольтных асинхронных двигателях средней мощности, в наихудшем случае будет:

$$\Delta P_{T1} \approx 1,15nP_0 \text{ [кВа]}, \quad (10)$$

а при низковольтных синхронных двигателях

$$\Delta P_{T2} = 1,15nP_0 - 0,3P_T \text{ [кВа]}, \quad (11)$$

где n — число двигателей средней мощности, для которых вместо высокого напряжения принято низкое напряжение;

P_T — номинальная мощность одного трансформатора при высоком напряжении асинхронных двигателей, кВа.

Стоимость дополнительной трансформаторной мощности (в тыс. руб.) в наихудшем случае, когда требуется установка третьего трансформатора, равна:

а) при низковольтных асинхронных двигателях:

$$d_{T2} = 6,5 + 0,04nP_0; \quad (12)$$

б) при низковольтных синхронных двигателях:

$$d_{тз} = 6,5 + 0,04nP_d - 0,01P_t \approx 0,04nP_d. \quad (13)$$

Сравнение вариантов. Выбор напряжения для двигателей средней мощности по капитальным затратам при напряжении питающей сети 6 кВ производим для следующих вариантов:

Характеристика двигателей	
высокого напряжения	низкого напряжения
Асинхронные двигатели типа ДАМСО без статических конденсаторов, 6 кВ	Асинхронные двигатели типа ДАМСО без статических конденсаторов
То же	Синхронные двигатели типа ДС, $\cos \varphi = 1$
Асинхронные двигатели типа ДАМСО со статическими конденсаторами для увеличения $\cos \varphi$ до 1	То же

При сравнении вариантов стоимость двигателей принята при скорости вращения 750 об/мин, а также учтена стоимость дополнительной коммутационной аппаратуры, которая требуется при

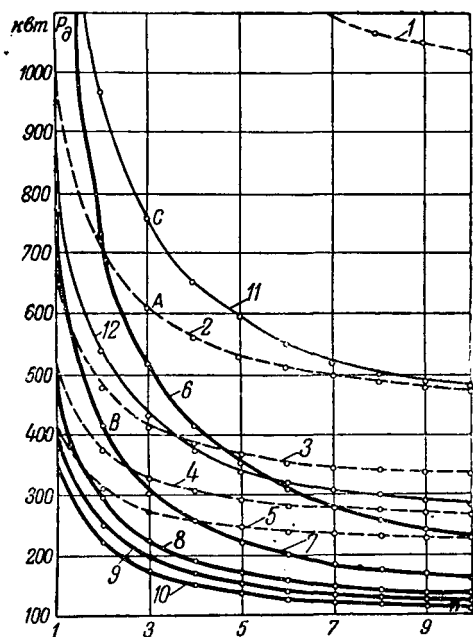


Рис. 5. Кривые для выбора напряжения двигателей средней мощности по капитальным затратам в зависимости от числа двигателей n и расстояния от подстанции l для разных вариантов при напряжении сети 6 кВ.

P_d — установленная мощность одного двигателя.

Кривая	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вариант	1а	1а	1а	1а	1а	1б	1б	1б	1б	1б	1в	1в
Расстояние l , м	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300	250	300

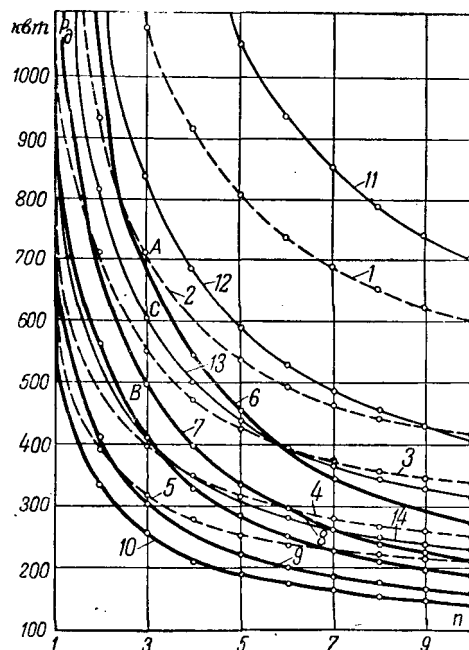


Рис. 6. Кривые для выбора напряжения двигателей средней мощности по капитальным затратам в зависимости от числа двигателей n и расстояния от подстанции l для разных вариантов при напряжении сети 10 кВ.

P_d — установленная мощность одного двигателя.

Кривая	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Вариант	2а	2а	2а	2а	2а	2б	2б	2б	2б	2б	2в	2в	2в	2в
Расстояние l , м	100	150	200	350	400	100	150	200	300	400	200	250	300	400

установке высоковольтных двигателей, и стоимость дополнительной трансформаторной мощности, которая требуется при установке низковольтных двигателей.

В результате сравнения вариантов при разных значениях расстояния l от подстанции, выведена зависимость между установленной мощностью каждого двигателя P_d и числом двигателей n , при которых капитальные затраты для низковольтных двигателей будут ниже, чем для высоковольтных, и построены кривые для напряжения питающей сети 6 кВ (рис. 5).

Аналогично построены кривые для напряжения питающей сети 10 кВ (рис. 6).

По этим кривым при заданном расстоянии от подстанции l , числе двигателей средней мощности n и величине установленной мощности одного двигателя P_d легко выбрать напряжение для двигателей средней мощности. Ниже кривых находится область применения низковольтных двигателей.

Из анализа кривых рис. 5 и 6 следует, что при среднем расстоянии от питающей подстанции 100 ... 150 м асинхронные двигатели мощностью до 300 ... 400 кВт независимо от количества двигателей выгодно выбирать на напряжение 380 в.

Выбор же синхронных двигателей на напряжение 380 в вместо высоковольтных асинхронных двигателей дает значительную экономию в капитальных затратах при любой мощности, если учесть их компенсирующую способность.

Таким образом, при расстоянии от подстанции 100 ... 150 м и напряжении сети 6 кВ мощность трехфазных двигателей, при которой выгодно выбирать напряжение 380 в, ограничивается только условиями коммутации аппаратуры низкого напряжения.

При напряжении же питающей сети 10 кВ расстояние от подстанции, при котором выгодно выбирать низковольтные двигатели, резко увеличивается, так как схема питания при низком напряжении двигателей значительно упрощается.

Потери мощности. Двигатели. Коэффициент полезного действия двигателей средней мощности при напряжении 380 (500) в в среднем на 2,5% выше к. п. д. аналогичных двигателей при напряжении 6 000 в и на 1,5% выше к. п. д. аналогичных двигателей при напряжении 3 000 в.

Разница в потерях одного двигателя высокого и низкого напряжения при среднем коэффициенте нагрузки 0,8 и напряжении двигателя 6 000 в равна около $0,025P_{\partial}$, а при напряжении двигателя 3 000 в — около $0,015P_{\partial}$.

Кабели. Увеличение потерь в 100 пог. м кабельного фидера, питающего двигатель при напряжении 380 в мощностью 200 ... 400 кВт, приблизительно составляет:

$$\Delta P_{\kappa} \approx 1,3 + 4,6 \cdot 10^{-3} P_{\partial} \text{ [кВт]}. \quad (14)$$

Трансформаторы. Часовые потери в трансформаторе, отнесенные к годовой продолжительности нагрузочных потерь, равны:

$$\Delta P_{\tau\kappa} = \frac{\tau_0}{\tau_{\text{м}}} P_0 + P_{\text{м}} \beta^2, \quad (15)$$

где P_0 и $P_{\text{м}}$ — потери холостого хода и нагрузочные потери трансформатора, кВт;

β — отношение действительной нагрузки трансформатора к его номинальной мощности;

τ_0 и $\tau_{\text{м}}$ — годовая продолжительность потерь холостого хода и максимума нагрузочных потерь.

Для трансформаторов мощностью от 180 до 1 000 кВа потери холостого хода и нагрузочные потери в зависимости от номинальной мощности трансформатора $P_{\text{т}}$ могут быть выражены соответственно уравнениями:

$$P_0 = 5P_{\text{т}} \cdot 10^{-3}; \quad (16)$$

$$P_{\text{м}} = 2 + 13P_{\text{т}} \cdot 10^{-3}. \quad (17)$$

Подставив значения P_0 и $P_{\text{м}}$ из (16) и (17) в (15), приняв $\frac{\tau_0}{\tau_{\text{м}}} = 1,5$ и $\beta = 0,8$, получим:

$$\Delta P_{\tau\kappa} = 2 + 16P_{\text{т}} \cdot 10^{-3}. \quad (18)$$

Дополнительные часовые потери в трансформаторах равны:

а) при установке асинхронных двигателей на напряжение 380 в вместо высоковольтных:

$$\Delta P_{\tau\kappa} \approx 18nP_{\partial} \cdot 10^{-3}; \quad (19)$$

б) при установке синхронных двигателей на напряжение 380 в:

$$\Delta P_{\tau\kappa} \approx (18nP_{\partial} - 4,8P_{\text{т}}) 10^{-3}. \quad (20)$$

При напряжении питающей сети 10 кВ дополнительные потери в трансформаторах в случае применения двигателей напряжением 380 в вместо высоковольтных (3 000 в) асинхронных двигателей резко сокращаются и могут не учитываться.

Сравнение вариантов. Дополнительные потери в кабелях и трансформаторах, приходящиеся на один двигатель при напряжении асинхронных двигателей 380 в, должны быть ниже дополнительных потерь в одном высоковольтном (6 000 в) асинхронном двигателе. Сравнивая потери, можно определить расстояние от подстанции l , при котором потери при установке низковольтных двигателей будут ниже, чем при установке высоковольтных двигателей.

Это расстояние приблизительно составляет:

а) в случае замены асинхронных двигателей напряжением 6 000 в асинхронными двигателями напряжением 380 в (при напряжении сети 6 кВ):

$$l \cdot 10^{-2} \leq \frac{7 \cdot 10^{-3} P_{\partial}}{1,3 + 4,6 \cdot 10^{-3} P_{\partial}} \text{ [м]}; \quad (21)$$

б) в случае замены асинхронных двигателей напряжением 6 000 в синхронными двигателями напряжением 380 в (при напряжении сети 6 кВ):

$$l \cdot 10^{-2} \leq \frac{12 \cdot 10^{-3} P_{\partial}}{1,3 + 4,6 \cdot 10^{-3} P_{\partial}} \text{ [м]}, \quad (22)$$

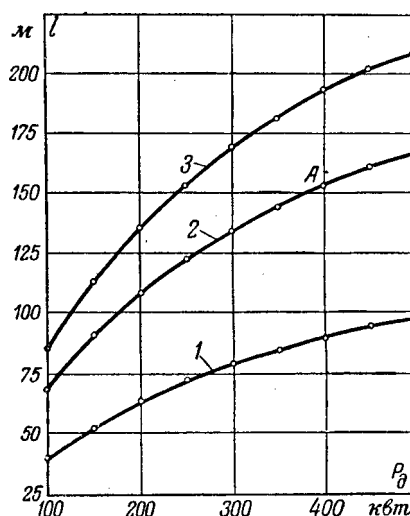


Рис. 7. Кривые для выбора напряжения двигателей средней мощности по потерям.

l — расстояние от подстанции; P_{∂} — установленная мощность одного двигателя.

Кривая	Сравниваемые варианты
1	Замена высоковольтных (6 000 в) асинхронных двигателей низковольтными (380 в) при напряжении сети 6 кВ
2	То же, но синхронными двигателями напряжением 380 в
3	Замена высоковольтных (6 000 в) асинхронных двигателей синхронными двигателями напряжением 380 в при напряжении сети 10 кВ

в) в случае замены асинхронных двигателей напряжением 3 000 в синхронными двигателями напряжением 380 в (при напряжении сети 10 кв):

$$l \cdot 10^{-2} \leq \frac{15 \cdot 10^{-3} P_d}{1,3 + 4,6 \cdot 10^{-3} P_d} [м]. \quad (23)$$

На рис. 7 по формулам (21)...(23) построены кривые зависимости расстояния от подстанции l от мощности P_d .

Из рассмотрения кривых следует, что при установленной мощности 300...400 квт расстояние, при котором потери при установке низковольтных двигателей будут равны потерям при установке высоковольтных двигателей, составляет 80...90 м для асинхронных двигателей, 135...150 м — для синхронных двигателей при напряжении сети 6 кв и 160...190 м — при напряжении сети 10 кв.

Выводы. 1. При расстоянии от подстанции около 100 м двигатели средней мощности (300...400 квт), как правило, должны выбираться на напряжение 380 в, особенно при небольшом числе двигателей, установке их в цехах с пыльной или агрессивной средой и при необходимости реверса, а тем более в случае применения синхронных двигателей [Л. 3].

2. При расстоянии от подстанции больше 100 м выбор напряжения двигателей средней мощности определяется по кривым рис. 5, 6 и 7.

Пример. Требуется выбрать тип и напряжение для трех двигателей мощностью 400 квт при расстоянии от подстанции 150 м и напряжении питающей сети 6 и 10 кв.

Решение. Напряжение питающей сети 6 кв. По кривым рис. 5 находим, что капитальные затраты в случае применения асинхронного двигателя напряжением 380 в вместо асинхронного двигателя напряжением 6 000 в будут ниже при мощности 600 квт (точка А кривой 2). В случае применения вместо асинхронного двигателя напряжением 6 000 в синхронного двигателя напряжением 380 в капитальные затраты были бы одинаковы при установке двух двигателей (точка В кривой 7). Если учесть компенсирующую способность синхронных двигателей напряжением 380 в, то в случае их применения капитальные затраты будут значительно ниже даже при расстоянии 250 м (точка С кривой 11).

По кривой 2 рис. 7 находим, что потери мощности при низком напряжении будут равны потерям при напряжении 6 000 в в случае применения синхронных двигателей (точка А).

Напряжение питающей сети 10 кв. По кривым рис. 6 находим, что капитальные затраты в случае применения асинхронных двигателей напряжением 380 в будут равны капитальным затратам при напряжении 6 000 в и мощности 700 квт (точка А кривой 2); в случае применения синхронных двигателей 380 в — при мощности 500 квт (точка В кривой 7), а с учетом компенсирующей способности синхронных двигателей — при мощности 600 квт и расстоянии 300 м (точка С кривой 13).

По кривой 3 рис. 7 находим, что потери мощности при низком напряжении будут равны потерям при напряжении 6 000 в даже в случае применения асинхронных двигателей напряжением 6 000 в и расстоянии около 200 м.

Выбираем синхронные двигатели на напряжение 380 в.

Литература

1. М. В. Грейсух, А. М. Розенталь и Н. Н. Стефанович. О необходимости расширения области применения синхронных двигателей. Электричество, № 9, 1954.

2. Л. Г. Шрайбер и И. Ф. Поликострицкая. Укрупненные показатели стоимости электрооборудования. ЛПЭБ треста «Севзапэлектромонтаж», июль 1952.

3. М. В. Грейсух. Электрический привод конусных дробилок. Электрические станции, № 7, 1954.

[12. 10. 1955]



Современные конструкции зарубежных высоковольтных кабелей

(Обзор)

Кандидат техн. наук, доц. Х. Р. МАЛКИН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Строительство крупных электростанций, передача значительных мощностей электрической энергии на большие расстояния, распределение этой энергии внутри промышленных районов и приближение высоких напряжений к местам потребления вызывают необходимость в применении на многих участках кабельных линий.

Главнейшими участками кабельных линий в этих системах должны являться: соединения повысительных трансформаторов с открытыми распределительными устройствами, особенно в условиях мощных гидроэлектростанций; переходы через широкие водные пространства; глубокие вводы в крупные промышленные центры.

Разработке различных конструкций кабелей 110 кв и выше, соединительной и подпитывающей аппаратуры для них, а также методов монтажа и эксплуатации кабельных линий придается постоянно большое внимание.

В настоящем обзоре зарубежной литературы

кратко рассмотрены основные современные конструкции кабелей 110 кв и выше, получившие практическое применение, и перспективы их дальнейшего развития.

Высоковольтные кабели могут быть разделены на три группы: а) маслонаполненные кабели, в которых обеспечивается автоматическая компенсация температурных изменений объема изоляции путем подпитки маслом под избыточным давлением; б) кабели давления, в которых под действием внешнего давления газа герметичная оболочка, наложенная поверх изоляции, принудительно действует как мембрана, меняющая свое положение в зависимости от температурных изменений объема изоляции; в) газонаполненные кабели с обедненно-пропитанной изоляцией или изоляцией из предварительно пропитанных бумажных лент; изоляция этих кабелей заполняется нейтральным газом и находится под тем или иным

давлением в зависимости от рабочего напряжения кабеля.

Рассмотрим основные особенности перечисленных групп кабелей.

Маслонаполненные кабели. Кабели этого типа получили наиболее широкое распространение. Примерно до середины 30-х годов маслонаполненные кабели 110 ... 132 кв изготовлялись в виде одножильных для рабочего давления масла 1 *ати*. Кабели имели одинарную оболочку из свинца с присадкой 0,05 ... 0,06% меди несколько увеличенной толщины по сравнению с кабелями с вязкой пропиткой и канал для масла в центре токопроводящей жилы.

В 1936 г. в Париже была пущена в эксплуатацию линия 220 кв из кабелей этой конструкции. Одновременно с успешной эксплуатацией построенных в этот первый период кабельных линий в ряде стран, в том числе и в СССР, продолжались большие работы по усовершенствованию технологии изготовления кабелей и аппаратуры, их конструкций и применяемых для них изоляционных материалов — масел и бумаг, а также по упрощению и увеличению надежности их эксплуатации.

Соединительная аппаратура кабельной линии низкого давления включает в себя соединительные, концевые и так называемые стопорные муфты. Стопорные муфты предназначены для ограничения давления масла в случае неровной трассы прокладки кабеля, а также для секционирования линии на ряд участков, раздельно питаемых маслом. Для питания линии маслом применяются баки питания, имеющие очень небольшое избыточное давление (0,1 ... 0,15 *ати*); баки устанавливаются на такой высоте над уровнем прокладки кабеля, чтобы обеспечить максимальную длину подпитываемого участка и не превысить допустимого давления на свинцовую оболочку кабеля. Эти обстоятельства ведут к установке значительного количества стопорных муфт сложной конструкции и размещению баков питания в специальных киосках над землей. При подземной прокладке кабелей для стопорных муфт сооружались специальные подземные колодцы с люками на поверхности земли. При прокладке кабелей в блоках (США), в которых они могут свободно перемещаться при температурных изменениях в местах изгибов при переходах к соединительным и стопорным муфтам свинцовая оболочка со временем деформировалась. Это способствовало появлению в начале 40-х годов конструкции кабелей и аппаратуры, в которых данные недостатки в значительной степени были устранены.

Усовершенствование конструкций кабельных линий шло различными путями в европейских странах и США. В Европе начали применяться главным образом кабели среднего давления, работающие при давлении масла 3 *ати* (в некоторых случаях даже до 10 *ати*), в США же — кабели высокого давления до 15 *ати* в стальных трубах. Кабели среднего давления конструктивно отличаются от кабелей низкого давления лишь тем, что в первых свинцовая оболочка упрочняется путем наложения банджа из двух

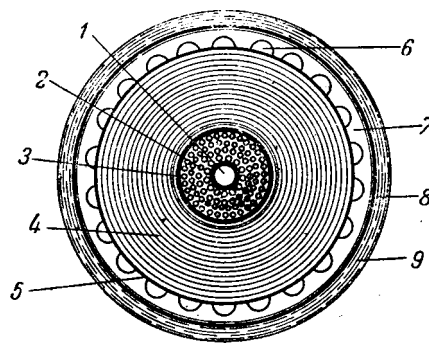


Рис. 1. Маслонаполненный кабель с усиленной свинцовой оболочкой.

1 — канал для масла; 2 — токопроводящая жила; 3 — экран по жиле; 4 — изоляция; 5 — экран по изоляции; 6 — каналы для масла; 7 — свинцовая оболочка; 8 — усиление свинцовой оболочки; 9 — защитные покрытия.

медных или латунных лент или лент из кадмиевой бронзы. В конструкциях кабелей 380 ... 425 кв (кабельные линии в Швеции 1952 и 1954 гг.), где потребовалось иметь давление масла до 10 *ати*, свинцовая оболочка была дополнительно усилена путем наложения тонких плоских медных проволок и банджа из медных лент. В связи с тем, что кабели 380 ... 425 кв имеют большую толщину изоляции, для обеспечения ее пропитки при изготовлении и для подпитки в процессе эксплуатации на внутренней стороне свинцовой оболочки имеются специальные пазы, служащие дополнительными каналами для масла. На рис. 1 приведена конструкция этого кабеля [Л. 1]. Так как при наложении оболочки с пазами поверхность получилась неровной, пришлось наложить вторую свинцовую оболочку.

При изготовлении кабелей среднего давления большое внимание обращается на защиту оболочки от коррозии. Вначале для этой защиты применялась вторая свинцовая оболочка, которая затем была заменена битуминозными покрытиями и лентами из пластических материалов. В Англии применяется защита, состоящая из слоев самовулканизирующейся резины, проложенной между двумя хлорвиниловыми лентами.

Применение кабелей среднего давления дало возможность: значительно уменьшить количество стопорных муфт; заменить баки питания баками давления, которые устанавливают на уровне прокладки кабелей; значительно увеличить длину подпитываемой секции. Опыт эксплуатации выявил также возможность укладки стопорных муфт непосредственно в грунт с защитой при помощи бетонной коробки и сооружения небольших колодцев для баков давления.

Применение в последнее время баков давления «с начальным давлением», подключаемых к нижележащим участкам трассы, позволило уменьшить число баков, необходимых для питания линии. Принцип действия этих баков давления следующий. Как известно, работа бака давления основана на расширении и сжатии воздуха, заключенного внутри герметичных гибких элементов, помещенных в стальной кожух, заполненный маслом. Если такой бак подключен к нижней точке трассы, то полезный объем отдачи

масла будет уменьшен в соответствии с гидростатическим давлением масла в месте подключения бака. Если же создать заранее внутри элемента давление воздуха, соответствующее этому гидростатическому давлению, то его полезный объем отдачи масла будет даже несколько увеличен (рис. 2). Кривые отдачи масла на рис. 2 даны для бака объемом 225 л [Л. 2]. В Англии такие баки изготавливаются с начальным давлением 0,25; 0,50; 0,75 и 1,0 *ати*.

Начальное давление в этих баках может быть создано, например, путем запайки или сварки элементов в камере с нужным давлением. При применении для подпитки линии баков давления значительно упрощается система сигнализации минимума и максимума давления.

За последнее время появились кабельные линии среднего давления на 110 кВ, в которых применены трехжильные кабели малых сечений с отдельной экранированными круглыми жилами в общей свинцовой оболочке. Каналы для масла в этих кабелях помещаются в местах заполнителей. Для вывода кабелей к концевым муфтам применены соединительно-разветвительные муфты с отрезка-

ми одножильных кабелей, имеющих каналы для масла под свинцовой оболочкой [Л. 6].

В США разработаны маслonaполненные кабельные линии высокого давления в стальной трубе. Три одножильных кабеля, имеющие круглые экранированные токопроводящие жилы, поверх которых наложены изоляция, экран, проволоки скольжения и временная свинцовая оболочка, протягиваются в стальной трубопровод. При протягивании в трубопровод с кабелем снимается свинцовая оболочка. Изоляция кабелей пропитывается маслом, более вязким, чем у кабелей среднего давления, с тем, чтобы при температуре, при которой производится их протягивание в трубу, масло не вытекало из изоляции. По завершении монтажа линии трубопровод заполняется таким же маслом, каким пропитан кабель, или маслом меньшей вязкости и затем создается давление около 15 *ати*.

Кабельная линия высокого давления благодаря большому диаметру трубопровода и высокому давлению масла может быть обеспечена подпиткой на длину 10 ... 15 км путем установки специальных агрегатов по концам линии. Это в значительной степени упрощает эксплуатацию.

На длинных линиях обычно устанавливаются так называемые полустопорные муфты, дающие возможность в случае необходимости отключать часть линии от питания маслом. В связи с этим при ликвидации дефектов выпуск масла может быть ограничен только участком между полустопорными муфтами.

Сравнивая обе системы современных маслonaполненных кабельных линий — среднего давления и высокого давления, необходимо отметить следующее. Линия среднего давления, требующая наличия стопорных муфт и подпитывающих баков давления по трассе линии, вносит значительное усложнение в ее монтаж и эксплуатацию.

Однако кабели среднего давления допускают гораздо меньшие радиусы изгиба и поэтому они могут быть применены в условиях, когда трасса проходит по местности, загруженной подземными коммуникациями. В том случае, когда длина линии невелика и не имеет больших разностей в уровнях прокладки кабелей, а следовательно, нет необходимости в установке стопорных муфт, кабели среднего давления наиболее удобны как по монтажу, так и по эксплуатации.

Стальной трубопровод для кабельной линии высокого давления требует больших радиусов изгиба и неудобен при прокладке в местах с большой нагрузкой подземными коммуникациями; в связи с этим такая линия более всего применима для пригородных прокладок большой протяженности.

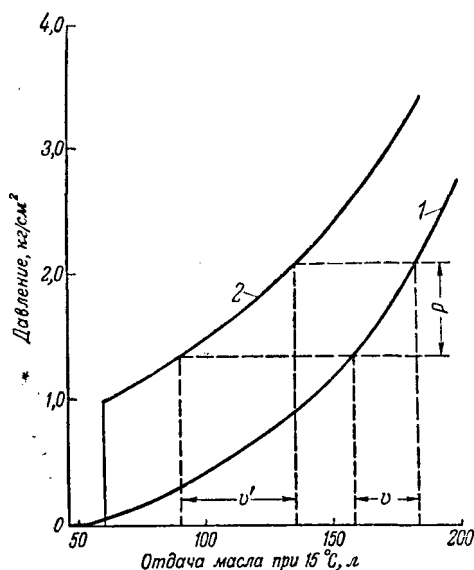
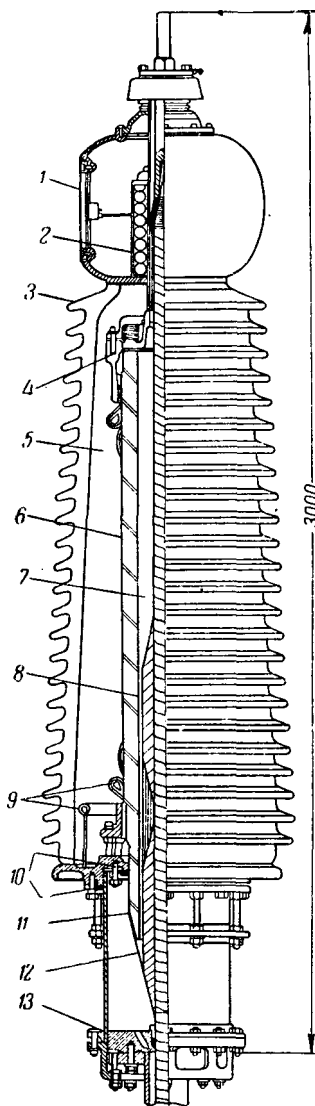


Рис. 2. Кривые отдачи масла баков давления.

1 — нормального; 2 — с начальным давлением.

Рис. 3. Концевая муфта маслonaполненного кабеля высокого давления на 230 кВ.

1 — указатель уровня масла; 2 — пружинное зажатие прокладок; 3 — юбка изолятора; 4 — пружинный стопор для масла высокого давления; 5 — зона масла низкого давления; 6 — фарфоровая труба высокого давления; 7 — зона масла высокого давления; 8 — бумажная намотка для выравнивания напряжения; 9 — металлические экраны; 10 — уплотнения для масла высокого давления; 11 — омедненная часть фарфора; 12 — конусный экран из свинца; 13 — уплотнения для масла высокого давления.



При сравнении этих двух систем нужно также учесть, что концевые муфты для кабеля среднего давления значительно проще по конструкции, чем концевые муфты для кабеля высокого давления. Дело в том, что для кабелей высокого давления из-за отсутствия фарфоровых изоляторов, могущих длительно работать при давлениях 15 *ати*, приходится применять две камеры: камеру высокого давления, соединяемую с маслом в трубе, и камеру низкого давления, заполняемую жидким маслом при низком давлении. Вид такой муфты, где барьером между камерами служит гладкий фарфоровый цилиндр [Л. 3], показан на рис. 3. В качестве барьера применяют также бакелитовые или фарфоровые цилиндры. Применение бакелитовых или фарфоровых цилиндров значительно усложняет конструкцию муфты и ее монтаж.

Следует отметить, что для кабелей высокого давления наряду с применением временной свинцовой оболочки применяется также защита от внешней среды при помощи наложения на изоляцию лент из полиэтилена, поверх которых накладываются проволоки скольжения. Кабели этой конструкции транспортируются на барабанах, имеющих герметичную обшивку, внутри которой создается небольшое избыточное давление азота. При применении такой защиты исключается необходимость в снятии свинцовой оболочки при протягивании кабелей в стальной трубопровод.

По имеющимся в литературе данным в эксплуатации находятся кабельные линии высокого давления до 230 *кв*, но они могут быть вполне применены и для более высоких напряжений.

Кабели давления. Впервые кабель давления был проложен в начале 30-х годов в Германии. Кабельная линия представляла собой стальной трубопровод, в который был затянута трехжильный кабель с отдельно экранированными круглыми жилами с общей свинцовой оболочкой треугольной формы с закругленными углами. Изоляция была пропитана обычным вязким составом. В трубопроводе создавалось давление газа около 15 *ати*. Кабельная линия работала при напряжении 110 *кв*.

Современные конструкции таких кабелей разработаны в США и Англии [Л. 2]. В США проло-

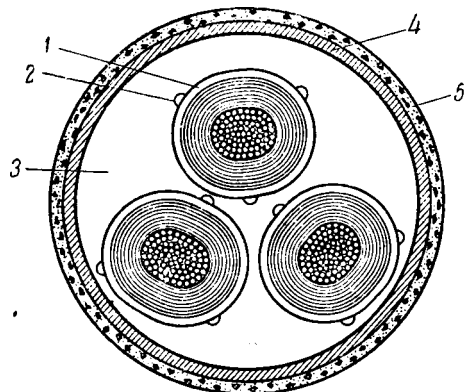


Рис. 4. Кабель давления в стальной трубе.

1 — Свинцовая или полиэтиленовая оболочка, усиленная металлическими лентами; 2 — проволоки скольжения; 3 — зона для газа; 4 — стальная труба; 5 — защитные покрытия.

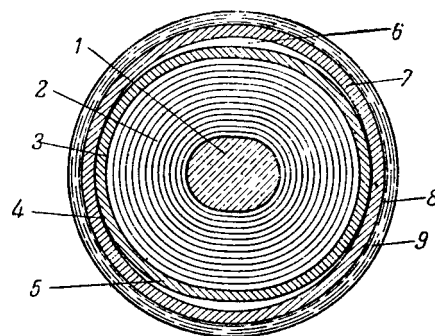


Рис. 5. Кабель давления с усиленной свинцовой оболочкой.

1 — токопроводящая жила с экраном; 2 — изоляция; 3 — экран по изоляции; 4 — усиление оболочки; 5 — оболочка из свинца или полиэтилена; 6 — каналы для газа; 7 — свинцовая оболочка; 8 — усиление свинцовой оболочки; 9 — защитные покрытия.

жено несколько линий кабелей давления на напряжение 115...138 *кв* (рис. 4).

Три одножильных освинцованных кабеля, имеющих овальную форму, и проволоки скольжения поверх усиленных лентами свинцовых оболочек затягиваются в стальной трубопровод. Трубопровод заполняется газом под давлением 15 *ати*.

Овальная форма кабеля создает лучшие условия температурных изменений объема и предохраняет изоляцию от деформации. Изоляция кабелей пропитана вязким составом для предотвращения стекания его при неровной трассе прокладки.

В английской конструкции (рис. 5) канал для газа создается между двумя свинцовыми оболочками: овальной внутренней и круглой внешней. Обе оболочки имеют усиления при помощи металлических лент.

Помимо этого, внешняя оболочка усиливается дополнительно для того, чтобы она могла противостоять длительному давлению газа 15 *ати*.

В настоящее время рассматривается вопрос о целесообразности замены в обоих приведенных конструкциях кабелей давления свинцовой оболочки непрерывной полиэтиленовой оболочкой. Тенденция к более глубокой разработке этих конструкций кабелей давления в стальном трубопроводе взамен маслonaполненных кабелей высокого давления представляет несомненный интерес. Замена большого объема масла в трубопроводе газом упрощает монтаж линии и требует значительно более простой системы поддержания давления в трубопроводе. Однако при этом необходимо иметь в виду, что концевые муфты для кабеля давления более сложны, чем для кабеля маслonaполненного. Дело в том, что для обеспечения необходимого уровня по электрической прочности концевой муфты она должна быть заполнена маслом, для чего создаются специальные устройства для разделения газа в трубопроводе и масла в муфте.

Газонаполненные кабели. Газонаполненные кабели 110 *кв* и выше широкого применения не получили, так как электрическая прочность изоляции этих кабелей при прочих равных условиях

значительно ниже, чем изоляции маслonaполненных кабелей и кабелей давления. Вместе с тем представляет интерес сооружаемая в Англии подводная кабельная линия 138 кВ большой протяженности. Кабель для этой линии имеет полую токопроводящую жилу, изоляцию из предварительно пропитанной бумаги и усиленную свинцовую оболочку. Благодаря применению предварительно пропитанной бумаги (что исключает необходимость в проведении процесса сушки и пропитки) такие кабели могут быть изготовлены очень большой длины [Л. 5].

Отметим, что газонаполненные кабели, в которых отсутствует или в значительной степени уменьшена возможность стекания пропиточного состава, должны получить широкое применение для кабельных линий 20 ... 66 кВ. Для создания необходимой электрической прочности при таких напряжениях достаточно иметь в изоляции кабеля давление, не превышающее 2 ... 3 атм.

Основные характеристики кабелей. Изучение характеристик изоляционных материалов, применяемых для высоковольтных кабелей и изоляции кабеля, привели к созданию кабелей с очень высокими электрическими характеристиками при сравнительно небольшой толщине изоляции. Эти характеристики обеспечиваются усовершенствованными технологическими процессами производства кабелей и высокими характеристиками масла и кабельной бумаги.

Многими работами доказано, что зазоры между бумажными лентами являются основными очагами развития пробоя. Вследствие этого пробивные напряжения при промышленной частоте и импульсах будут определяться в первую очередь плотностью намотки бумажных лент и их толщиной. Токопроводящие жилы всех кабелей имеют либо гладкую поверхность, образуемую повивом из луженых сегментных проволок, либо экран. Во всех без исключения конструкциях кабелей по изоляции накладывается также экран. Материалом для экранов служат либо полупроводящие, либо металлизированные ленты. Таким

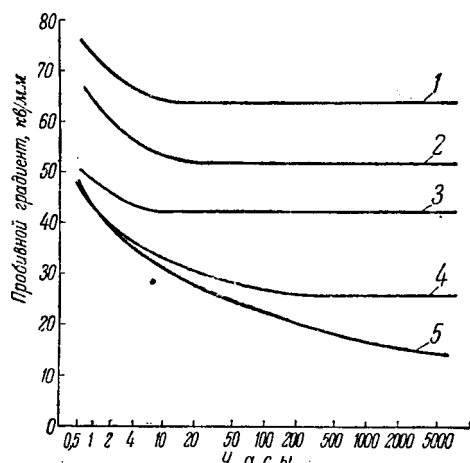


Рис. 6. Кривые жизни для кабелей с изоляцией из тонких бумаг.

1 — маслonaполненный кабель с давлением масла 15 атм; 2 — кабель под внешним давлением газа 15 атм; 3 — маслonaполненный кабель с давлением масла 1,3 атм; 4 — газонаполненный кабель с давлением газа 15 атм; 5 — кабель с вязкой пропиткой.

образом, изоляция современных кабелей находится между двумя достаточно гладкими цилиндрическими поверхностями.

Практически применяемые в настоящее время толщины изоляции для кабелей, находящихся в эксплуатации, следующие:

Линейное напряжение, кВ	Толщина изоляции, мм	Максимальный рабочий градиент, кВ/мм
110 . . . 138	11,8 . . . 14	7,8 . . . 11
220 . . . 230	19,5 . . . 20	11 . . . 12
300	22,6	12
380	28	12,3

Для кабелей до 300 кВ применяются бумажные ленты толщиной 0,076 ... 0,19 мм, причем более тонкие бумаги располагаются у жилы. Бумажные ленты разных плотностей применяются не во всех случаях. Так, например, для кабеля 300 кВ, изготовленного в Англии и проложенного в Канаде, была применена бумага нормальной плотности толщиной 0,09 ... 0,19 мм.

В этой связи представляет значительный интерес рассмотрение электрических характеристик изоляции кабеля, наиболее полно освещенных Доменом (Domenech) [Л. 1].

На рис. 6 приведены кривые жизни для кабелей различных типов, имеющих изоляцию у жилы из бумажных лент толщиной 0,014 мм. В процессе испытаний напряжением кабели подвергались ежедневным тепловым циклам, при которых температура жилы доходила до 80°С, за исключением кабелей с вязкой пропиткой, для которых эта температура достигала 55°С. Для газонаполненных кабелей полученная кривая жизни действительна при условии горизонтальной прокладки или прокладки по небольшому уклону.

Кривая жизни для кабеля давления относится к конструкции в свинцовой оболочке.

На рис. 7 приведены кривые зависимости длительного пробивного градиента (соответствующего асимптотической величине градиента по кривой жизни) от давления в изоляции кабеля для различных толщин бумажных лент у жилы кабеля. Эти данные собраны из различных литературных источников и достаточно хорошо совпадают с данными отечественных работ.

На рис. 8 приведены кривые зависимости импульсного пробивного градиента от толщины бумажных лент у жилы кабеля при общей толщине изоляции больше 10 мм. Как указывает ряд авторов, пробивное импульсное напряжение практически (в пределах 5 ... 10%) не зависит от давления масла в изоляции и близко к пробивному напряжению постоянного тока.

На основании этих данных можно сделать следующее заключение: а) пробивной градиент при промышленной частоте увеличивается с уменьшением толщины бумажных лент и увеличением давления в изоляции; б) пробивной импульсный градиент увеличивается в основном только за счет уменьшения толщины бумажных лент. Уменьшение толщины бумажных лент ведет к соответствующему уменьшению толщины зазоров в изоляции (рис. 9).

Анализ этих характеристик, являющихся

основными для суждения о качестве изоляции кабеля, может дать, по нашему мнению, еще и следующие интересные данные.

Максимальная напряженность электрического поля в одножильном кабеле для однородной изоляции с одинаковой диэлектрической проницаемостью и для изоляции, состоящей из двух слоев с различными диэлектрическими проницаемостями, определяется выражениями:

$$E_m = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (1)$$

и

$$E_m = \frac{U}{r \left(\ln \frac{r_1}{r} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \quad (2)$$

Здесь U — напряжение между жилой и металлической оболочкой;

r — радиус по экрану токопроводящей жилы, мм;

r_1 — радиус на границе слоев изоляции с эквивалентными диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 , мм;

R — радиус по изоляции, мм.

Как видно из уравнений (1) и (2), при одинаковых размерах кабелей величина напряженности по (2) будет меньше, чем по (1). Вследствие этого казалось бы, что при применении бумажных лент различных плотностей с $\epsilon_1 > \epsilon_2$ толщина изоляции могла бы быть уменьшена. Однако практически это использовать нельзя по следующим причинам.

Как указывалось выше, основными очагами развития пробоя в кабеле являются зазоры между бумажными лентами, заполненными в рассматриваемых кабелях либо изоляционным соста-

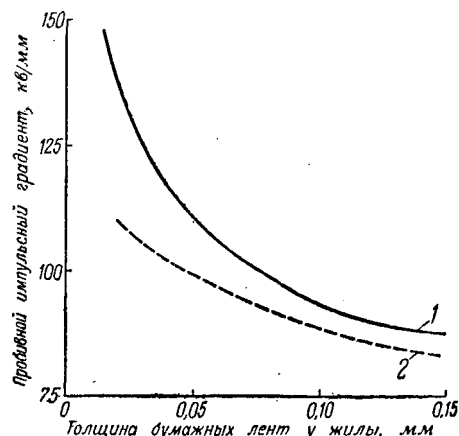


Рис. 8. Зависимость пробивных импульсных градиентов от толщины бумажных лент.

1 — маслonaполненные кабели; 2 — газонаполненные кабели с давлением газа 15 атм.

вом, либо газом под давлением, либо смесью того и другого.

Для слоя изоляции, состоящего из двух бумажных лент и одного зазора, можно считать поле однородным и равномерным¹ (рис. 9) с напряженностью E_k определяемым (1) или (2). При этих условиях напряженность в зазоре, заполненном маслом, и пропитанной бумажной ленте при одинаковой их толщине определяется уравнениями

$$E_m = E_k \frac{3}{1 + 2 \frac{\epsilon_m}{\epsilon_6}} \quad \text{и} \quad E_6 = E_k \frac{3}{2 + \frac{\epsilon_6}{\epsilon_m}} \quad (3)$$

Здесь ϵ_m и ϵ_6 — диэлектрические проницаемости только масла и только пропитанной бумаги.

Из (3) видно, что напряженность в масле будет больше, чем в бумаге, так как $\epsilon_m < \epsilon_6$, причем чем больше ϵ_6 , тем больше будет E_m .

Если же сопоставить (1) и (2) с (3), то видно, что при одинаковых размерах кабеля, несмотря на уменьшение величины E_k по (2), величина E_m должна мало измениться.

Это положение подтверждается проведенными расчетами для диэлектрических проницаемостей применяемых масел и кабельных бумаг. Отсюда следует, что увеличение плотности бумажных лент, прилегающих к жиле, не должно существенно сказываться на увеличении пробивного напряжения изоляции кабеля. Однако в случае применения бумажных лент малой толщины уплотнение бумаги необходимо для увеличения ее механической прочности.

¹ На рис. 9 представлена схема расположения бумажных лент с перекрытием зазора одной третью ширины последующей ленты. Этот способ расположения лент имеет наибольшее распространение, так как при этом получаются более равномерное распределение зазоров в изоляции кабеля и тем самым достаточно равномерные ее механические характеристики. Перекрытие зазора примерно одной третью ширины ленты даже при применяемых в современных высоковольтных кабелях узких бумажных лентах исключает возможность их совпадения.

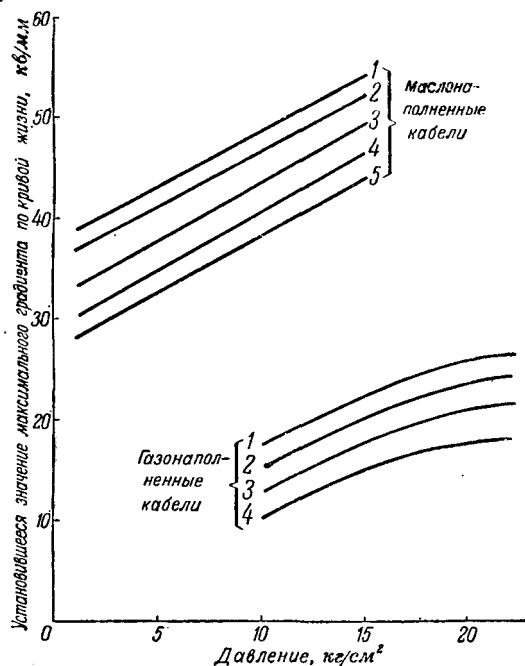


Рис. 7. Зависимость установившихся градиентов от давления масла или газа для различных толщин бумажных лент.

1 — 0,030 мм; 2 — 0,045 мм; 3 — 0,075 мм; 4 — 0,125 мм; 5 — 0,175 мм.

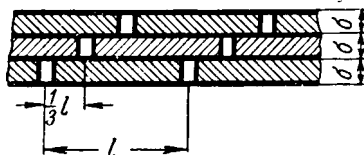


Рис. 9. Схема расположения бумажных лент с перекрытием в одну треть.

В связи с тем, что напряженность в изоляции кабеля меняется по закону кривой, определяемой (1) или (2), можно подобрать таким образом толщины бумажных лент, чтобы они удовлетворяли следующим условиям:

а) При одинаковой плотности бумаги по всей толщине изоляции из (1)

$$rE_m = r'_1 E_1 = r'_2 E_2 = \dots \quad (4)$$

б) При слоях с различной плотностью бумаги из (2)

$$\varepsilon_1 r E_m = \varepsilon_2 r_1 E_1 \quad (5)$$

[в этом случае внутри слоя изоляции с одинаковой плотностью бумаги толщины бумажных лент выбираются по (4)].

Здесь r, r'_1, r'_2 — радиусы слоев изоляции с различными толщинами бумажных лент, для которых либо при промышленной частоте, либо при импульсах допустимы напряженности E_m, E_1, E_2 и т. д.; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — эквивалентные диэлектрические проницаемости слоев изоляции из бумажных лент различных плотностей.

Рационально выбранная таким образом конструкция изоляции в значительной степени может снизить необходимое количество бумажных лент для данной толщины изоляции, что в свою очередь облегчит задачу создания плотной изоляции за один проход изолирования². Кроме этого, применение тонких бумажных лент позволит снизить применяемые в настоящее время толщины изоляции для всех кабелей, начиная от 20 кВ.

Если принять одинаковый запас прочности по установившемуся значению пробивных градиентов по кривым рис. 7, то при применении бумаг толщиной 0,014 мм рабочий градиент в изоляции кабеля может быть доведен по крайней мере до 15 кВ/мм.

Наряду с этим необходимо проанализировать вопрос об уровне изоляции кабеля по импульсному пробивному напряжению. Для этой цели необходимо установить величины как коммутационных, так и атмосферных перенапряжений. Дело в том, что в кабельной линии могут иметь место

² В месте перемены направления наложения бумажных лент толщина зазора равна толщине двух лент. В целях уменьшения толщины этого зазора необходимо последнюю ленту данного направления и первую ленту последующего направления выбирать таким образом, чтобы сумма их толщин была не более толщины одной ленты, принятой для слоя изоляции в месте перемены направления.

главным образом коммутационные перенапряжения, а атмосферным перенапряжениям подвергаются лишь небольшие концевые участки. Вследствие этого нет нужды рассчитывать изоляцию кабеля по всей линии по предельному импульсному напряжению. По предельному импульсному напряжению должны рассчитываться только концевые участки кабельной линии.

Закключение. Анализ современных конструкций сверхвысоковольтных кабельных линий позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее рациональным является применение маслонаполненных кабелей среднего и высокого давлений. Допустимые температуры нагрева этих кабелей 75 ... 85° С. Кабельные линии высокого давления имеют более простую систему подпитки маслом, но в то же время более жесткую конструкцию всей линии и более сложную конструкцию концевых муфт. В ряде случаев особенно нежелательна жесткость конструкции в этой системе при переходе от стального трубопровода к концевым муфтам. Разрабатываемые в настоящее время фарфоровые покрышки для рабочих давлений до 15 и даже до 25 атм в значительной степени упростят конструкцию концевых муфт для кабельной линии высокого давления.

Кабельные линии среднего давления имеют более гибкую конструкцию, но требуют установки стопорных муфт и подпитывающих баков давления по трассе прокладки кабелей. Применяемый в настоящее время способ укладки стопорных муфт и баков непосредственно в земле уменьшает стоимость этих линий, а применение баков давления «с начальным давлением» уменьшает число их, необходимое для обеспечения подпитки.

Вследствие изложенного кабели высокого давления наиболее пригодны для длинных линий в мало пересеченной местности с небольшой загрузкой подземными коммуникациями.

Кабели среднего давления в свинцовой усиленной оболочке имеют большие преимущества для сравнительно коротких линий, особенно в том случае, если не требуется установки стопорных муфт. При подпитке маслом с двух сторон длина подпитываемого участка может достигать 3 км при принятых диаметрах каналов 12 ... 19 мм, выбираемых в зависимости от рабочего напряжения кабеля и длины кабельной линии.

Величина рабочего напряжения, допустимого для этих типов кабелей, ограничивается в первую очередь достижимым значением величины диэлектрических потерь в изоляции кабеля при рабочей температуре.

При современных режимах технологии производства маслонаполненных кабелей и достигнутом качестве изоляционных материалов — масла и кабельной бумаги диэлектрические потери для готового кабеля при температурах до 80° С выражаются величиной 0,0030 ... 0,0040.

Потери в изоляции определяются следующим выражением:

$$P_g = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta. \quad (6)$$

Из этого уравнения следует, что эти потери быстро растут с повышением напряжения и могут

быть уменьшены только либо путем уменьшения емкости C , что ведет к нежелательному увеличению толщины изоляции, либо путем уменьшения величины $\operatorname{tg} \delta$.

Подсчеты показывают, что для кабеля 420 кв при указанном выше значении $\operatorname{tg} \delta$ и нормально принятых условиях прокладки в земле с окружающей температурой 15°C примерно одна треть расчетного перепада температур определяется потерями в изоляции.

В силу указанного при повышении рабочего напряжения полезная нагрузка кабеля будет быстро снижаться. Выходом из этого положения являются дальнейшее снижение диэлектрических потерь в изоляции кабеля и, вероятнее всего, применение искусственного охлаждения кабеля в процессе его эксплуатации путем циркуляции охлажденного масла или другим каким-либо способом.

2. Кабели давления овальной формы, работающие при внешнем давлении газа 15 атм с усиленной свинцовой оболочкой в качестве мембраны, имеют преимущество перед маслonaполненными кабелями в отношении более простого способа поддержания давления в системе. Для предупреждения стекания пропиточного состава изоляция в этих кабелях пропитывается вязким составом, получаемым в ряде случаев путем добавления к маслу полиизобутилена. Кабели этого типа могут быть выполнены как с усиленной второй защитной свинцовой оболочкой круглой формы, так и путем протягивания их в стальной трубопровод.

Однако эти системы имеют сложную конструкцию концевых муфт, которая может быть в значительной степени упрощена путем применения фарфоровых покрышек, способных длительно работать при внутреннем давлении 15 атм.

Кроме этого, при снижении давления газа пробивное напряжение изоляции кабелей этого типа резко снижается, хотя по утверждению ряда авторов снижение пробивного напряжения невелико в первые 24 часа после снижения давления. Даже в этом случае приходится принимать меры к ликвидации течи газа в течение этого времени с тем, чтобы предотвратить необходимость в отключении линии. Несмотря на эти недостатки, кабели этого типа могут быть с успехом применены в

ряде случаев, где по тем или иным причинам нежелательно применение большого количества масла.

Заслуживают несомненного внимания появившиеся в последнее время конструкции, в которых свинцовая усиленная оболочка поверх изоляции заменена непрерывной усиленной полиэтиленовой оболочкой. Однако в связи с тем, что полиэтилен при наличии температурных колебаний будет в некоторой степени пропускать газ при длительной эксплуатации, это может привести к нежелательному снижению электрической прочности изоляции кабеля как при промышленной частоте, так и при импульсах. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

3. Газонаполненные кабели не получили достаточного распространения даже для напряжений 110 ... 138 кв. Объясняется это тем, что кабели этого типа, несмотря на наличие давления 15 атм, имеют значительно меньшую электрическую прочность по сравнению с ранее рассмотренными типами кабелей. Это обстоятельство вызывает необходимость в применении больших толщин изоляции, не оправдываемых некоторыми упрощениями в эксплуатационных условиях. Однако в некоторых случаях, как, например, при прокладке длинных подводных кабельных линий, кабели этого типа с изоляцией из предварительно пропитанной бумаги имеют несомненное преимущество. Это преимущество заключается в возможности изготовления таких кабелей очень большой длины, так как отпадает необходимость в сушке и пропитке изоляции кабеля.

Литература

1. L. Domenach. Кабели 220...400 кв. Доклад на конференции в Париже в 1954 г.
2. A. L. Ashton. Маслонаполненные кабели. El. Rev., т. 155, стр. 547, № 15, 1954.
3. S. T. Franks. Маслонаполненный кабель высокого давления на 230 кв в трубопроводе. El. World, т. 142, стр. 76. № 22, 1954.
4. L. G. Brazier. Кабели для передачи энергии в США и Англии. Engineering Journal, № 7, 1955.
5. Полводный газонаполненный кабель. El. Rev., т. 156, № 16, 1955.
6. Трехжильный маслонаполненный кабель 110 кв фирмы Хенлей для Балтимора. Distribution of Electricity, т. XXVII, № 208, 1955.

[18.6.1956]



Двухпоточная электропередача механической мощности

Доктор техн. наук, проф. Н. С. СИУНОВ и кандидат техн. наук Л. Н. КУБРАКОВ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Создание бесступенчатой электропередачи для различных самоходных колесно-гусеничных механизмов является одной из актуальных проблем машиностроения. Наиболее простой электропередачей являются совместно работающие генератор и двигатель, которые конструктивно могут быть объединены в одну машину.

В этом отношении безусловный интерес представляет исследование С. П. Лебедевым и Е. С. Бибиковым [Л. 1, 2] «динамоэлектрической

передачи „ДЭМ-Л” с общей двоянной магнитной системой.

Передача, представляющая конструктивное объединение генератора и двигателя, состоит из внутреннего вращающегося якоря генератора постоянного тока, наружного вращающегося якоря двигателя постоянного тока и расположенной между ними неподвижной полюсной системы, собранной на общем ядре.

Принципиальным недостатком этой передачи

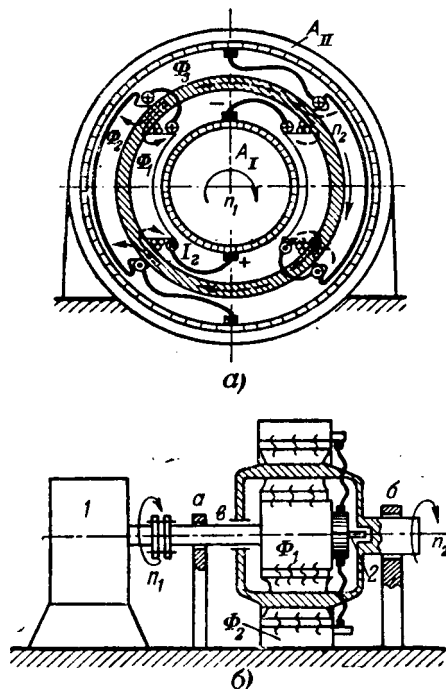


Рис. 1. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы двухпоточной передачи.

A_I — якорь генератора; A_{II} — якорь двигателя; Φ_1 — магнитный поток полюса генератора; Φ_2 — магнитный поток полюса двигателя; Φ_3 — магнитный поток в общем яме полюсов; n_1 — скорость вращения первичного двигателя и якоря генератора; n_2 — скорость вращения вторичного вала и полюсной системы передачи; а, б, в, з — подшипниковые узлы электропередачи.

является неиспользование электромагнитного момента генератора для непосредственной передачи механическим путем части мощности первичного двигателя к исполнительному механизму, как это, в частности, имеет место в электромашиных муфтах [Л. 3 ... 5].

Очевидно более рациональной должна явиться электропередача, в которой только часть энергии подвергается двойному преобразованию в генераторе и двигателе, а остальная энергия передается от первичного двигателя к исполнительному механизму посредством электромагнитного момента генератора.

Подобного рода электропередача¹, использующая принцип действия электромашиной муфты [Л. 3 ... 5], была сконструирована и испытана в лаборатории электрических машин Уральского политехнического института им. Кирова.

Электропередача (рис. 1) представляет собой совместно встроенные машины постоянного тока: генераторную часть (она же электромашиная муфта) и двигательную часть с неподвижным якорем. Расположение их концентрическое; полюсная система смонтирована между якорями на общем яме и связана с валом исполнительного механизма. Первичный двигатель 1 приводит во вращение якорь генераторной части.

Поддержание постоянства отбираемой мощности первичного двигателя при постоянной ско-

рости n_1 сводится к постоянству его вращающего момента M_1 , так как

$$P_1 = AM_1 n_1 = \text{const},$$

где P_1 — мощность первичного двигателя;
 A — постоянный коэффициент.

В свою очередь, такое условие выполняется, если тормозящий электромагнитный момент генератора M_I будет постоянным, причем

$$M_I = M_1 - \Delta M_1,$$

где ΔM_1 — сумма моментов вспомогательных механизмов, механических потерь и потерь в стали генератора (предварительно принимается постоянной).

Условие постоянства M_I более универсальное, чем условие постоянства мощности генератора $P_2 = E_2 I_2$, так как последнее справедливо только для работы генератора электрической мощности, в то время как в электромашиной муфте при постоянных скорости и моменте первичного двигателя с изменением скорости вторичного вала изменится перераспределение передаваемой механической мощности и вырабатываемой электрической мощности в муфте.

Как известно,

$$M_I = c_{m1} I_2 \Phi_1,$$

где c_{m1} — постоянный коэффициент.

Отсюда $I_2 \Phi_1 = \text{const}$, что и выражается гиперболической зависимостью.

В этом случае, при изменении тока нагрузки I_2 электромагнитный момент M_I , а также момент первичного двигателя M_1 будут постоянны. В случае электромашиной муфты этот постоянный момент будет передаваться на вторичный вал.

Практически муфта с идеальной гиперболической характеристикой одиночно работать не может, так как удовлетворяет лишь одному конкретному значению момента сопротивления на вторичном валу. Однако если параллельно с механической работой электромашиной муфты производить отбор электрической мощности от нее, как от генератора, используя эту мощность на создание дополнительного момента на вторичном валу, то станет возможным удовлетворить в пределах регулирования любые нагрузки на вторичном валу. Конечно, при этом требуется такой двигатель передачи, чтобы суммарный момент от

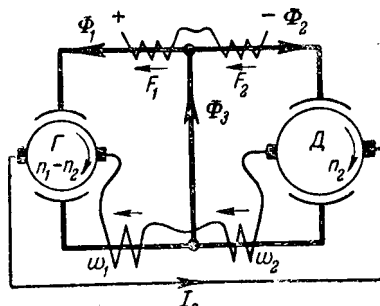


Рис. 2. Схема электрической и магнитной цепей передачи. Г — генераторная часть передачи; Д — двигательная часть передачи; F_1 и F_2 — н. с. независимого возбуждения генератора и двигателя; ω_1 и ω_2 — витки обмоток последовательного возбуждения генератора и двигателя.

¹ Идея электропередачи была предложена Л. Н. Кубраковым.

муфты и двигателя обеспечивал гиперболическую механическую характеристику на вторичном валу:

$$P_2 = AM_2 n_2 = A(M_I + M_{II}) n_2 = \text{const},$$

где P_2 — полезная мощность на вторичном валу;
 M_2 — момент сопротивления на вторичном валу;

M_{II} — момент двигателя передачи.

Данному условию наиболее удовлетворяет двигатель последовательного возбуждения, с дополнительной размагничивающей обмоткой параллельного или независимого возбуждения.

Принципиальная схема электропередачи приведена на рис. 2.

Предлагаемая электропередача с автоматическим регулированием постоянства передаваемой механической мощности нами названа «электрический трансформатор механической мощности (ЭТММ)».

Передача мощности первичного двигателя в этой электропередаче происходит несколькими путями.

1. Передача электромагнитным моментом генератора (электромашина муфта)

$$M_I = c_m \Phi_1 I_2. \quad (1)$$

Мощность, передаваемая этим моментом на вторичный вал:

$$P_I = AM_I n_2. \quad (2)$$

2. Преобразование в генераторе механической мощности в электрическую и вторичное ее преобразование в механическую в двигателе.

В электрическую энергию преобразуется часть мощности первичного двигателя

$$P_g = AM_I (n_1 - n_2), \quad (3)$$

определяемая моментом генератора, его относительной скоростью якоря и числом полюсов. В двигателе эта энергия за вычетом электрических потерь преобразуется в механическую мощность, передаваемую на вторичный вал:

$$P_{II} = P_g - \Delta P_g = AM_{II} n_2. \quad (4)$$

3. Передача через силы трения щеточного устройства генератора, совместных подшипников якоря генератора и вторичного вала (в, г на рис. 1), передача через момент потерь в стали генератора на перемагничивание.

Если ΔM_{Imp} — момент от трений, то на вторичный вал будет передана мощность

$$P_{Imp} = A \Delta M_{Imp} n_2. \quad (5)$$

Также будет передана мощность через момент потерь в стали ΔM_{Icm} :

$$P_{Icm} = A \Delta M_{Icm} n_2. \quad (6)$$

Передача мощности с первичного вала на вторичный сопровождается потерями. Электрические потери учтены в (4):

$$\Delta P_g = I_2^2 R + I_2 \Delta U_{uc}. \quad (7)$$

Часть потерь от различных трений между первичным валом и неподвижными частями определяется как

$$\Delta P_{mp} = A \Delta M_{mp} n_1, \quad (8)$$

где ΔM_{mp} — момент трений на первичном валу.

Потери от момента трений ΔM_{Imp} в муфте составляют:

$$\Delta P_{Imp} = A \Delta M_{Imp} (n_1 - n_2). \quad (9)$$

Аналогично от перемагничивания в генераторе:

$$\Delta P_{Icm} = A \Delta M_{Icm} (n_1 - n_2). \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) показывают, что потери в генераторной части, рассматриваемой электропередачи (ЭТММ) по сравнению с потерями в генераторе в схеме генератор — двигатель меньше, так как относительная скорость в первом случае меньше и равна $(n_1 - n_2)$.

Потери в передаче уменьшаются также и вследствие того, что общая установленная мощность электрических машин меньше, чем в схеме генератор — двигатель, поскольку часть энергии передается исполнительному механизму посредством электромагнитного момента генератора. Очевидно к. п. д. электропередачи (ЭТММ) будет выше, чем при схеме генератор — двигатель.

Часть полученной механической мощности на вторичном валу также пойдет в потери:

а) от трений щеточного устройства двигателя о неподвижный коллектор двигателя, в подшипниках (б на рис. 1), о воздух и т. п., с общим моментом ΔM_{2mp} :

$$\Delta P_{2mp} = A \Delta M_{2mp} n_2, \quad (11)$$

б) от перемагничивания якоря двигателя с моментом ΔM_{2cm} .

$$\Delta P_{2cm} = A \Delta M_{2cm} n_2. \quad (12)$$

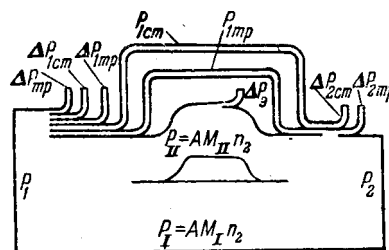


Рис. 3. Баланс мощностей в электропередаче (ЭТММ).

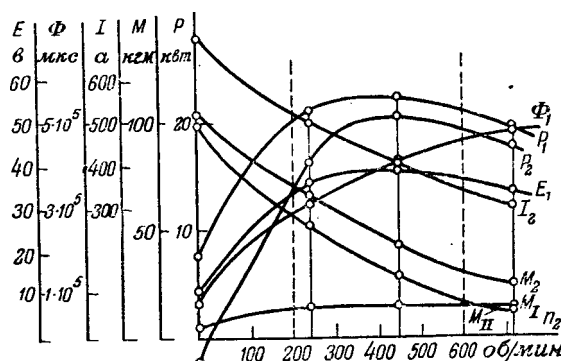


Рис. 4. Расчетные характеристики электропередачи (ЭТММ).

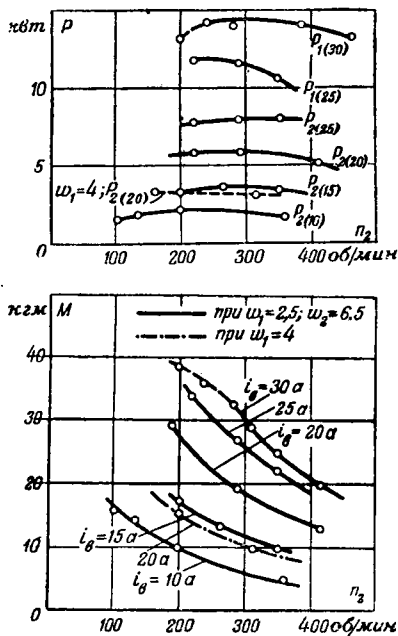


Рис. 5. Рабочие характеристики электропередачи (ЭТММ).

Отсюда баланс мощности составит:

$$P_1 = P_I + P_{II} + P_{lmp} + P_{lcm} + \Delta P_{mp} + \Delta P_{lmp} + \Delta P_{lcm} + \Delta P_{\sigma}. \quad (13)$$

Графически баланс мощности приведен на рис. 3. Соответственно можно выразить и моменты:

$$M_1 = M_I + \Delta M_{mp} + \Delta M_{lmp} + \Delta M_{lcm}, \quad (14)$$

$$M_2 = M_I + M_{II} + \Delta M_{lmp} + \Delta M_{lcm} - \Delta M_{2mp} - \Delta M_{2cm}. \quad (15)$$

Поскольку момент на вторичном валу M_2 создается суммой моментов M_I муфты и M_{II} двигателя, расчетный момент двигателя в электропередаче (ЭТММ) получается меньшим, чем в схеме генератор—двигатель, где он равен полному моменту M_2 . При работе электропередачи (ЭТММ) генератор и двигатель работают совместно, напряжение генератора уравнивается э. д. с. двигателя.

При установленном режиме э. д. с. генератора и двигателя электропередачи (ЭТММ) будут соответственно равны:

$$E_1 = c_1 \Phi_1 (n_1 - n_2) \cdot 10^{-8} [\text{В}]; \quad (16)$$

$$E_2 = c_2 \Phi_2 n_2 \cdot 10^{-8} [\text{В}]. \quad (17)$$

Из (16) и (17) с учетом падения напряжения в обмотках якорей и щеточных контактах скорость вторичного вала электропередачи

$$n_2 = \frac{c_1 \Phi_1 n_1 \cdot 10^{-8} - I_2 R - \Delta U_{\text{щ}}}{(c_1 \Phi_1 + c_2 \Phi_2) 10^{-8}} [\text{об/мин}]. \quad (18)$$

Для опытного исследования была построена электропередача мощностью $P_1 = 20 \text{ кВт}$ при $n_1 = 1480 \text{ об/мин}$. Диаметр якоря генератора 29 см; длина активной стали 7,5 см; наружный диаметр якоря двигателя 74 см; число полюсов

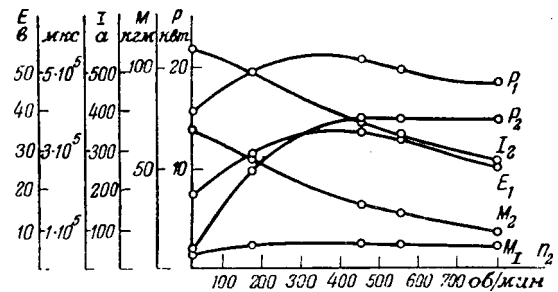


Рис. 6. Опытные характеристики электропередачи (ЭТММ).

генератора и двигателя $2p = 8$; длительный ток $I_2 = 360 \text{ А}$.

Расчет характеристик показал (рис. 4), что в намеченном диапазоне изменения скорости $n_2 = 200 \dots 600 \text{ об/мин}$, мощность первичного двигателя изменяется незначительно. В относительно узких пределах изменяется также и э. д. с. генератора E_1 , что указывает на высокое использование двигательной части электропередачи в режиме саморегулирования.

В испытуемой лабораторной установке в качестве первичного двигателя был применен асинхронный двигатель 20 кВт; нагрузкой являлись маятниковый генератор и ленточный тормоз.

Опытным путем были сняты механические характеристики и кривые мощностей при различных токах независимого возбуждения i_a в общей цепи генератора и двигателя. Полученные кривые (рис. 5) характеризуют управление мощностью, вторичной скоростью в электропередаче путем изменения тока возбуждения i_a .

Управление работой электропередачи путем изменения тока i_a является весьма экономичным и удобным в эксплуатации и для оператора.

Опытные характеристики передачи приведены на рис. 6. Как видно, полученные характеристики достаточно близко совпадают с расчетными (рис. 4), что подтверждает правильность основных положений, принятых при создании рассматриваемого типа электропередачи.

Выводы. 1. В отличие от известных электропередач [Л. 1, 2] рассмотренная передача является двухпоточной, в ней механическая мощность вторичному валу передается двумя путями: непосредственно через электромагнитный момент генератора и через двигательную часть передачи.

2. Двухпоточный принцип передачи мощности приводит к уменьшению размеров передачи и повышает эффективность ее использования по сравнению с однопоточными электропередачами.

Литература

1. С. П. Лебедев и Е. С. Бибииков. Исследование динамоэлектрической передачи с общей двояконой магнитной системой. Электричество, № 12, 1954.
2. С. П. Лебедев. К вопросу о применении электрической трансмиссии в сельскохозяйственных тракторах. Доклады ВАСХНИЛ, вып. V, 1949.
3. Е. К. Мезин. Самовозбуждающаяся муфта с коллектором. Электричество, № 7, 1952.
4. В. Н. Богоявленский. Электрические трансмиссии гусеничных и колесных машин. 1946.
5. L. Monath. ETZ, №№ 45—48, 1944.

[29. 6. 1956]

Защита шин постоянного тока на тяговых подстанциях метрополитена

Инж. В. А. ИВАНОВ и инж. К. Н. ОСКОЛКОВ

Московский метрополитен им. Ленина

Практика эксплуатации электрифицированных железных дорог и метрополитена показала, что замыкание на землю сборных шин постоянного тока тяговой подстанции по последствиям является наиболее тяжелой аварией, вызывающей разрушение и выход из строя силовой аппаратуры и участков вторичной коммутации.

Причиной тяжелых последствий является то обстоятельство, что, хотя токи замыкания на землю и достигают значительных величин (на подстанциях метрополитена нескольких тысяч ампер), защиты ртутновыпрямительных агрегатов не могут отключить сборные шины, так как сумма уставок этих защит значительно больше тока замыкания на землю.

Ввиду сказанного в настоящее время распределительные устройства 825 в всех тяговых подстанций Московского метрополитена оборудуются специальными защитами шин постоянного тока от замыкания на землю. Ввод в эксплуатацию новых подстанций без этих защит не разрешается.

При возникновении замыкания на землю в распределительном устройстве постоянного тока защита шин должна отключать все работающие ртутновыпрямительные агрегаты и быстродействующие выключатели (БДВ) фидеров, имеющих связь с шинами смежных подстанций. Кроме того, она является резервной по отношению к защите фидеров постоянного тока [Л. 1].

При нормальном режиме работы тяговой подстанции блуждающий ток, протекающий по контуру заземления, не превышает нескольких десятков ампер, а разность потенциалов между контуром заземления подстанции и отрицательной шиной — 30 ... 40 в. Замыкание на землю шин постоянного тока сопровождается резким увеличением этого тока (до 3 ... 10 кА) и этой разности потенциалов (до 500 ... 700 в). Указанное увеличение и используется для создания защиты шин 825 в.

Применяются два вида защит постоянного тока: токовая и потенциальная.

Потенциальная защита шин, описанная в книге Е. М. Зайденшнера, Б. Г. Жданова, В. М. Маранчака и др. [Л. 3], не нашла применения на тяговых подстанциях метрополитена и электрифицированных железных дорог ввиду того, что она является более сложной, чем токовая.

В настоящее время на подстанциях Московского метрополитена для защиты шин постоянного тока применяются токовая защита, предложенная Центральным научно-исследовательским институтом Министерства путей сообщения [Л. 4], несколько измененная в части типа и включения первичных реле, а также вольтметровая направленная защита.

Принципиальная схема включения первичных реле токовой защиты дана на рис. 1. Ток, протекающий по контуру заземления при замыкании на землю шин постоянного тока, создаст условия для работы реле PT_1 и PT_2 . Сечение шин контура заземления получается путем расчета, оно обычно равно $4 \times 50 \dots 5 \times 60 \text{ мм}^2$, а длины участков контура, к которым, как к шунтам, подключаются реле PT_1 и PT_2 , — 0,5 ... 1,5 м в зависимости от необходимой уставки.

Реле PT_1 и PT_2 замыкают свои нормально открытые контакты и подают возбуждение на катушку реле времени, которое срабатывает через некоторый промежуток времени и подает питание на ряд промежуточных реле. Промежуточные реле, в свою очередь, подают импульс на отключение масляных выключателей всех ртутновыпрямительных агрегатов и БДВ всех фидеров постоянного тока.

Элемент времени введен в схему для того, чтобы защита шин постоянного тока работала селективно с БДВ и защитами фидеров 825 в, а также с учетом времени действия блокировки (отключение по цепям связи БДВ фидеров соседней тяговой подстанции, питающих участки контактной сети параллельно с БДВ данной тяговой подстанции).

В качестве реле PT_1 и PT_2 применены реле типа ЭТ-521/100. Реле заземления, применяемые в схеме Центрального научно-исследовательского института [Л. 5], имеют ряд недостатков по сравнению с реле типа ЭТ-525/100. К этим недостаткам относятся: низкий коэффициент возврата, отсутствие возможности менять уставку, менее надежная, чем у реле ЭТ, контактная система. Кроме того, они имеют ряд конструктивных недостатков.

В зону действия защиты шин постоянного тока входит вся аппаратура распределительного устройства 825 в, кроме аппаратов, установленных на щите управления (килоамперметры). Если

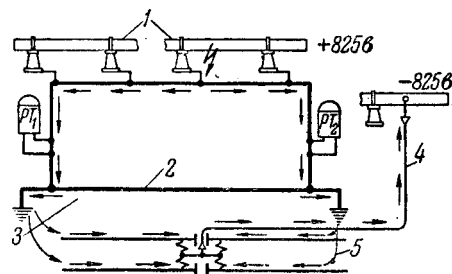


Рис. 1. Принципиальная схема включения реле токовой защиты шин 825 в.

PT_1 и PT_2 — токовые реле; стрелками указано протекание тока при перекрытии шины 825 в на землю; 1 — сборная шина постоянного тока; 2 — главная шина заземления подстанции; 3 — наружный контур заземления; 4 — отсасывающие кабели; 5 — ходовые рельсы.

броня катодных кабелей и кабелей фидеров присоединена к контуру заземления выше места присоединения к нему реле PT_1 и PT_2 , то защита шин является резервной по отношению к защите указанных кабелей.

Уставка реле PT_1 и PT_2 задается для таких условий повреждения, при которых растекание токов по armатуре и другим путям (помимо шин контура заземления, к которым присоединены реле PT_1 и PT_2) является максимальным.

Ток уставки должен задаваться с учетом некоторого коэффициента надежности k_s по отношению к минимальному току, протекающему по участкам контура заземления при перекрытии на землю в распределительном устройстве 825 в, т. е.

$$I_{уст} = \frac{I_{к.з. мин}}{k_s}$$

Коэффициент k_s не должен быть меньше 2...3.

Нижний предел уставки должен быть таким, чтобы гарантировалась невозможность ложной работы защиты от блуждающих токов.

Практически уставка по току защиты шин постоянного тока наземных тяговых подстанций лежит в пределах 120...300 а.

Уставка по времени защиты шин постоянного тока

$$t_{з.ш} = t_{з.к} + t_0 + \Delta t,$$

где $t_{з.к}$ — время действия защиты кабеля 825 в;

t_0 — время действия блокировки между БДВ фидеров;

Δt — запас, равный интервалу селективности.

Учитывая, что $t_{з.к} = 0,3 \dots 0,35$ сек $t_0 = 0,3 \dots 1,1$ сек (в зависимости от аппаратуры, применяемой в схеме блокировки) и $\Delta t = 0,7$ сек, $t_{з.ш}$ будет равно 1,4...2,1 сек.

До включения защиты в эксплуатацию следует исследовать токораспределение в контуре заземления распределительного устройства 825 в.

При эксплуатации защиты следует помнить о недопустимости использования контура зазем-

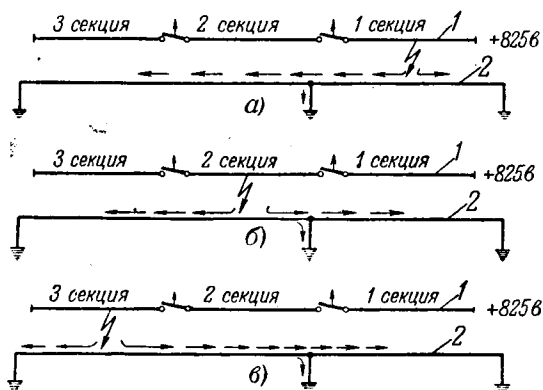


Рис. 2. Распределение токов в контуре заземления трехсекционной тяговой подстанции при перекрытии на землю.

а — на первой секции шин 825 в; б — на второй секции; в — на третьей секции; 1 — шины 825 в подстанции; 2 — контур заземления.

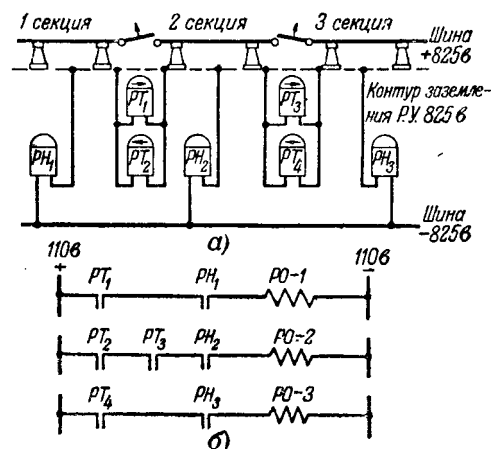


Рис. 3. Схема включения реле защиты шин 825 в трехсекционной тяговой подстанции.

PH_1, PH_2, PH_3 — реле напряжения; PT_1, PT_2, PT_3, PT_4 — поляризованные токовые реле; стрелки показывают направление тока, при котором реле PT замыкают контакты; $PO-1, PO-2, PO-3$ — выходные реле 1, 2 и 3 секций шин подстанции.

ления тяговой подстанции в качестве одного из проводов при сварке, так как при этом возможна ложная работа защиты шин.

На подстанциях, имеющих более одной секции шин постоянного тока, описанная схема защиты не может быть применена, так как в случае замыкания шин на землю она будет отключать не одну поврежденную секцию, а все секции шин.

На рис. 2 дано распределение токов повреждения при замыканиях на разных секциях шин 825 в трехсекционных подстанций. На таких подстанциях Московского метрополитена для защиты шин постоянного тока применяется вольтметровая направленная защита¹.

Как уже было сказано ранее, замыкание на землю какого-либо элемента распределительного устройства 825 в вызывает повышение потенциала между контуром заземления и отрицательной шиной 825 в до 500...700 в. В то же время ток повреждения в контуре заземления распределительного устройства имеет строго определенное направление. В схеме защиты, представленной на рис. 3, используются эти два обстоятельства.

Как видно из принципиальной схемы защиты (рис. 3, а), на каждой секции шин установлено по одному реле напряжения (PH_1, PH_2, PH_3) типа ЭН-526/400, катушки которых включены между контуром заземления и отрицательной шиной 825 в. Реле напряжения фиксируют наличие повышения напряжения и предотвращают ложные действия защиты при прохождении по контуру заземления блуждающих токов. Кроме этого, на участках контура заземления между секциями I—II и II—III установлены токовые поляризованные реле PT_1, PT_2, PT_3 и PT_4 типа РП-7, которые выбирают поврежденную секцию. Правильность действия защиты (отключение только поврежденной секции) обеспечивается последова-

¹ Схема этой защиты для трехсекционных подстанций метрополитена предложена В. А. Ивановым, К. Н. Осколковым и А. Ф. Пальтовым.

тельным включением контактов реле напряжения токовых поляризованных реле.

Действительно, при повреждении на секции II шин (рис. 3,б) замкнутся контакты реле PH_1 , PH_2 , PH_3 , PT_2 , PT_3 , а контакты реле PT_1 и PT_4 останутся разомкнутыми. В результате будет создана цепь, по которой подается импульс на срабатывание реле PO_2 . Последнее через ряд промежуточных аппаратов отключает оборудование секции II. Анализ поведения реле при повреждении на секции I или III показывает, что и в этих случаях защита будет работать правильно.

Каждая секция шин 825 в имеет свой комплект защиты, установленный в отдельном релейной шкафу. Шкафы установлены в машинном зале. Сигнальные приборы (лампы, сигнализирующие о наличии напряжения на оперативных цепях и о действии защиты), а также деблокирующие кнопки установлены на панели щита управления.

Выше говорилось о необходимости исследовать распределение тока повреждения между ответвлениями от контура заземления распределительного устройства к главной шине заземления подстанции. Это исследование позволяет проверить качество сварки на ответвлениях от контура заземления распределительного устройства к заземленным частям аппаратуры. По результатам исследования принимается решение о возможности ввода в эксплуатацию защиты и задаются уставки токовых реле.

Исследование проводится в ночное время, когда движение поездов отсутствует. Во время исследования схемы фидеров 825 в, ртутновыпрямительных агрегатов и форкамеры должны быть полностью разобраны, а отсасывающий кабель присоединен к шине 825 в и в туннеле. Схема исследования показана на рис. 4.

Предварительно определяют цену деления милливольтметров 7 и 8, подключенных к участкам шин контура заземления. Это определение производится по схеме рис. 5, причем в одном месте (выше или ниже точек присоединения проводов аккумуляторной батареи) шина заземления должна быть разорвана. Через испытуемый уча-

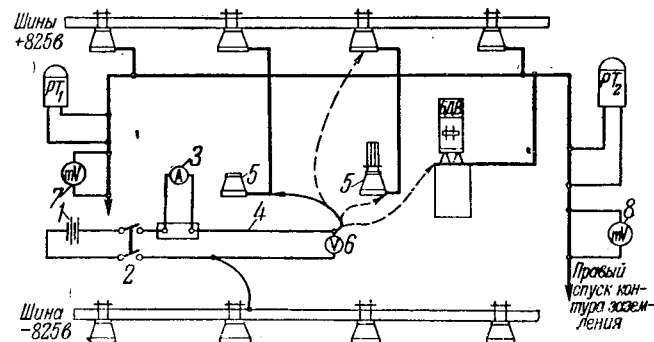


Рис. 4. Схема испытания контура заземления распределительного устройства 825 в тяговой подстанции.

1 — аккумуляторная батарея (6 в) типа 5НКН-45; 2 — двухполюсный рубильник на 200 а; 3 — амперметр с наружным шунтом на 200 а; 4 — гибкий провод 1×25 мм²; 5 — опорный изолятор; 6 — вольтметр на 15 в; 7 и 8 — милливольтметры 35 ... 45 мв (типа М-15 или М-16).

сток шины пропускается ток 50 ... 150 а и производится измерение падения напряжения на этом участке. Цена деления милливольтметра 4

$$I_o = \frac{I}{U},$$

где I — ток, измеренный прибором 2;

U — напряжение, измеренное прибором 4, мв.

После определения цены деления места разрывов контура заземления завариваются. Отрицательная шина 825 в соединяется с одноименным полюсом аккумуляторной батареи, а положительный полюс батареи соединяется со всеми заземленными основаниями аппаратов распределительного устройства 825 в, которые в рабочем состоянии имеют потенциал 825 в.

Для каждой точки измеряют общий ток (прибор 3 на рис. 4), приложенное напряжение (прибор 6), ток, протекающий по левому участку шины заземления (прибор 7), ток, протекающий по правому участку шины заземления (прибор 8).

Данные сводятся в таблицу, и для каждой точки определяется ток растекания, т. е. ток, протекающий помимо спусков контуров заземления:

$$I_p = I_o - (I_a + I_n),$$

где I_p — ток растекания;

I_o — общий ток;

I_a — ток, протекающий по левому участку шины заземления;

I_n — ток, протекающий по правому участку шины заземления.

Далее определяют относительное значение тока растекания:

$$I_{p*} = \frac{I_o - (I_a + I_n)}{I_o} \cdot 100.$$

Если ток растекания не превышает 50 ... 70%, то к контуру заземления распределительного устройства

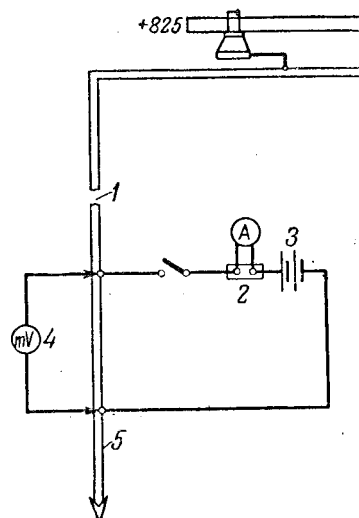


Рис. 5. Схема определения цены деления прибора, включенного на участок шины контура заземления.

1 — разрыв; 2 — амперметр с шунтом 100 а; 3 — аккумуляторная батарея 6 в типа 5НКН-45; 4 — милливольтметр 150 мв типа М-15 или М-16; 5 — спуск контура заземления.

Упрощение пусковой автоматики синхронного двигателя

Кандидат техн. наук М. М. ФАРХАДЗАДЕ и инж. М. Н. АЛИЕВ

г. Баку

Сложность пусковой автоматики синхронных двигателей и компенсаторов в значительной мере зависит от выбора способа подачи возбуждения ротора. В настоящее время на нефтепромыслах для пуска синхронного двигателя СМ-540-750 служит станция управления серии СНЛ-7301, которая осуществляет управление возбуждением синхронного двигателя путем переключения его обмотки с разрядного сопротивления на источник питания или, наоборот, с источника питания на разрядное сопротивление.

Наличие такой схемы пуска синхронных двигателей и компенсаторов в нефтепромысловых условиях является сложным, требует квалифицированного персонала и значительно снижает надежность эксплуатации.

Следует также отметить, что существующие защиты, встроенные в магнитные станции, вызывают отключение двигателя от сети при кратковременном понижении напряжения до 65...75% номинального без всякой к тому необходимости, при далеких коротких замыканиях в системе, в то время как синхронные двигатели, работающие с номинальной нагрузкой, при наличии форсировки возбуждения выпадают из синхронизма только при напряжениях ниже 50%.

Поэтому с целью упрощения схемы автоматизации пуска двигателей, работающих в качестве привода поршневых насосов на буровых и установках вторичного метода эксплуатации, был произведен ряд опытов на действующих установках нефтяной промышленности, которые сопровождалось осциллографированием кривых изменения напряжения и тока в обмотке статора и ротора при рабочем и пусковом режимах.

Опыты были произведены с синхронными двигателями СМ-540-750 мощностью 401 кВт, 6 кв, 750 об/мин, $\cos \varphi = 0,8$ завода «Электросила» с возбудителем ВС-24,5/18 мощностью 11 кВт, 50 в, установленным на одном валу с двигателем. Двигатели были предназначены для привода поршневых насосов типа У-8-3 (производитель-

ность 35 л/сек, давление 65 ат, число ходов поршня в 1 мин 53, ход поршней 450 мм, скорость вращения клиноременного шкива 300 об/мин); поршневой насос был включен на общий трубопровод для параллельной работы с другими насосами. Электромеханическая постоянная времени агрегата двигатель — поршневой насос составляла 5...6 сек.

Пуск двигателя был произведен непосредственно от сети при открытой задвижке насоса (рабочая мощность 330 кВт) с автоматической подачей возбуждения при помощи станции СНЛ-7301 по достижению двигателем подсинхронной скорости. Кроме этого, был произведен пуск двигателя с глухо подключенным возбудителем при открытой задвижке насоса. При этом положение шунтового реостата соответствовало рабочему положению, т. е. номинальной нагрузке возбудителя.

Процесс втягивания двигателя в синхронизм произошел плавно, без каких-либо толчков. Пусковой ток двигателя практически не изменился по сравнению с пуском, когда обмотка ротора была замкнута на разрядное сопротивление.

На рис. 1...4 приведены осциллограммы пуска по заводской схеме и при глухо подключенном возбудителе.

Результаты испытаний приведены в таблице.

Схема пуска синхронного двигателя	Кратность тока статора при включении K_c	Длительность асинхронного хода $t_{ас}$, сек
По заводской схеме с магнитной станцией СНЛ-7301	3,7	3,7
То же, с интервалом АПВ 1,16 сек	5,1	0,7
Возбудитель глухо подключен к обмотке ротора	3,75	5,0
То же, с интервалом АПВ 1,23 сек	5,2	1,8

тельного устройства 825 в могут быть присоединены токовые реле защиты.

Для определения уставок реле по току токи, полученные при опыте, пересчитываются на напряжение 825 в и вводится коэффициент запаса:

$$I_{р.п} = \frac{I_{н.мин} \cdot 825}{k_3 U_0}, \quad I_{р.л} = \frac{I_{л.мин} \cdot 825}{k_3 U_0},$$

где $I_{р.п}$ — уставка реле по току правого участка;

$I_{р.л}$ — уставки реле по току левого участка;

$I_{н.мин}$ — минимальный ток правого участка;

$I_{л.мин}$ — минимальный ток левого участка;
 U_0 — напряжение, измеренное прибором 6;
 k_3 — коэффициент запаса, $k_3 = 2...3$.

Литература

1. Е. И. Горин и К. Н. Осолков. Кабели 825 в и их защита. Электричество, № 5, 1951.
2. Л. Б. Кротов. Борьба за уменьшение блуждающих токов на Московском метрополитене. Издательство МХХ РСФСР, 1956.
3. Е. М. Зайдешнер, Б. Г. Жданов и В. М. Маранчак и др. Энергоснабжение. ГТЖИ, 1939.
4. Л. О. Грубер, Л. М. Перцовский и В. И. Трофимов. Устройство, эксплуатация и ремонт тяговых подстанций. ГТЖИ, 1954.
5. И. Я. Рышковский и К. Г. Кучма. Тяговые подстанции. ГТЖИ, 1953.

[14. 3. 1956]

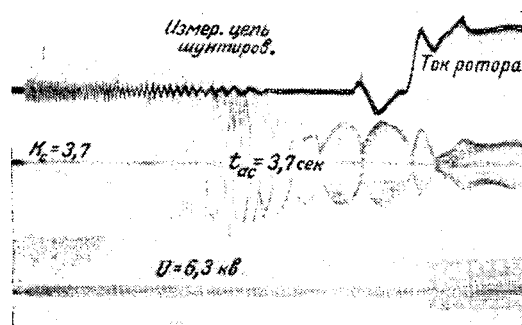


Рис. 1. Осциллограмма пуска синхронного двигателя CM-540-750 по заводской схеме (с магнитной станцией СНЛ-7301).

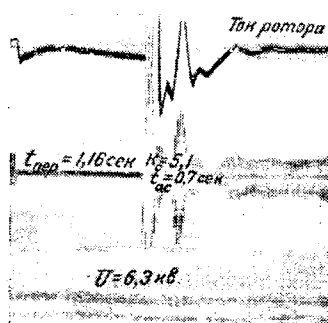


Рис. 2. Осциллограмма пуска синхронного двигателя CM-540-750 по заводской схеме с интервалом АПВ 1,16 сек.

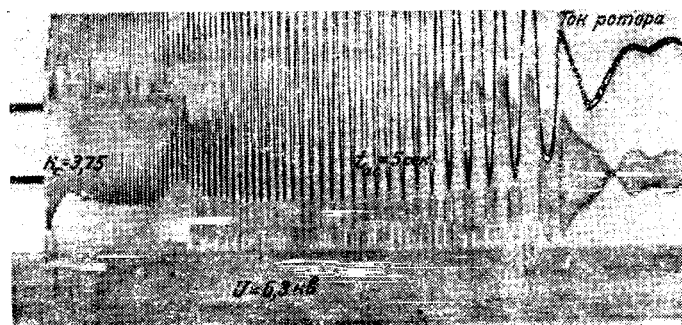


Рис. 3. Осциллограмма пуска синхронного двигателя CM-540-750 с глухо подключенным возбудителем.

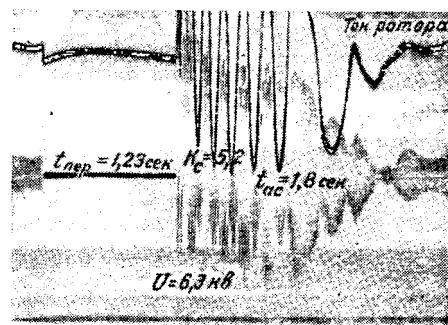


Рис. 4. Осциллограмма пуска синхронного двигателя CM-540-750 с глухо подключенным возбудителем (с интервалом АПВ 1,23 сек).

При всех произведенных опытах заметного изменения напряжения на зажимах двигателя не наблюдалось.

Кратность тока ротора в асинхронном режиме при включении синхронного двигателя CM-540-750 с глухо подключенным возбудителем мало отличалась от таковой при пуске по заводской схеме (с магнитной станцией СНЛ-7301).

Из анализа результатов произведенных опытов следует, что для привода поршневых насосов и установок вторичного метода эксплуатации схема пуска синхронного двигателя должна быть выполнена с постоянно подключенным возбудителем к обмотке ротора без всяких промежуточных аппаратов. При этом реостат возбуждения возбудителя должен находиться в рабочем положении.

Поскольку применяемые для привода поршневых насосов двигатели CM-540-750 на буровых работают периодически, то для повышения энергетических показателей электрохозяйства и напряжения сети во время длительного простоя насосов, как правило, их используют в качестве синхронных компенсаторов. При этом двигатели при помощи муфт разъединяются с поршневыми насосами, вследствие чего время выбега двигателей достигает 40 ... 50 сек. Для таких двигателей необходимо предусмотреть автомат гашения поля путем включения сопротивления в цепь возбуждения, равное десятикратному сопротивлению обмотки возбуждения.

Указанное мероприятие и применение форсировки возбуждения позволяет повысить устойчивость работы как самого двигателя, так и электросети нефтепромысловых установок при кратковременных понижениях напряжения в сети. Поэтому целесообразно отказаться от установки для таких синхронных двигателей защиты минимального напряжения и предусмотреть установку токовых реле с ограничением зависимой характеристикой, что обеспечит также отключение двигателей при выпадении из синхронизма.

Выводы. Пуск синхронного двигателя CM-540-750 должен осуществляться с глухо подключенным возбудителем, а в случае использования его в качестве синхронного компенсатора следует предусмотреть автомат гашения поля путем включения сопротивления в цепь возбуждения возбудителя. Необходимо также предусмотреть устройство для форсировки возбуждения.

Литература

1. Повышение надежности работы электродвигателей. Информационные материалы ЦНИЭЛ, № 5. Госэнергоиздат, 1955.
2. И. А. Сыромятников. Требования к синхронным двигателям и их схемам управления и защиты. Электричество, № 5, 1953.
3. С. А. Мотыгина и Г. Ф. Беличенко. Требования к синхронным двигателям, их схемам управления и защиты. Электричество, № 8, 1954.

[23. 5. 1956]

Применение униполярной машины для измерения скорости вращения

Инж. В. И. ДОЛИНА

ЦИНЭЛ МЭС

При исследовании механических параметров машин довольно часто приходится регистрировать их скорость вращения в установившихся и переходных режимах.

Для того чтобы датчик удовлетворял специфическим условиям, в которых приходится работать экспериментаторам, он должен удовлетворять следующим требованиям:

а) э. д. с. датчика должна быть пропорциональна скорости вращения;

б) искажения в записи, вносимые работой самого датчика должны отсутствовать;

в) должна обеспечиваться возможность работы с магнитоэлектрическим осциллографом без каких-либо дополнительных устройств и источников питания;

г) конструкция должна быть проста, надежна и иметь минимальный вес и размеры.

Из сравнения принципов работы датчиков следует, что для целей регистрации скорости вращения наиболее подходящей является униполярная машина.

Еще в технической литературе двадцатых годов [Л. 1] встречались статьи о методах измерения скольжения при помощи униполярных машин и давалось описание самой машины с ртутными контактами.

Несколько позже [Л. 2] делались попытки спроектировать и построить униполярную машину с твердыми щетками, латунным ротором и постоянными магнитами.

Поскольку э. д. с. этой машины была недостаточна для работы с осциллографом, то она

могла работать только с усилительным устройством. В [Л. 2] также описывалась конструкция униполярной машины с электромагнитами.

К сожалению, эти машины не удовлетворяли перечисленным выше требованиям и не могли быть использованы в повседневной практике экспериментаторов.

В ЦИНЭЛ были изготовлены униполярные машины с постоянными магнитами, обладающими большой коэрцитивной силой, а в качестве материала ротора применена мягкая сталь (рис. 1). Стальной ротор 15 с дюралюминиевым маслоотражательным диском 16 напрессован на ось и для лучшего контакта припаян. Ротор вращается в магнитном поле, образуемом магнитами 6 из сплава армко и состоит из верхнего ярма 5, нижнего ярма 7 и керна 4. Пути магнитного потока указаны стрелками. Для фиксации воздушного зазора, который при вставленном роторе составляет по 0,3 мм на сторону, детали 5 и 7 приклеены к магнитам при помощи смеси окиси железа с клеем БФ-2. Помимо клея, детали 5 и 7 удерживаются латунными шпильками, не указанными на схеме. Как верхнее, так и нижнее ярмо имеют центрирующие кольца, которые сочленяются с эбонитовыми крышками 3 и 8 и обеспечивают строго определенное положение подшипников 12 и 17, а следовательно, и ротора в воздушном зазоре. Таким образом, вся вращающаяся система оказывается надежно изолированной от металлических частей. На конец оси 1 и периферию ротора 15 в качестве контактных поверхностей напрессованы и припаяны серебряные кольцо и втулка. От попадания пыли и металлических опилок магнитная система и щетки защищены гетинаксовыми пластинами 10 и 13, а в месте выхода оси — сальником 18. Для соединения с валами машин, кроме комплекта сменных шкивов, которые крепятся при помощи цангового зажима, на ось может быть надет удлинитель с трехгранной пирамидкой. Удлинитель также имеет цанговый зажим и крепится при помощи той же гайки 19, что и шкив 2.

Особое внимание было уделено конструированию токосъемов, устройство которых изображено на рис. 2. Токосъем осуществляется при помощи меднографитных щеток 11 и 14 (рис. 1) марки МГ2 при нажатии 15 г/мм². В этих условиях внутреннее сопротивление машины получается равным 0,03 ом.

Щеточное устройство ротора (рис. 2,б) изготовлено так, что щетка 7 с обоймой 8 имеет очень малый зазор в направляющей втулке 6 и перемещается только в радиальном направлении. Цилиндрическая щетка срезана по краям, образуя контактную поверхность, близкую по форме к прямоугольнику размером 2 × 5 мм.

Элементы концевой щеточной системы приведены на рис. 2,а. К стальной пластинчатой

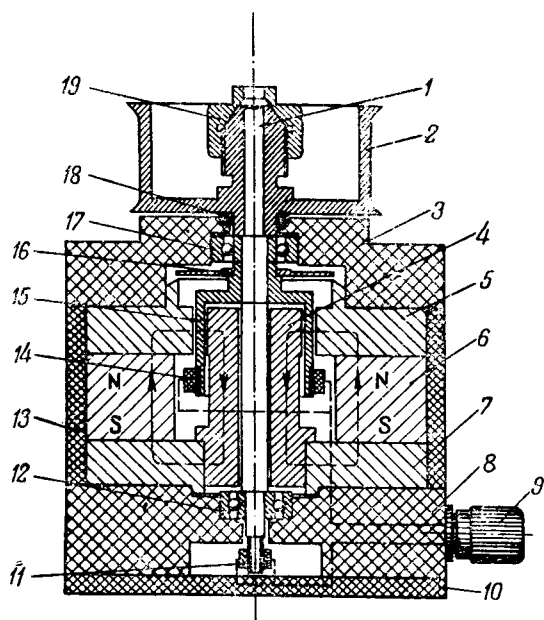


Рис. 1. Конструкция униполярной машины.

1 — ось; 2 — шкив; 3 — верхняя крышка; 4 — керн; 5 — верхнее ярмо; 6 — магниты; 7 — нижнее ярмо; 8 — нижняя крышка; 9 — клеммы; 10 — нижняя пластина; 11 — концевые щетки; 12 — нижний подшипник; 13 — боковые пластины; 14 — щетки ротора; 15 — ротор; 16 — маслоотражательный диск; 17 — верхний подшипник; 18 — сальник; 19 — гайка.

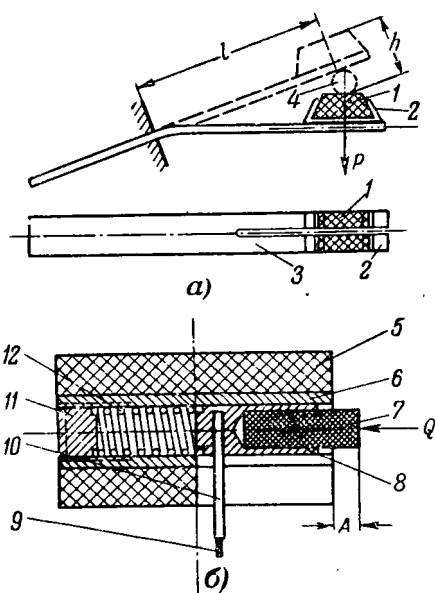


Рис. 2. Концевая щетка (а) и щеточное устройство ротора (б).

1 — щетка; 2 — обойма; 3 — пластинчатая пружина; 4 — втулка; 5 — корпус; 6 — направляющая втулка; 7 — щетка; 8 — обойма; 9 — проводник; 10 — фиксатор; 11 — нажимной винт; 12 — цилиндрическая пружина.

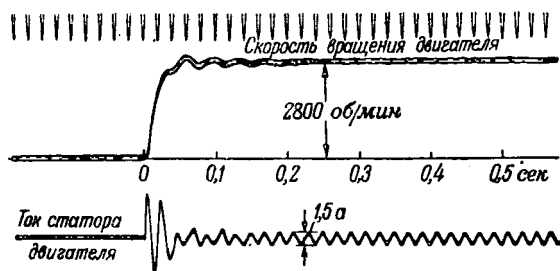


Рис. 3. Осциллограмма пуска асинхронного двигателя мощностью 0,6 квт, 2800 об/мин.

пружине 3 припаяна обойма 2 из листовой бронзы, в которую впрессована и впаяна щетка марки МГ2. Для лучшего прилегания к серебряной втулке 4 обойма, пружина и щетка распилены вдоль. Щетки ротора и щетки, прилегающие к втулке, которых всего четыре, соединены параллельно, а общие точки подключены к клеммам.

Такая конструкция щеточных устройств проработала в процессе эксплуатации машины несколько сот часов без каких-либо заметных колебаний напряжения, связанных с коммутационными процессами. Нагрев щеточных устройств не превосходил 60...70°С при работе в установившемся режиме со скоростью 7000 об/мин.

Наладка щеточных устройств производится во время сборки. При этом следят, чтобы при движении обоймы 8 в направляющей втулке 6 (рис. 2,б) не было заеданий. Щетка 7 с обоймой 8 должна перемещаться в направляющей втулке 6 плавно, а пружина 12 обеспечивать необходимое нажатие. Хорошая работа щеток во многом зависит от нажатия. Величина нажатия проверяется при помощи грузов. Перед проверкой нажатия должно быть известно, на какое расстояние А (рис. 2,б) щетка 7 выходит за плос-

кость корпуса 5, когда машина полностью собрана. Это положение щетки относительно корпуса должно быть отмечено. Для проверки нажатия щетки на контактную поверхность щеточное устройство снимают с машины и устанавливают на горизонтальную плоскость, а сверху на щетку 7 устанавливается груз Q. При заданном удельном давлении щетки на контактную поверхность величина груза Q будет определенной. Под действием этого груза и пружины 12, нажатие которой регулируется нажимным винтом 11, щетка должна опуститься до предварительно сделанной отметки. В этом положении щетки заданное нажатие будет обеспечено.

Нажатие концевой щетки (рис. 2,а) на контактную поверхность так же, как и в предыдущем случае будет определяться удельным давлением щетки. Сила нажатия подбирается изменением упругости пластинчатой пружины и может быть также проверена при помощи груза. Под действием определенного груза P при данном вылете l щетка должна отклоняться на величину h.

После сборки машины производится проверка работы щеточных устройств в установившемся режиме при помощи магнитоэлектрического осциллографа. Если последовательно с униполярной машиной включить источник питания постоянного тока, то качество работы щеток можно проверить при помощи катодного осциллографа. При правильной работе щеток и на катодном и на магнитоэлектрическом осциллографах будет наблюдаться прямая линия.

Щеточные устройства, кроме испытаний на нагрев, всесторонне проверялись в работе при пусках и выбегах.

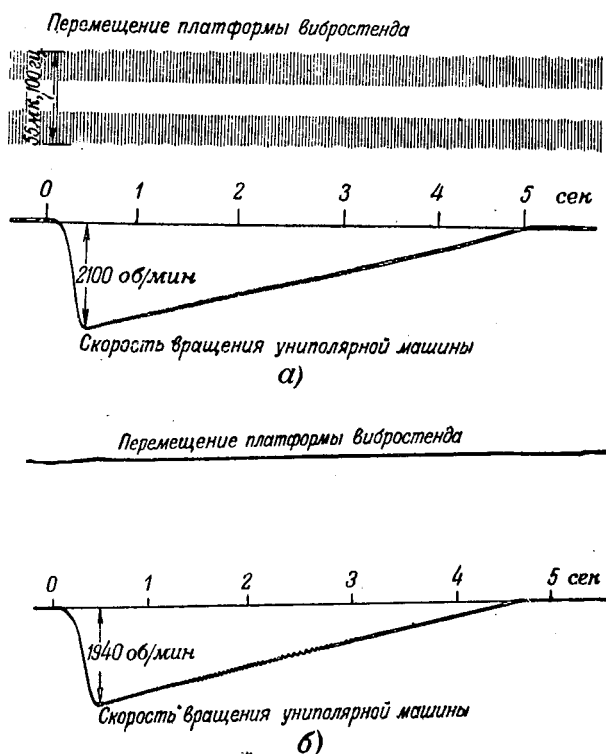


Рис. 4. Осциллограмма разгона и выбега униполярной машины в условиях вибрации (а) и при отсутствии вибрации (б).

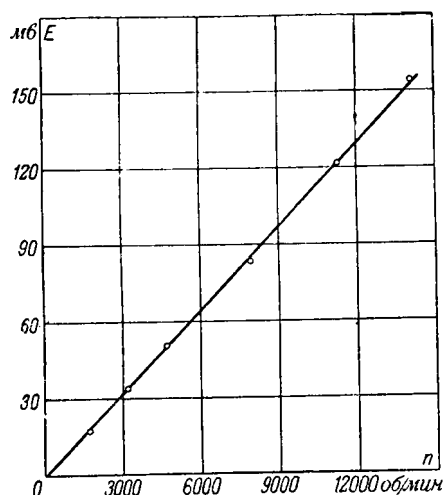


Рис. 5. Тарировочная кривая униполярной машины.

$C, \text{ мв/деление}$	100/30				160/30			
	Деле-ние	мв	Деле-ние	мв	Деле-ние	мв	Деле-ние	мв
E	5,25	17,5	10,25	34,2	15,25	50,8	15,6	83,2
$n, \text{ об/мин}$	1 745	3 200	4 700	7 910	11 300	14 150		

На рис. 3 приведена осциллограмма пуска асинхронного двигателя мощностью 0,6 кВт, 2 800 об/мин. При опыте вал двигателя был жестко соединен с валом униполярной машины. Время разгона двигателя составило 0,04 сек. При помощи униполярной машины была получена запись характерных колебаний скорости, которые имеют место в случае, когда время разгона двигателя меньше или равно периоду его собственных колебаний [Л. 4]. На рис. 4, а показаны разгон и выбег униполярной машины в условиях вибрации. Частота вибрации составляла 100 гц при амплитуде 55 мк. Разгон униполярной машины производился при помощи нити, которая свободно наматывалась на ее вал. Машина была укреплена на платформе вибростенда в таком положении, чтобы щетки при вибрации могли отходить от контактных поверхностей. Для сравнения опыт был повторен при отсутствии

вибрации (рис. 4, б). Из осциллограмм рис. 4 видно, что и в условиях вибрации работа щеточных устройств не вносит помех.

Данные магнитной системы униполярной машины: индукция в зазоре при вставленном роторе 8 730 гс; средний диаметр ротора 23 мм; активная длина 10 мм. При 3 000 об/мин э. д. с. машины составляет 31,6 мв. Таким образом, при сравнительно небольших скоростях машина может работать с вибраторами осциллографа как восьмого, так и пятого классов при длине луча 50 см и без усилительных устройств.

На рис. 5 приведена тарировочная кривая $E = f(n)$, полученная в диапазоне скоростей 0 ... 14 150 об/мин.

Вместе со шкивом и зажимами габаритные размеры униполярной машины составляют $70 \times 100 \times 120 \text{ мм}$, а вес 1 600 г.

Описанная машина может быть использована для записи кривых ускорения при помощи дифференцирующего устройства. Однако малое напряжение на выходе машины потребует применения усилительного устройства, которое усложнит измерения. Одна из таких схем была описана в [Л. 5]. Последующие работы показали, что наиболее перспективным для записи ускорений является применение электромашинного измерителя ускорений [Л. 6].

Литература

1. А. Г. Беляевский. Измерение скольжения с помощью специальных униполярных машин конструкции фирмы „Stepper“. Электричество, № 2, 1927.
2. Н. П. Раевский. Методы экспериментального исследования механических параметров машин. Издательство Академии наук СССР, 1952.
3. Униполярные машины и применение постоянных магнитов в электромашиностроении. Материалы конференции, созданной Отделением технических наук Академии наук и Главэлектропромом на Ярославском машиностроительном заводе. Издательство Академии наук СССР, 1940.
4. Р. Рюденберг. Переходные процессы в электр-энергетических системах. Издательство И. Л., стр. 242—245, 1955.
5. C. Dannat, S. W. Readfearm. Metropolitan Vickers Gazette, т. XIII, стр. 82, № 222, 1931.
6. Е. М. Синельников и Г. С. Сомихина. Измерение вращающих моментов асинхронных двигателей при разбеге. Электричество, № 7, 1950.

[5. 9. 1956]



К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Для ускорения подготовки статей, назначаемых в очередные номера журнала, редакции необходимо иметь в своем распоряжении вторые экземпляры рисунков. Ввиду этого редакция обращается к авторам статей, находящихся на рассмотрении редакции, с просьбой дослать вторые экземпляры рисунков. В дальнейшем при представлении новых статей следует прилагать к ним иллюстративный материал в двух экземплярах.

РЕДАКЦИЯ.

31 января 1957 г. после продолжительной болезни скончался на 92-м году жизни старейший электротехник Советского Союза, бессменный член редакционной коллегии журнала «Электричество» Михаил Андреевич Шателен — Герой Социалистического Труда, член-корреспондент Академии наук СССР.



Значение деятельности Михаила Андреевича Шателена в истории журнала «Электричество» исключительно велико. На протяжении 60 лет Михаил Андреевич принимал самое близкое и деятельное участие в развитии журнала, проявлял глубокое внимание и заботу о преуспевании этого старейшего русского и одного из первых в мире электротехнического органа научной печати. Большое и непосредственное влияние и помощь, которые оказывал М. А. Шателен журналу «Электричество», всегда высоко ценились редакционной коллегией, редакционным аппаратом и коллективом авторов журнала, так как огромный опыт, великолепная память и живость ума Михаила Андреевича, совмещенные с его личной обаятельностью, а также с той выдающейся ролью, какую он на протяжении ряда десятилетий заслуженно играл в общественной жизни электротехников и энергетиков страны, создали ему общепризнанный авторитет и глубокое искреннее уважение.

70 лет из своей долгой жизни, постоянно насыщенной творческим горением и преданной любовью к Родине, Михаил Андреевич отдал инженерной, педагогической, научной и общественной деятельности.

Научный и инженерный вклад М. А. Шателена в различных областях электротехники имел важное значение¹.

Когда в первые дни после Великой Октябрьской социалистической революции лучшие представители русской технической интеллигенции включились в созидательную работу в помощь молодому Советскому государству, Михаил

Андреевич был в их авангарде. В 1918 г. при учреждении Центрального электротехнического совета (ЦЭС) на М. А. Шателена были возложены обязанности заместителя председателя ЦЭС и председателя Ленинградского филиала. В 1920 г. при образовании комиссии ГОЭЛРО М. А. Шателен в качестве члена комиссии ГОЭЛРО возглавил работы по составлению плана электрификации Северного района республики. Этот план был одобрен В. И. Лениным и был включен в сводный план ГОЭЛРО. С созданием Госплана М. А. Шателен был назначен членом Госплана и работал в нем до 1936 г. При участии М. А. Шателена как консультанта и экс-

перта проектировались и сооружались электростанции (Волховская, Свирская, Днепроvская) и высоковольтные сети. За работы по развитию энергетики и промышленности Узбекской ССР М. А. Шателен был удостоен правительством УзССР звания Заслуженного деятеля науки и техники УзССР.

Широкую известность получили оригинальные работы М. А. Шателена в области метрологии и светотехники. Ряд важных для народного хозяйства проблем был исследован и изучен под руководством М. А. Шателена, в последний период его жизни, в возглавлявшейся им Ленинградской лаборатории Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР.

С именем М. А. Шателена тесно связано становление в России в конце XIX в. отечественной высшей электротехнической школы, для последующего развития которой М. А. Шателен на протяжении всей своей жизни много работал, проявляя в этом деле инициативу талантливого организатора и дальновидность ученого и педагога с широким горизонтом.

Многогранная деятельность русской энергетической общественности в течение нескольких десятилетий была теснейшим образом связана с Михаилом Андреевичем Шателеном. Он — член Русского технического общества по электротехническому (VI) отделу с 90-х годов прошлого века; с 1906 по 1915 г. он был председателем VI отдела РТО; в семи всероссийских электротехнических

¹ Ряд подробных данных о жизни и деятельности М. А. Шателена был освещен в № 12, Электричество, 1955.

съездах до революции и во всех съездах после революции М. А. Шателен принимал руководящее участие. Ряд лет М. А. Шателен был председателем ВНИТОЭ, делегатом от СССР в международных энергетических и электротехнических организациях.

Неоценимо выполненное Михаилом Андреевичем исследование в области истории русской электротехники. Совместная работа и личное знакомство М. А. Шателена с такими крупнейшими деятелями отечественной электротехники, как П. Н. Яблочков, А. Н. Лодыгин, А. С. Попов, М. О. Доливо-Добровольский, Н. Н. Бенардос, Н. Г. Славянов и многие другие, придали написанной Михаилом Андреевичем монографии, «Русские электротехники второй половины XIX века» характер живого свидетельства и сделали ее одним из фундаментальных трудов по истории электротехники СССР и незаменимым пособием при изучении истории развития русской электротехнической мысли и изобретательства.

Михаил Андреевич Шателен всегда отличался глубокой верой в технический и культурный прогресс человечества, любовью к коллективу, с которым он работал; яркой чертой его личности была замечательная общительность, способность захватывать окружающих примером собственной постоянной бодрости и настойчивости в труде.

М. А. Шателен был награжден тремя орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени и медалями СССР.

Знавшие лично Михаила Андреевича Шателена навсегда сохраняют об этом большом человеке и ученом самые теплые и дорогие воспоминания. Светлую память о М. А. Шателене сохраняют энергетики и электротехники Советского Союза.

***Редколлегия и коллектив редакции
журнала „Электричество“***

***Государственное энергетическое
издательство***

По страницам технических журналов

ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ФИНЛЯНДИИ

Финляндия богата водными ресурсами. Характерной особенностью ландшафта является обилие озер, занимающих около 12% всей площади. Наряду с этим в стране имеется много рек, наиболее значительные из которых — Вуокса, впадающая в Ладожское озеро, Кюми, Кокемяки, Оулу, Кеми с притоком Оунайоку и др.

Потенциальные гидроэнергетические ресурсы Финляндии оцениваются в настоящее время в 30 млрд. кВт·ч годовой выработки, из которых практически могут быть использованы не менее 15...17 млрд. кВт·ч. Примерно

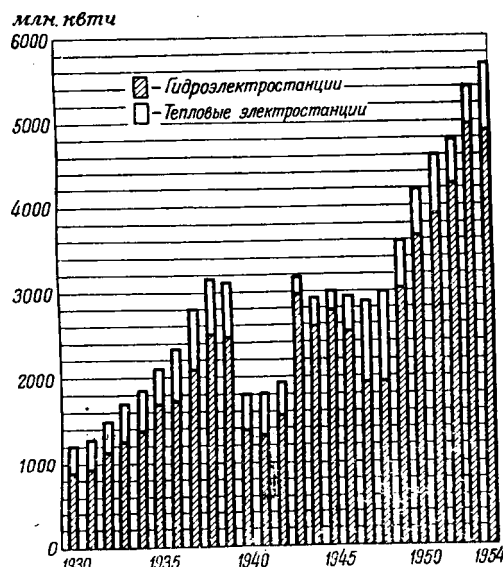


Рис. 1. Выработка электроэнергии в Финляндии с 1930 по 1954 г.

треть гидроэнергетических ресурсов сосредоточена в южных и центральных районах страны, где проживает подавляющее большинство населения и где находятся наиболее крупные промышленные центры и города. Остальные две трети сосредоточены на севере, на расстоянии до 800 км от наиболее важных центров потребления. Эта часть страны (Лапландия) в значительной части представляет собой пустынную местность с редко разбросанными населенными пунктами и почти необитаемыми лесными массивами и болотами. На севере этого района господствует арктический климат.

Расход воды в реках отличается большими сезонными колебаниями (от одной пятой до десятикратной величины среднего расхода). Ввиду неблагоприятного рельефа местности для поддержания экономического режима работы гидроэлектростанций необходимо сооружать специальные искусственные водохранилища. Основная часть электро-

энергии в стране вырабатывается на гидростанциях и лишь незначительная часть ее генерируется тепловыми электростанциями.

На рис. 1 дана диаграмма выработки электроэнергии в Финляндии за период 1930—1954 гг. Из диаграммы видно, что за истекший период выработка почти удвоилась; в 1955 г. она превысила 6 млрд. кВт·ч.

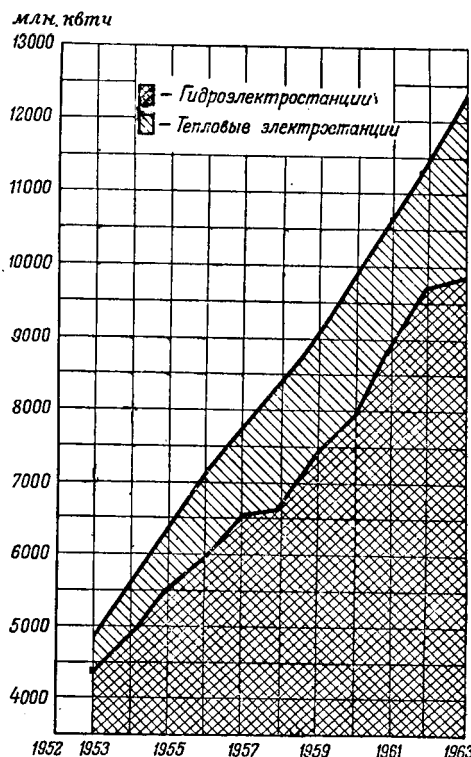


Рис. 2. Планируемое потребление электроэнергии в Финляндии до 1963 г.

В 1944 г. суммарная мощность гидроэлектростанций Финляндии составляла 415 Мвт; к концу 1954 г. она достигла 980 Мвт, а в 1955 г. превысила 1 000 Мвт.

На рис. 2 приведены планируемые цифры выработки и потребления электроэнергии до 1963 г. Предполагается, что в 1958 г. потребление составит 8,3 млрд. кВт·ч, из которых в случае нормальных водных условий 6 млрд. кВт·ч будут выработаны гидроэлектростанциями. В 1962 г. годовая выработка гидроэлектростанций должна возрасти до 10 млрд. кВт·ч.

В настоящее время на юге и в центральной части страны почти все гидроэнергетические ресурсы освоены, на севере они только начинают осваиваться. В Финляндии были проведены необходимые изыскания и закончена раз-

О ПЛЕНУМЕ МЭК В МОСКВЕ

В июле 1957 г. в Москве состоится *Пленарная сессия Международной электротехнической комиссии*. На заседаниях технических комитетов и подкомитетов сессии будут рассматриваться вопросы, связанные с разработкой международных норм и стандартов на электрические машины и оборудование: вращающиеся машины, оборудование электротяги, коммутационная аппаратура, аппаратура высокого напряжения, аппаратура низкого напряжения, кабели, полупроводниковые выпрямители, лампы и их арматура, патроны и цоколи, аппаратура для люминесцентного освещения, батареи и сухие элементы, изолированные траверсы, разрядники.

Адрес Оргкомитета по подготовке Пленарной сессии МЭК в Москве: Москва, Ж-74, Китайский пр. 7; телефон Б 6-87-08.

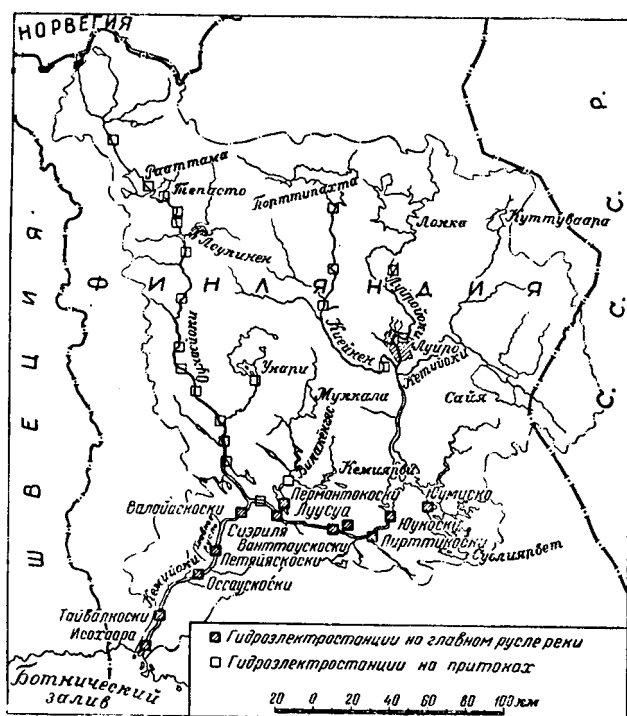


Рис. 3. Запроектированные гидроэлектростанции и водохранилища в северной части Финляндии.

работка программы строительства на главной реке этого района Кемийоки.

Истоки р. Кемийоки расположены почти на 200 км севернее полярного круга, на границе с СССР. Около полярного круга река достигает оз. Кемиярви с площадью 142 км², расположенного на высоте 149 м над уровнем моря. Отсюда река течет на запад к г. Рованиэми, являющемуся экономическим центром северной Финляндии, где в нее впадает наиболее крупный приток — р. Оунайоки. Далее река течет на юго-запад на расстоянии около 100 км и впадает в Ботнический залив. Средний расход воды между оз. Кемиярви и г. Рованиэми составляет 300 м³/сек, а в нижнем течении реки около 530 м³/сек. Во время паводка расход достигает 4300 м³/сек, а зимой минимальный расход равен 90 м³/сек. Энергетические ресурсы главного русла реки оцениваются в 3,7 млрд. кВт·ч в год, а ресурсы ее притоков, пока еще не полностью исследованных — не менее 1,5 млрд. кВт·ч.

На рис. 3 показано расположение запроектированных 30 гидроэлектростанций и девяти искусственных водохранилищ, использующих энергию водосборной площади р. Кемийоки. Общая поверхность всех искусственных

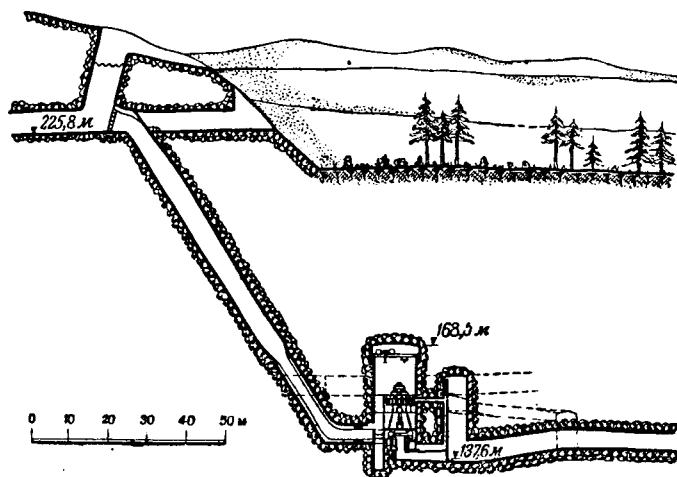


Рис. 4. Схематический разрез подземной гидроэлектростанции Юмиско.

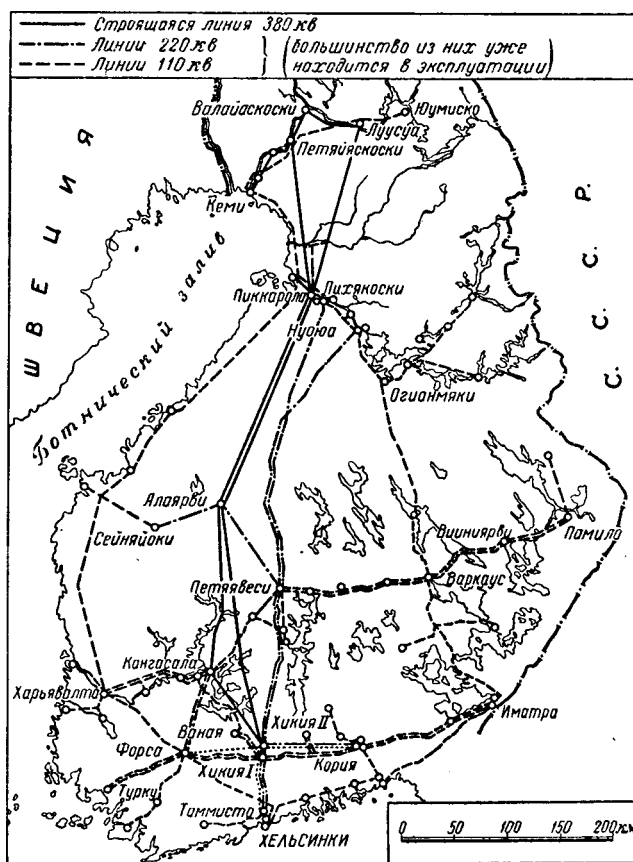


Рис. 5. Схематическая карта Финляндии с наиболее важными высоковольтными линиями электропередачи.

водохранилищ составляет не менее 1500 км², а их емкость 7 млрд. м³. Согласно проекту общий напор от оз. Кемиярви до Ботнического залива должен быть разделен между семью или девятью гидроэлектростанциями, общей мощностью около 700 Мвт и с годовой выработкой электроэнергии 3,5...4,2 млрд. кВт·ч.

В настоящее время на главном русле реки (у ее устья) уже работает гидроэлектростанция Исохаара. На этой станции установлены два агрегата мощностью по 23 тыс. кВт, работающих под напором 12,2 м. Максимальный используемый расход воды на станции равен 460 м³/сек. В дальнейшем будет установлен третий агрегат и годовая выработка станции достигнет 450 млн. кВт·ч.

На водосборной площади р. Кемийоки работает также первая в Финляндии подземная гидроэлектростанция Юмиско с одним агрегатом мощностью 30 тыс. кВт, расположенная вблизи оз. Кемиярви (рис. 4). Гидроэлектростанция расположена на 50 м ниже уровня земли и работает под напором 96 м. Все управление этой станцией производится из гидроэлектростанции Исохаара, находящейся на расстоянии 180 км от нее.

В настоящее время строится гидроэлектростанция Петаяйоски с тремя агрегатами общей мощностью 125 тыс. кВт, которая будет работать под напором 20,5 м.

Предполагается ежегодно начинать строительство одной гидроэлектростанции на р. Кемийоки, так что в течение ближайших 10 лет одновременно будут строиться три станции.

Передачу электроэнергии из бассейна р. Кемийоки в южные центры потребления на расстояние порядка 800 км решено осуществить по двум линиям электропередачи напряжением 380 кВ (рис. 5). В настоящее время сооружается первая очередь линии электропередачи 380 кВ от гидроэлектростанции Петаяйоски до трансформаторной подстанции Алайярви длиной около 400 км. Каждая фаза линии состоит из двух сталеалюминиевых проводов сечением 635 мм², весом 2,1 кг/м. Расстояние между обоями проводами фазы 45 см. Сечение защитных тросов 70 мм².

Строительство первой очереди линии длиной 400 км должно быть закончено в 1956 г. Через эту линию электропередачи и существующие линии 220 кВ будет передаваться мощность 800 Мвт. По окончании сооружения второй линии 380 кВ передаваемая мощность достигнет 1 600 Мвт, а после включения статических конденсаторов для продольной компенсации мощность будет доведена до 2 000 Мвт.

Литература

1. V. Veijola. Water Power, август 1956.
2. B. Nordqvist. Доклад на пятой мировой энергетической конференции, 1956.

Кандидат экон. наук И. В. Попов

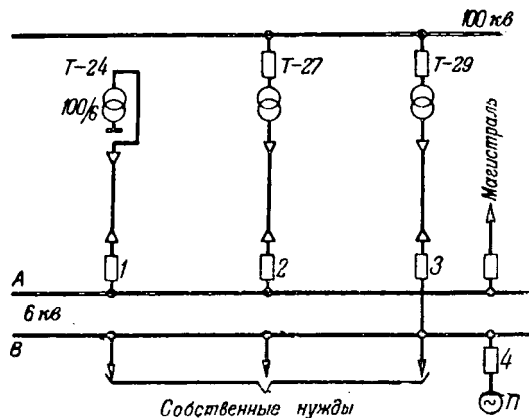
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Недавно на одной из чешских тепловых электростанций произошла авария в распределительном устройстве 6 кВ собственных нужд, что привело к значительному повреждению распредустройства и потере потребителями 80 тыс. кВт.ч электроэнергии вследствие отключения генераторов. Авария произошла следующим образом.

Необходимо было произвести вакуумировку масла трансформатора, обозначенного на схеме Т-24 (100/6,3 кВ, 16 тыс. кВА, $u_k = 11\%$, Y/Δ). С этой целью трансформатор был отсоединен от сети, его вводы 6 кВ были замкнуты накоротко, а обмотка 100 кВ — подсоединена к сети 6 кВ. Через обмотку 100 кВ проходил ток 37,5 А, что составляет около 40% номинального тока трансформатора. Обмотка трансформатора Т-24 через кабель была подсоединена к сборным шинам А в распределительном устройстве собственных нужд станции. Эти шины через трансформатор Т-27 были присоединены к системе 100 кВ. Собственные нужды электростанции были включены на шины В, питавшиеся через трансформатор Т-29 от системы 100 кВ и от генератора ТГ.

Процесс вакуумировки проходил нормально. После его окончания решено было отсоединить трансформатор от шин 6 кВ выключателем 1. При отключении этого выключателя в распредустройстве внезапно произошел взрыв и перекрылись сборные шины А и В, выключатель 2 не смог отключиться; отключились трансформатор Т-29, турбогенератор ТГ и затем — из-за нарушения работы собственных нужд — другие агрегаты электростанции. На 1,5 ч было прервано электроснабжение сети.

Администрация предприятия при участии Энергетического института в Брно провела исследование причин этой аварии. С самого начала было ясно, что причиной аварии послужила операция с выключателем 1. Более подробное рассмотрение привело к следующей картине аварии. При отключении трансформатора возникло высокое напряжение, которое способствовало тому, что на опорных изоляторах сборных шин А произошло перекрытие на землю во всех трех фазах. Напряжение было настолько высоким, что вызвало в одной из ячеек перекрытие между разомкнутыми контактами разъединителя, соединяющего выключатель со сборными шинами В, что привело к перенесению аварии на эти шины. В результате на обеих системах



шин возникло трехполюсное короткое замыкание на землю. Релейная защита сработала на отключение выключателей 2, 3 и 4. Выключатели 3 и 4 отключились успешно, а выключатель 2 отказал, поэтому отключился выключатель трансформатора Т-27 со стороны 100 кВ. Таким образом, прекратилось питание собственных нужд станции, что привело к перерыву снабжения сети электроэнергией.

После ремонта распредустройства решено было повторить выключение при том же состоянии сети и при этом снять осциллограммы напряжения как на зажимах трансформатора, так и на сборных шинах. Осциллографирование всего процесса производилось на вибрационном осциллографе, а момента отключения — на катодном

Отключение производилось воздушным выключателем СР405,6 кВ, 400 МВА — таким же, как и при аварии. При измерениях сначала вручную включались выключатели 1 и 2, затем импульсом от вибрационного осциллографа отключался выключатель 1, и весь процесс отключения записывался этим осциллографом. В момент расхождения контактов выключателя от контактора подавался импульс, отпирающий на некоторый промежуток времени луч катодного осциллографа, что давало возможность более детально записать интересные перенапряжения.

Проводились опыты по отключению холостого и короткозамкнутого трансформатора, причем перекрытий на шинах не происходило.

При отключении холостого трансформатора обрывался намагничивающий ток 19,8 А. Величина перенапряжений выражается их кратностью K — отношением наибольшей амплитуды перенапряжений $e_{\text{макс}}$ к амплитудному

значению фазного напряжения $K = \frac{e_{\text{макс}}}{U \sqrt{3}}$, где U — номинальное напряжение сети.

Трансформатор Т-24 вхолостую отключался всего 8 раз. Ни на его вводах, ни на сборных шинах не возникали особенно высокие перенапряжения. Наибольшее значение коэффициента K оказалось равным 2,13, среднее значение — 1,98; этим значениям соответствуют амплитуды перенапряжений 11 и 10 кВ, которые не могут быть опасными для изоляции распредустройства.

Совсем иначе происходил процесс отключения трансформатора, замкнутого накоротко. В этом случае ток (37,5 А) ограничивался индуктивностью рассеяния, а не индуктивностью намагничивания трансформатора, и изменялся синусоидально без заметных высших гармонических.

В таблице приводятся кратности перенапряжений K и их амплитуды $e_{\text{макс}}$, полученные при опытах.

Фаза X				Фаза Y	
на вводах трансформатора		на сборных шинах		на сборных шинах	
K	$e_{\text{макс}}$, кВ	K	$e_{\text{макс}}$, кВ	K	$e_{\text{макс}}$, кВ
10,6	54,6	7,3	37,6	11,6	59,6
9,5	49,0	10	51,5	17,8	91,6
11	56,7	8,8	45,4	10,5	54
9	46,3	8	41,2	Не измерено	
6,5	33,5	7,6	39,2	5	25,8

Из данных таблицы видно, что возникающие перенапряжения являются необычайно большими и появляются как на трансформаторе, так и на сборных шинах; их причиной является процесс отключения в выключателе, на который влияют параметры внешней сети. Эти перенапряжения превышают пробивное напряжение изоляции при промышленной частоте ($25 \sqrt{2} = 35$ кВ) и приближаются к прочности изоляции при импульсах (80 кВ). Так как напряжение перекрытия изоляции при высокой частоте лежит между обоими этими пределами, то возникающие высокочастотные перенапряжения являются угрожающими для изоляции распредустройства и могут вызвать ее перекрытие.

Кратности перенапряжений, определенные на основании упрощенного расчета, хорошо совпадают с измеренными.

Высокие перенапряжения возникли при отключении короткозамкнутого, а не холостого трансформатора, так как в первом случае ток был приблизительно двойной, что имеет существенное влияние на характеристики дуги, а следовательно, и на процесс отключения; кроме того, оба тока принципиально отличаются тем, что намагничивающий ток ограничен индуктивностью со сталью, а ток короткозамкнутого трансформатора — индуктивностью рассеяния.

Вторая авария заключалась в том, что при отключении тока короткого замыкания на сборных шинах отказал воздушный выключатель СР605,6 кв, 600 Мва. Отказ интересен тем, что этот выключатель (2 на схеме) обрывал только ток трансформатора Т-27, и мощность короткого замыкания не превышала 200 Мва. Подробный осмотр привода и самого выключателя не выявил каких-либо механических повреждений.

Причиной отказа воздушного выключателя нужно считать значительную крутизну восстанавливающегося напряжения (2600 в/мксек), обусловленную большой собственной частотой (около 85 кГц) колебательного контура, создаваемого индуктивностью рассеяния трансформатора Т-27 и его емкостью на землю в сочетании с емкостью кабеля между трансформатором и выключателем. Это привело к значительному уменьшению разрывной мощности выключателя по сравнению с номинальной.

[Energetika (Praha), стр. 397, № 10, 1955].

Инж. Ю. И. Лысков

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ АНГЛИЙСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ

В Англии вопросам электрификации железных дорог уделяется большое внимание. В соответствии с проектом реконструкции железнодорожного транспорта на электро-тягу намечено перевести 2370 км железнодорожных линий. В течение 15 лет длина электрифицированных железных дорог Англии должна возрасти более чем в 2 раза.

Применявшаяся ранее система электрической тяги на постоянном токе напряжением 650 в с питанием подвижного состава от третьего рельса требует значительных капиталовложений в стационарные устройства энергоснабжения. Для удешевления электрификации железных дорог в 1951 г. Технический комитет Британской транспортной комиссии рекомендовал применять на линиях, подлежащих электрификации, систему постоянного тока напряжением 1500 в.

Успехи, достигнутые во Франции в области технического совершенствования системы однофазного тока 50 Гц, благоприятные результаты эксплуатации английского опытного участка переменного тока Ланкастер — Моркамб — Хейшем, а также проведенные в Англии технико-экономические расчеты по сопоставлению различных систем электрической тяги указывают на значительные преимущества системы однофазного тока 50 Гц по сравнению с системой постоянного тока напряжением 1500 в.

В связи с этим в начале 1956 г. Транспортная комиссия Англии вынесла решение о применении на большей части линий, подлежащих электрификации, системы однофазного тока промышленной частоты напряжением 25 000 в. Эта система признана основной для дальнейшей электрификации английских железных дорог, и по ней будет электрифицировано 1950 км железнодорожных линий, что составляет 82% общей протяженности линий, подлежащих электрификации по проекту реконструкции английского железнодорожного транспорта.

Система постоянного тока будет применена лишь на некоторых линиях восточной и центральной частей Южного района Англии общей протяженностью всего 420 км.

Проектом реконструкции предусмотрена электрификация 1320 км магистральных железных дорог, в том числе (рисунок):

1) магистралей Центрального Лондонского района: от Истона (пригород Лондона) до Бирмингема, Кру, Ливерпуля и Манчестера;

2) магистралей Восточного и Северо-Восточного рай-

онов: от Кингс-Кросса (пригород Лондона) на Донкастер, Лидс и возможно на Йорк;

3) магистралей Восточного района: от Ливерпуль-Стрита (Лондон) до Ипсвича, включая ветви на Клякточ, Харидж и Феликстоу.

Кроме магистральных железных дорог, на электрическую тягу на однофазном токе 50 Гц переводятся следующие пригородные линии:

1) Лондон, Тильбюри и Южная линия;

2) от Ливерпуль-Стрита (Лондон) до Энфилда и Шингфорда;

3) от Ливерпуль-Стрита (Лондон) до Херефорда и Бишопс-Стортфорда;

4) от Кинг-Кросс — Мургеята до Хитчина и Летчурта, включая ветвь на Херефорда;

5) пригородные линии Глазго.

Общая протяженность этих линий равна 630 км.

В Южном районе Англии применению электрической тяги на однофазном токе 50 Гц препятствует имеющаяся там густая сеть железных дорог, электрифицированных на постоянном токе 660 в с питанием подвижного состава от третьего рельса. Вследствие того, что перевод этих линий на однофазный ток требует больших дополнительных капиталовложений, существующая в Южном районе система электрической тяги будет сохранена. Проектом предусмотрена электрификация по этой системе ряда линий суммарной протяженностью около 400 км.

Существующие линии 1500 в. Линия Ливерпуль-Стрит (Лондон) — Шеффилд с ответвлениями на Саутенд и Челмсфорд, расположенная в Восточном районе Англии, будет переведена на однофазный ток промышленной частоты. Реконструкция этой линии позволит применить во всем Восточном районе единую систему электрической тяги.

Линия Лондон — Тильбюри — Южная будет электрифицирована по системе однофазного тока 50 Гц. Ранее электрифицированные участки ее будут реконструированы.

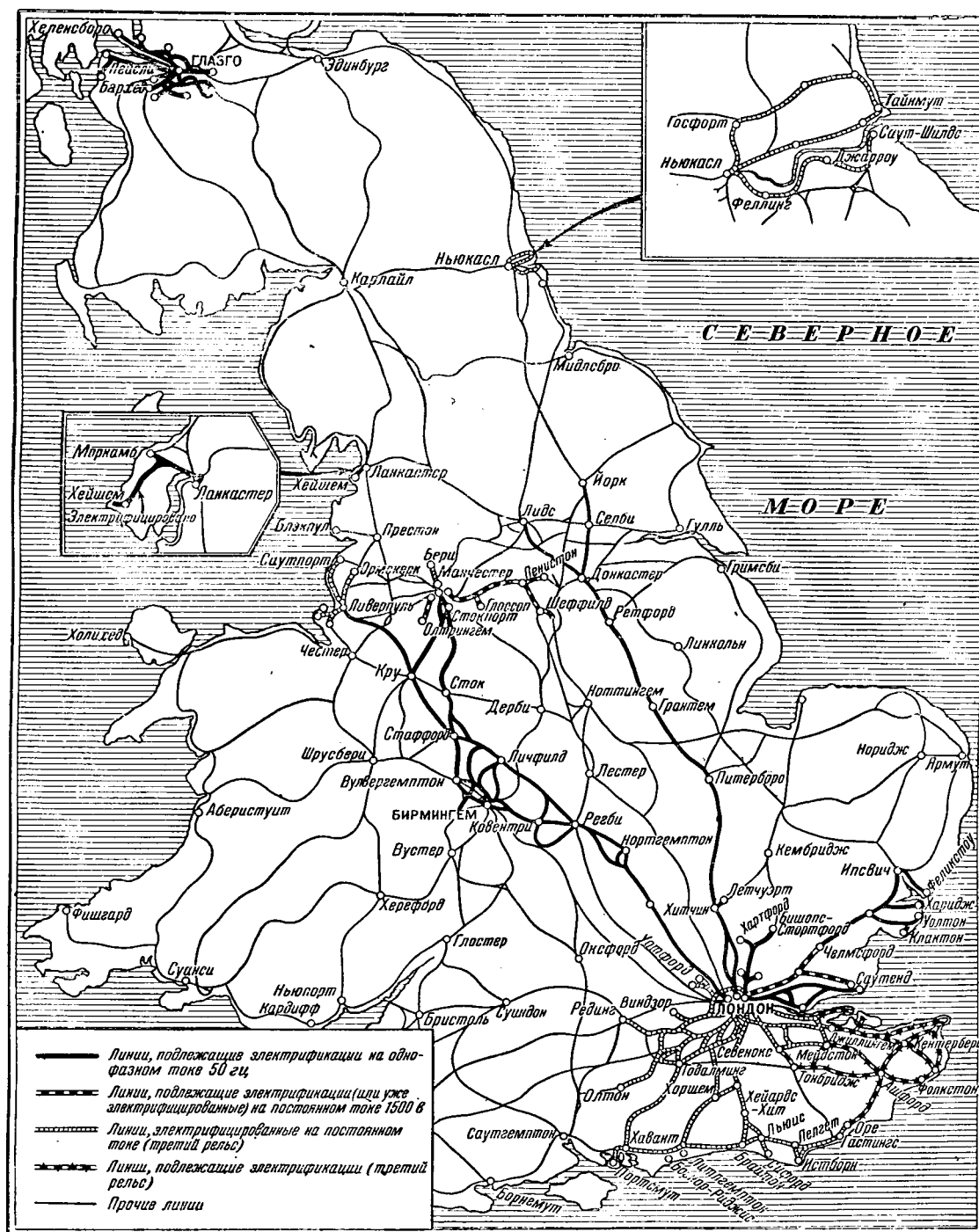
Линии Ливерпуль — Саутпорт, Уиралл, Тайнсайд и Истон — Уотфорд, электрифицированные по системе третьего и четвертого рельсов и являющиеся по своему значению автономными, реконструкции не подвергнутся и будут работать по принятой ранее системе.

Аналогично этому линии Манчестер — Олтрингем и Манчестер — Шеффилд — Уат, электрифицированные на постоянном токе напряжением 1500 в, в проект реконструкции не включены.

Линия Манчестер — Берк, электрифицированная на постоянном токе напряжением 1200 в с питанием подвижного состава от третьего рельса, в ближайшее время будет переведена на однофазный ток промышленной частоты. Выбор системы однофазного тока 50 Гц был произведен на основании результатов сравнительных расчетов для магистральных линий Центрального Лондонского района от Истона до Манчестера и Ливерпуля. Эти линии характеризуются интенсивным грузовым и пассажирским движением; вследствие принятой в расчетах более высокой стоимости подвижного состава однофазного тока по сравнению с подвижным составом постоянного тока преимущества системы однофазного тока для этих линий менее

Сопоставление капитальных затрат на электрификацию линий Истон — Манчестер — Ливерпуль на однофазном токе 25 кв, 5) Гц и постоянном токе 1500 в, млн. фунтов стерлингов

Статьи расхода	Однофазный ток 25 кв, 50 Гц	Постоянный ток, 1500 в	Разница в пользу однофазного тока
Устройства энергоснабжения и контактная сеть	29,3	38,6	+9,3
Подвижной состав	48,6	46,3	-2,3
Сигнализация	25,0	24,5	-0,5
Депо	2,7	2,7	—
Отопление и освещение поездов	6,1	7,1	+1,0
Обслуживающий персонал	6,1	4,4	-1,7
Всего	117,8	123,6	+5,8



Карта электрифицируемых железных дорог Англии.

значительны, чем для других линий с менее интенсивным движением. Результаты расчетов приведены в таблице.

Расчеты показывают, что, в то время как при электрификации по системе однофазного тока 50 гц общая сумма капитальных затрат составляет 117,8 млн. фунтов стерлингов, при электрификации на постоянном токе 1500 в она достигает 123,6 млн. фунтов стерлингов. При этом затраты на стационарные устройства энергоснабжения уменьшаются на 9,3 млн. фунтов стерлингов, что значительно превышает увеличение капиталовложений в подвижной состав, равное 2,3 млн. фунтов стерлингов. В стоимость устройств энергоснабжения включены расходы по реконструкции искусственных сооружений, вызванной необходимостью обеспечения требуемых изоляционных расстояний, больших при однофазном токе, чем при постоянном токе 1500 в.

Помимо уменьшения капитальных затрат, система однофазного тока 50 гц согласно проведенным расчетам должна обеспечить на указанных линиях уменьшение годовых эксплуатационных расходов на 1 млн. фунтов стерлингов. В основном это достигается за счет сокращения числа и упрощения оборудования тяговых подстанций, облегчения конструкции контактной сети и сокращения численности электровозного парка.

Питание электрифицированных железных дорог намечено производить от сетей государственных электрических станций. Расчеты показали, что для линий Истон — Манчестер — Ливерпуль при электрификации по системе однофазного тока 50 гц потребуется 12 тяговых подстанций, большинство из которых можно совместить с понижающими подстанциями системы общего энергоснабжения. При электрификации тех же линий по системе постоянного

тока потребуется 70 тяговых подстанций. При однофазном токе требуется прокладка 27,4 км питающих линий, при постоянном — 403 км кабеля 33 кв.

Более простая конструкция стационарных устройств энергоснабжения упрощает монтаж и благодаря этому позволяет сократить сроки перевода линий на электрическую тягу.

Номинальное напряжение контактной сети принято равным 25 кв. Это напряжение, по мнению английских специалистов, является экономическим и обеспечивает минимальную величину затрат по сооружению контактной сети, тяговых подстанций и реконструкции искусственных сооружений. На выбор величины номинального напряжения оказала влияние целесообразность его стандартизации в интересах английского экспорта. Это напряжение принято в качестве стандартного во Франции, Португалии, Турции и Бельгийском Конго.

Применение более высокого по сравнению с системой постоянного тока напряжения позволяет значительно сократить суммарное поперечное сечение проводов контактной сети. В то время как на участках постоянного тока 1500 в оно достигает 500 мм² на путь, при электрификации на однофазном токе оказывается достаточным 150 мм². Значительно упрощается конструкция контактной сети. Вместо контактной подвески компаундного типа, применяемой при скоростном движении на дорогах постоянного тока 1500 в, при однофазном токе будет применена простая цепная подвеска.

Уменьшение поперечного сечения и веса проводов контактной сети позволяет применить более легкие опоры, кронштейны и фундаменты, способствует более широкому применению механизации, облегчает монтаж и улучшает видимость пути и сигналов.

Английские специалисты считают, что система однофазного тока позволит увеличить срок службы контактного провода и контактных поверхностей токоприемников. Это должно явиться следствием значительного уменьшения величины снимаемого тока и уменьшения давления токоприемника на контактный провод.

На участках однофазного тока с номинальным напряжением в контактной сети 25 кв минимальное изоляционное расстояние принято равным 280 мм. На тех участках линий, где обеспечить это расстояние вследствие необходимости выполнения большого объема строительных работ не представляется возможным, напряжение в контактной сети будет снижаться с 25 до 6,6 кв и минимальное изоляционное расстояние будет уменьшено до 100 мм. Изменение напряжения в контактной сети намечено произвести под 97 (из 904) мостами и путепроводами, имеющимися на линии Истон — Манчестер — Ливерпуль.

Для обслуживания линий, подлежащих электрификации на однофазном токе 50 гц, предполагается заказать два типа электропоездов. Первый из них мощностью 3 000...3 500 л. с. предназначается для вождения скорых пассажирских поездов; второй — мощностью 2 500...3 000 л. с. — для грузопассажирской службы.

Вождение скорых пассажирских поездов на участках однофазного и постоянного токов будет осуществляться четырехосными электропоездами с осевой формулой P_0B . Для сети Истон — Манчестер — Ливерпуль требуется около 150 таких электропоездов.

Для грузопассажирской службы на участках однофазного тока предполагается применить четырехосные электропоезды той же осевой формулы. Они будут обеспечивать вождение поездов весом до 1 250 т на участках с ручными подъемами до 10‰. На участках постоянного тока аналогичного профиля для обслуживания поездов такого же веса потребуются либо шестiosные электропоезды с осевой формулой C_0C_0 , либо при использовании четырехосных электропоездов, применение двойной тяги.

Расчеты показывают, что для грузопассажирской службы потребуется около 510 четырехосных электропоездов однофазного тока или, при электрификации указанных линий на постоянном токе 1500 в, около 570 электропоездов постоянного тока.

В настоящее время стоимость электропоезда однофазного тока несколько выше, чем постоянного тока. Однако высказывается мнение о том, что в будущем после наладки серийного выпуска электропоездов однофазного тока их стоимость не будет превышать стоимости электропоездов постоянного тока.

К числу преимуществ подвижного состава однофазного тока Комиссия относит лучшее сцепление, дающее возможность принимать более легкие электропоезды, более простое управление ими, уменьшение потребной численности электропоездного парка вследствие более высокой производительности локомотивов, уменьшение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов вследствие повышения к. п. д. электропоездов и ликвидации потерь в реостатах, упрощение и удешевление цепей отопления и освещения поездов. Применение более легких электропоездов, обладающих меньшим давлением оси на рельсы, уменьшает также износ пути.

Сравнение подвижного состава постоянного и переменного токов производилось по трем направлениям: в отношении характеристик существующих схем электропоездов и моторных вагонов, возможностей дальнейшего совершенствования каждой из систем и относительной стоимости.

Некоторыми авторами высказывается мнение о том, что в будущем наиболее перспективными в отношении системы подвижного состава, вероятно, явятся электропоезды и моторные вагоны, оборудованные однофазными коллекторными тяговыми двигателями, получающими питание от высоковольтных регулировочных трансформаторов. В настоящее время основной упор делается на применение на подвижном составе тяговых двигателей постоянного тока, получающих питание от выпрямителей. Этому в значительной мере способствуют успехи, достигнутые за последние годы в области создания малогабаритных металлических выпрямителей.

Большое внимание уделяется также полупроводниковым выпрямителям, которые, по заявлениям английских специалистов, могут стать серьезным конкурентом ртутных выпрямителей. Это мнение подтверждается благоприятными результатами эксплуатации первой мотор-вагонной секции однофазного тока, оборудованной германиевым выпрямителем мощностью 750 квт и проходившей эксплуатационные испытания на участке Ланкастер — Моркамб — Хейшем.

К числу преимуществ германиевых выпрямителей над ртутными относятся их простота, большая механическая прочность, возможность придания батарее выпрямителей такой формы, которая обеспечивает наиболее удобную компоновку оборудования, замена жидкостного охлаждения воздушным, возможность непосредственного включения нагрузки без необходимости предварительного подогрева, уменьшение потребного количества аппаратуры управления.

Применение системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты позволяет использовать электрическую энергию, получаемую из контактной сети, для отопления и освещения поездов. Это дает возможность отказаться от широко используемых в настоящее время для освещения подвагонных генераторов.

Электрификация позволит значительно увеличить средние скорости движения пассажирских и грузовых поездов. Для скорых поездов увеличение скорости предполагается равным 10%, для некоторых грузовых поездов — в 2 раза.

Решение Комиссии о применении новой системы электрической тяги согласовано с Центральным энергетическим управлением Англии и поддерживается электротехнической промышленностью.

По заявлениям английских промышленных кругов изготовление для электрифицируемых железных дорог новых типов оборудования не встретит каких-либо новых проблем. Значительное количество аппаратуры, как, например, трансформаторы, выключатели мощности, разъединители и т. п., изготавливаемой для промышленных установок, может быть легко приспособлено для целей тяги.

Литература

1. Railway Gazette, 9 октября 1953.
2. Railway Gazette, 21 января 1955.
3. Modern Transport, 12 февраля 1955.
4. Modern Transport, 12 февраля 1955.
5. Railway Gazette, 6 апреля 1956.
6. Engineer, т. 201, № 5225, 1956.
7. Locomotive Railway Carriage and Wagon Review, т. 62, № 763, 1956.
8. Transport World, т. CXIX, № 3740, 1956.

Кандидат техн. наук А. А. Терехов

ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩИХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В некоторых случаях приходится по ряду причин в процессе эксплуатации ограничивать кажущуюся мощность синхронных генераторов. Такое ограничение большей частью вызывается чрезмерно высокой температурой воды, входящей в воздухоохладитель в летнее время, и в связи с этим недопустимым повышением температуры охлаждающей среды. Кроме того, часто бывает желательно повысить отдачу активной или реактивной мощности синхронными генераторами в сеть, особенно в часы суточного пика нагрузки. При этом увеличение выдачи активной мощности предполагает наличие соответствующего резерва мощности у первичного двигателя агрегата.

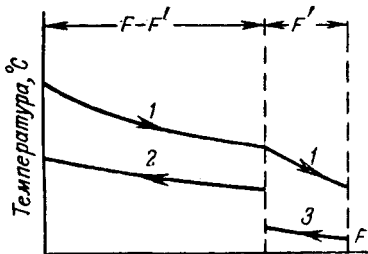


Рис. 1. Принцип применения дополнительного охлаждения при помощи холодильной машины.

F — общая поверхность системы охлаждения воздуха; F' — часть системы охлаждения воздуха, присоединенная к дополнительному охлаждению; 1 — кривая охлаждения воздуха; 2 — нагрев охлаждающей воды, поступающей из градирни; 3 — нагрев дополнительной охлаждающей воды.

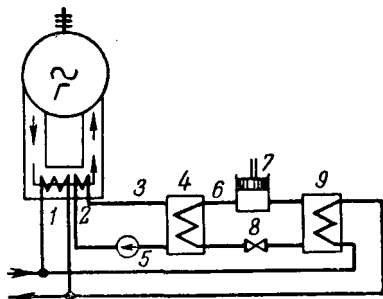


Рис. 2. Опытная установка дополнительной охлаждающей системы с компрессионной холодильной машиной.

1 — существующая охлаждающая система; 2 — дополнительная охлаждающая система; 3 — цепь циркуляции дополнительной системы охлаждения; 4 — теплообменник; 5 — циркуляционный насос; 6 — цепь аммиака; 7 — компрессор; 8 — испарительный вентиль; 9 — конденсатор.

В таких случаях повышение мощности генераторов возможно осуществить лишь за счет усиления охлаждения воздуха, циркулирующего в этих машинах. Наиболее эффективным, экономичным и легко поддающимся регулированию способом усиления охлаждения воздуха является применение дополнительной охлаждающей системы с холодильной машиной, врезанной в действующую систему цепи циркуляции воздуха генератора. При этом дополнительная охлаждающая система омывается водой, температура которой регулируется и практически не зависит от температуры воды, подаваемой в систему воздухоохлаждения.

Впервые такая система была использована в Венгрии. Дополнительное охлаждение циркуляционной воды при помощи холодильной машины было применено также в США во время последней войны в целях повышения

номинальной мощности крупных силовых трансформаторов.

Для указанных целей может быть использована холодильная машина компрессионного или абсорбционного типа в виде парового эжектора. Для тепловых станций второй тип холодильной машины предпочтительнее, так как вся система может быть органически связана с тепловой схемой станции, не имеет вращающихся частей, однотипна с существующими у турбины эжекторами, предназначенными для создания вакуума в конденсаторе, и может обслуживаться тем же персоналом машинного зала. Расход же пара на эти цели незначителен, особенно, если холодильная установка будет использована только в часы пика нагрузки.

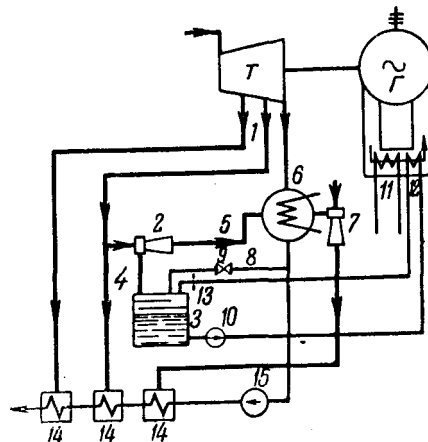


Рис. 3. Специальная установка дополнительного охлаждения с паровым эжектором, врезанная в тепловую схему станции.

1 — точка отбора пара; 2 — паровой эжектор; 3 — испаритель; 4 — всасывающая линия эжектора; 5 — противоточная линия эжектора; 6 — конденсатор турбины; 7 — паровой эжектор турбины; 8 — линия конденсата; 9 — регулирующий вентиль; 10 — циркуляционный насос; 11 — охлаждающая система; 12 — дополнительная охлаждающая система; 13 — редуцирующий диск; 14 — подогреватели питательной воды; 15 — конденсаторный насос турбины.

На рис. 1 показан принцип применения системы дополнительного охлаждения: часть F' общей поверхности охладителя воздуха F омывается более холодной водой, которая охлаждается холодильной машиной. Разность между потерями в машине (в килокалориях), работающей с повышенной мощностью, и теплом, удаляемым имеющимся воздухоохладителем, является расчетной для определения размеров дополнительной системы воздухоохлаждения. От нее зависит также мощность холодильной установки. В случае отсутствия места для установки дополнительного воздухоохладителя можно выделить часть поверхности существующего воздухоохладителя и питать ее водой, охлаждаемой холодильной установкой.

На первой экспериментальной холодильной установке турбогенератора номинальной мощностью 16 Мва, который из-за недостаточного охлаждения мог нести нагрузку лишь до 13,5 Мва, была применена аммиачная компрессорная холодильная установка (рис. 2). Потребляя всего лишь 30 квт, она дала возможность повысить нагрузку генератора до номинальной, т. е. на 18,5%. Увеличение отдачи мощности сверх номинальной практически возможно только в пределах 5...8%.

Сокращения эксплуатационных расходов и упрощения обслуживания холодильной паровой эжекторной установки можно ожидать на тепловых станциях, в случае питания ее отбором пара от турбины с подходящими параметрами

В ТЕХНИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ МЭС СССР

Отказаться от установки выключателей на стороне высшего напряжения подстанции 35...220 кВ предложено Техническим управлением МЭС в целях удешевления строительства и упрощения эксплуатации тупиковых подстанций (решение № 12/Э от 21 июля 1956 г.).

В связи с этим при питании тупиковой подстанции двумя линиями необходимо применять схему блока линия — трансформатор, установив разъединитель перед каждым трансформатором; при питании подстанции одной линией трансформаторы следует подсоединить к ней при помощи разъединителей; подстанции, подключаемые отпайками к двум проходящим линиям, необходимо выполнять по схеме блока отпайка—трансформатор с установкой разъединителя перед трансформатором.

Если в дальнейшем указанные выше подстанции могут быть использованы как проходные, то необходимо предусмотреть место для возможности установки в будущем выключателей и сооружения систем шин.

Защиту трансформаторов от внутренних повреждений необходимо осуществлять с действием на выключатель питающего конца линии путем телепередачи отключающего импульса или устройства на подстанции искусственного замыкания фазы на землю при помощи короткозамыкателя (закорачивающего разъединителя с приводом). Короткозамыкатели осваиваются ленинградским заводом «Электроаппарат».

В случае отказа от трансформаторов тока на стороне высокого напряжения допускается установка только газовой защиты трансформатора от внутренних повреждений. Допускается также осуществлять действие защиты от внутренних повреждений на сигнал и применение плавких предохранителей на стороне высокого напряжения.

Новая редакция § 718 ПТЭ. Решением Технического управления МЭС (№ 14/Э от 3 сентября 1956 г.) изменен § 718 ПТЭ. Этот параграф принят в следующей новой редакции:

«§ 718. Все оборудование распределительных устройств по своим номинальным данным должно удовлетворять условиям работы как при нормальном режиме, так и при коротких замыканиях и перенапряжениях.

Оборудование присоединений реактированных линий должно выбираться из расчета величин токов короткого замыкания за реактором».

Решение Технического управления утверждено первым заместителем министра электростанций СССР В. С. Ермаковым.

КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ В г. КЕМЕРОВО

На конференцию читателей журнала «Электричество» в г. Кемерово 19 ноября 1956 г. прибыли представители 42 электро-энергетических предприятий и организаций

Сибири, Дальнего Востока и Средней Азии. После краткого вступительного слова председателя Кемеровского областного правления НТОЭП К. С. Сторожука с докладом о деятельности журнала «Электричество» выступил член редколлегии журнала И. И. Петров. Затем в критическом обсуждении различных задач, стоящих перед редакцией по дальнейшему улучшению содержания журнала и расширению круга его читателей, приняли участие: Т. Б. Заславская (Новосибирский филиал АН СССР), Г. И. Перцов (Кемеровский горный институт), М. П. Гробивкер (Северный сетевой район), М. Е. Поволоцкий (завод КЭМЗ), Бабушкин (Кемеровская ТЭЦ), В. Н. Ясников (Кузбассэнерго), В. Т. Ларченко (Кузнецкий металлургический завод) и др.

В решении конференции отмечено, что журнал в большой степени способствует научному росту электротехнических кадров Советского Союза и накоплению читателями современных теоретических знаний и передового инженерного опыта в области электротехники и электроэнергетики. За последние годы журнал значительно усилил освещение вопросов производства и распределения электроэнергии и применения электроэнергии в различных отраслях народного хозяйства. Особо отмечено, что в ведущейся редакцией борьбе с отвлеченностью рассмотрения вопросов и с перегрузкой содержания отдельных статей неоправданно сложным математическим аппаратом имеются за последние годы несомненные успехи и усилия редакции в этом направлении должны продолжаться.

Для изжития еще имеющихся в работе журнала недостатков конференция в своем решении предусмотрела ряд рекомендаций. В частности, указано на необходимость большего освещения вопросов, высоковольтных линий электропередач, проектирования электрических машин малой и средней мощности; более частого проведения дискуссий по основным проблемам электротехники; своевременного освещения на страницах журнала новостей в научной и технической областях; систематического помещения обзоров о состоянии зарубежной электротехники и статей, намечающих перспективы развития отдельных направлений электротехники.

Отметив длительность прохождения статей в печать, конференция в своем обращении к редакции выразила желание, чтобы были приняты все зависящие от редакции меры для сокращения указанных сроков, в частности путем ликвидации задержек статей рецензентами.

Конференция признала важным стремление редакции к более широкому привлечению к авторской работе в журнале специалистов, работающих в энергосистемах, на электротехнических предприятиях и в других организациях, размещенных на периферии.

Конференция присоединилась к мнению редакции о том, что коллективы первичных организаций НТОЭП еще недостаточно участвуют в журнале. Они могли бы помещать в журнале коллективные рецензии на новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике.

и использования конденсатора турбины в качестве конденсатора холодильной установки, хотя такая схема и не является наиболее простой и дешевой. На рис. 3 показана такая холодильная установка, выполняемая на одной из станций Венгрии для генератора 33 Мва, органически связанная с тепловой схемой станции. Установка действует автоматически, реагируя на изменения нагрузки, так как давление пара в точке отбора турбины и расход пара холодильной эжектирующей установкой изменяются одновременно с изменением нагрузки турбины. При желании нетрудно выполнить регулирование по необходимым параметрам, например, по заданной постоянной темпера-

туре воздуха, охлаждающего генератор.

При практическом использовании описанных выше холодильных установок необходимо иметь в виду, что в ряде случаев можно повысить эффективность работы старых воздухоохладителей генераторов заменой их трубок на трубки новой конструкции, применяемой в СССР (с навитой вокруг трубок спиралью из медной проволоки).

(А. Mandi, J. Urbanek, L. Heller, CIGRE, доклад 132, 1956).

Инж. А. М. Берковский

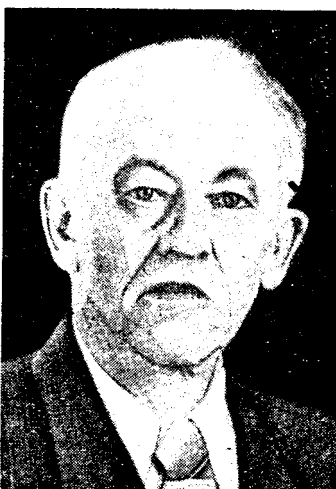


ПРОФЕССОР Л. М. ПИОТРОВСКИЙ

К 70-летию со дня рождения и 45-летию научно-педагогической деятельности

Людвик Марьянович Пиотровский родился в г. Ковно в 1886 г. По окончании гимназии он поступил на Электромеханическое отделение Петербургского политехнического института. В 1912 г. Л. М. Пиотровский был оставлен в институте аспирантом по кафедре электрических машин и спустя год был утвержден ассистентом электромашинной лаборатории Политехнического института. С 1916 г. по 1918 г. Л. М. Пиотровский работал по электрооборудованию Ревельской морской крепости сначала в должности инженера-электрика, а затем заведующего электротехническим отделом строительства крепости. С 1920 г. Л. М. Пиотровский начал чтение курса электрических машин и вскоре был утвержден доцентом, а в дальнейшем профессором кафедры электрических машин Политехнического института. В 1937 г. Л. М. Пиотровский защитил докторскую диссертацию «Индукционный двигатель с переменными параметрами».

Наряду с преподавательской деятельностью Л. М. Пиотровский неизменно проводит большую научную работу для промышленности. В 1925—1926 гг. он принимал активное участие в переработке «Правил и норм испытания электрических машин и трансформаторов». В 1926—1928 гг. Л. М. Пиотровский работал в Физико-технической исследовательской лаборатории, руководя испытаниями электрических машин и трансформаторов по заданиям заводов «Электрик» и «Электросила». Во время Великой Отечественной войны Л. М. Пиотровский выполнил большую работу по испытаниям гидрогенераторов и трансформаторов в системе Узбекэнерго, за что был награжден почетной грамотой Верховного Совета Узбекской ССР.



В послевоенные годы Л. М. Пиотровский работает консультантом на заводе «Электрик».

На всем протяжении своей многолетней деятельности Л. М. Пиотровский был также тесно связан с военно-морскими учебными заведениями: с 1919 г. по 1921 г. он преподавал электротехнику в Училище комсостава Флота, в 1921—1922 гг. — в Морском инженерном училище, с 1922 г. по 1938 г. — в Морской академии им. Ворошилова; в 1945—1947 гг. заведывал кафедрой электротехники и электрических машин в Военно-морском инженерном училище им. Дзержинского.

Л. М. Пиотровский — один из активных профессоров электромеханического факультета Ленинградского политехнического института им. Калинина. Большая преподавательская и научная деятельность Л. М. Пиотровского отражена в его многочисленных печатных трудах. Заслуженным признанием пользуются его книга по испытаниям электрических машин переменного тока, учебник по трансформаторам и особенно учебники по электрическим машинам для вузов и техникумов.

Л. М. Пиотровский пользуется большим авторитетом и уважением. Его многогранная и плодотворная деятельность высоко оценена Правительством, наградившим его орденом Ленина и медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.».

*В. С. Смирнов, С. В. Усов,
М. П. Костенко, Л. Р. Нейман,
И. А. Зайцев, Е. Г. Шрамков,
Е. Д. Несговорова, Е. А. Пальдр.*

ПРОФЕССОР Д. П. МОРОЗОВ

К 60-летию со дня рождения и 35-летию научно-педагогической деятельности

Доктор техн. наук, проф. Дмитрий Петрович Морозов известен как выдающийся советский специалист в области электрооборудования промышленных предприятий.

Научную деятельность Д. П. Морозов начал, будучи еще студентом МВТУ, в качестве сотрудника машинного отдела ВЭИ. По окончании в 1929 г. МВТУ Д. П. Морозов работал до 1936 г. научным руководителем лаборатории электрооборудования металлургических заводов в ВЭИ.

В 1923 г. Д. П. Морозов приступил к педагогической работе. С 1930 г. он сосредоточил эту область своей деятельности в МЭИ вначале на кафедре электрических машин, а затем на кафедре электрооборудования промышленных предприятий.

В 1944 г. Д. П. Морозову была присуждена ученая степень доктора технических наук.

Вся научно-педагогическая деятельность Д. П. Морозова тесно связана с запросами и нуждами промышленности. Им выполнены глубокие научные изыскания и



практические работы по электрооборудованию металлургических заводов «Серп и Молот», «Запорожсталь», Кузнецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов, исследованы электромашинные агрегаты МОГЭС, Шатурской ГЭС, Каширской ГЭС и др.

Проф. Морозов — автор свыше 40 научных трудов по теории регулируемых электроприводов, по электроприводам с упругой связью, по энергетике и методам расчета и проектирования электрооборудования металлургических заводов.

Продолжительная безупречная работа Д. П. Морозова высоко оценена Правительством, наградившим его орденом Трудового Красного Знамени и медалями Советского Союза.

Нет сомнения, что Дмитрий Петрович Морозов еще много лет посвятит научно-педагогической деятельности и будет участвовать своими большими знаниями и опытом в разрешении задач, поставленных XX съездом КПСС в области науки и промышленности.

Коллективы кафедр ЭПП МЭИ, ВЭИ и ВЗПИ

ПРОФЕССОР Т. П. ГУБЕНКО

К 60-летию со дня рождения

25 августа 1956 г. исполнилось 60 лет со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники Узбекской ССР, доктора техн. наук, проф. Львовского политехнического института Тихона Павловича Губенко.

Т. П. Губенко родился в семье слесаря конотопских железнодорожных мастерских. В 1913 г. он закончил с золотой медалью среднее учебное заведение, затем два года был студентом Петроградского политехнического института, а после призыва в 1916 г. в армию окончил военно-инженерное училище. После демобилизации из армии он получил высшее электротехническое образование в Киевском политехническом институте (в 1927 г.).

Т. П. Губенко опубликовано около семидесяти научных трудов, из которых следует особо отметить работы по вопросам регулирования и торможения электрических двигателей. Большое место в научной работе Т. П. Губенко занимают вопросы автоматизации производственных процессов и особенно вопросы автоматизации процессов бурения нефтескважин.

Более 20 лет Т. П. Губенко заведывал кафедрой промышленного использования электрической энергии и кафедрой электрических машин и аппаратов в Харьковском электротехническом, в Среднеазиатском индустриальном и Львовском политехническом институтах.



Деятельность Т. П. Губенко тесно связана с развитием и внедрением в отечественную промышленность электрического привода. В годы первых пятилеток он принимает большое участие в реконструкции старых и строительстве новых металлургических заводов Донбасса: Мариупольского трубного, Макеевского и Запорожстали. В период Великой Отечественной войны он отдает много сил развитию энергетики и металлургии Узбекистана. Верховный Совет Узбекской ССР наградил профессора Губенко почетной грамотой за участие в строительстве промышленных предприятий, а осенью 1944 г. присвоил ему почетное звание заслуженного деятеля науки и техники Узбекской ССР.

С 1956 г. Т. П. Губенко, помимо заведывания во Львовском политехническом институте кафедрой «Электрические машины и аппараты», работает деканом энергетического факультета этого института.

Т. П. Губенко принимает активное участие в работе Львовского отделения Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний, а также в работе Львовского Городского совета депутатов трудящихся в качестве его депутата.

Львовский политехнический институт



Библиография

В. А. ПРИВЕЗЕНЦЕВ. ПРОИЗВОДСТВО СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ. Издание пятое, стр. 485, ц. 10 р. 95 к. Госэнергиздат, 1956.

Рецензируемое учебное пособие для студентов электротехнических и энергетических вузов и техникумов, специализирующихся в области кабельной техники, состоит из девяти глав. В гл. 1 даны основные элементы теории силовых электрических кабелей; гл. 2—7 посвящены технологии и оборудованию кабельных цехов; в гл. 8 дан материал, касающийся испытаний и исследований силовых кабелей; в гл. 9 дан анализ современных конструкций силовых кабелей. Книга иллюстрирована большим количеством рисунков (358), хорошо поясняющих технологию и оборудование для производства силовых кабелей.

Каждому разделу технологии предшествуют некоторые теоретические сведения, которыми автор обосновывает существо того или иного технологического процесса. В книге, например, содержатся подробные теории скрутки, наложения бумажной изоляции, сушки и пропитки и т. д. Книга написана на современном уровне техники. В ней достаточно полно отражены достижения кабельной техники в области конструирования силовых кабелей, подробно разобраны такие вопросы, как наложение алюминиевых оболочек, антисептирование защитных покровов, разработка новых пропитывающих составов, конструирование кабелей для вертикальных прокладок, а также кабелей без свинцовых оболочек и т. д.

Большое внимание уделено в книге технологическому оборудованию и совершенствованию технологического процесса производства силовых кабелей. В отличие от большинства ранее выпущенных книг в рецензируемой книге уделяется должное внимание особенностям технологии изготовления токопроводящих жил из алюминия, а в гл. 9 где даны конструкции силовых кабелей, приведены ценные соображения об особенностях монтажа и эксплуатации силовых кабелей с алюминиевыми оболочками.

Весьма ценными в книге являются разделы, в которых описаны современные методы уплотнения токопроводящих жил и изложена теория этих процессов.

В целом книга, несомненно, отвечает своему основному назначению как учебное пособие и руководство при курсовом и дипломном проектировании, поскольку в книге имеются конструктивные чертежи почти всего технологического оборудования. Нет сомнения, что книга будет полезна и для других читателей, которые захотят подробно ознакомиться с производством силовых кабелей и с оборудованием основных кабельных цехов.

Наряду с общей вполне положительной оценкой 5-го издания следует отметить некоторые недостатки, которые, по нашему мнению, автор должен учесть в случае нового переиздания книги.

Нам представляется необязательным начинать книгу, именуемую «Производство силовых кабелей», с чрезмерно подробного рассмотрения в гл. 1 теории электрического и теплового полей, явлений в диэлектриках и потерь в металлических оболочках. В программе по одноименному курсу указанные вопросы не включены. Гл. 1 относится по существу к курсу «Основы кабельной техники». Можно было опустить не применяющиеся в нашей промышленности методы испытания кабелей, как, например фотографирование дефектов наложения изоляции, установку пенетрометра с пантографом и т. д.

Не всегда автору следовало ограничиться приведением только готовых формул (например: 1-11, 1-18, 1-19, 1-20, 1-21, 1-26, 1-29, 1-30, 1-31, 1-36 и др.); с этим еще можно было бы согласиться, если бы в книге были даны ссылки на литературу, в которой читатель (студент, изучающий данную дисциплину) смог бы найти более полный расчет.

По непонятным причинам в книге не уделено должного внимания весьма актуальному вопросу об автоматизации и механизации таких процессов, как сушка и пропитка кабелей, контроль температурного режима, освинцевание и т. д.

Эти недочеты легко исправимы. Книга содержит весьма ценный и хорошо изложенный материал, соответствующий в подавляющей своей части программе, утвержденной Министерством высшего образования.

Настоящая рецензия обсуждена на кафедре изоляционной и кабельной техники Ереванского политехнического института.

*Кандидат техн. наук, доц. М. М. Маркосян
г. Ереван*

* *
*

В. А. Привезенцев известен как автор одних из наиболее популярных справочников и учебников для мастеров, технологов и других инженерно-технических работников кабельной промышленности, а также для учащихся техникумов и вузов. Его книги отличаются простотой, ясностью и последовательностью изложения. Рецензируемая книга содержит более глубокое изложение теории скрутки и деформации проволок при скрутке, разработанной автором книги совместно с В. В. Зверевым; в книге подробно освещены современные способы и устройства для уплотнения круглых токопроводящих жил, дан обширный обзор типов бумагообмотчиков, элементов их автоматизации, разобраны методы борьбы с образованием морщин в фазной изоляции кабелей с секторными жилами на напряжение 6...10 кВ, дан достаточно глубокий анализ процессов сушки и пропитки кабелей и пр.

Г. Н. ПЕТРОВ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. Издание 2-е, в трех частях. Ч. I. Введение. Трансформаторы, стр. 224, ц. 9 руб. 55 коп. Госэнергоиздат, 1956. Дopusчено Главным управлением политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР в качестве учебника для электротехнических и энергетических вузов и факультетов

Рецензируемая книга, предназначенная для изучения курса электрических машин, является первой частью этого курса и состоит из двух разделов. Первый раздел — введение — включает в себя изложение принципа действия, основных конструктивных и электромагнитных схем электрических машин и анализ связи между геометрическими размерами и мощностью машин и трансформаторов. Далее приводятся данные о материалах, применяемых в электрических машинах, и затем даются краткие исторические сведения в области развития этих машин и электромашиностроения.

Основной частью книги является второй раздел, посвященный изложению рабочих процессов трансформаторов нормального и специального исполнения и описанию конструкций сердечников и различного типа обмоток. Оригинальным является графическое изображение связи между векторной диаграммой трансформатора и энергетическими балансами активных и реактивных мощностей, заключающееся в построении энергетических диаграмм.

Без обычного раздельного рассмотрения рабочих процессов в однофазных и трехфазных трансформаторах, в книге, после анализа схем замещения, составляются уравнения равновесия напряжений для трехфазного трансформатора в комплексной форме. Это позволяет избежать повторений при изложении процесса работы трехфазных трансформаторов. Вопросы работы однофазных и трехфазных трансформаторов рассматриваются параллельно.

Большое место в книге уделяется описанию устройства обмоток трансформаторов, при этом, помимо конструкции и схем соединения их, подробно рассматриваются вопросы регулирования напряжения, а также расчет индуктивных сопротивлений этих обмоток. В дополнение к указанному приводится расчет сил взаимодействия в проводниках обмотки при коротких замыканиях трансформатора; затрагиваются также вопросы транспозиции проводников.

Весьма ценным является большое количество приводимых в книге справочных материалов, таблиц и пр.

К недоработкам, имеющимся в книге, можно отнести следующие. Нет четкого разграничения в работе кабелей с вязкой пропиткой с поясной изоляцией и с радиальным полем, маслонаполненных и газонаполненных кабелей; в частности, схема пробоя изоляции силовых кабелей дана только для кабелей с радиальным полем и вязкой пропиткой, что не оговорено в книге. Совсем не изложен механизм развития пробоя кабелей с поясной изоляцией. Градирование изоляции описывается только по емкости, без указания о градировании по толщинам бумажных лент (пленок), что в настоящее время является обязательным при конструировании высоковольтных кабелей. Неправильно указание, что принцип поддержания в газовых включениях высокого давления используется в кабелях в стальных трубах с маслом под давлением. Некоторые чертежи обмоточных машин и конструкции кабелей (концентричный, с увеличенным диаметром жил) могли быть опущены как нетипичные или устаревшие. При описании конструкции и работы вакуумных насосов, к сожалению, не указаны специфические условия их эксплуатации в кабельной промышленности, заключающиеся в конденсации в насосах паров влаги и пропиточной массы или масла, и не приведены выпускаемые нашей промышленностью поршневые насосы и ротационно-масляные насосы с газобалластными устройствами. Желательно было указать на особенности изолирования, сушки и пропитки высоковольтных кабелей.

Отмеченные проблемы и неточности не снижают общей высокой оценки работы, выполненной автором книги.

*Инженеры К. В. Сидоров и Л. И. Мачерет
Московский кабельный завод „Москабель“*

В § 14 раздела 2 приводится общая схема расчета трансформатора с кратким перечнем основных этапов этого расчета и рассматривается выбор основных размеров трансформаторов.

При рассмотрении содержания данной книги в целом возникает замечание в отношении расположения материала. Так, например, едва ли является целесообразным помещение во введении описания принципа действия, конструкций и энергетических диаграмм всех типов электрических машин и трансформаторов. При издании курса электрических машин в нескольких частях, как указано в предисловии к данной книге, вероятно, в последующих частях не будут уже содержаться во избежание повторений подробные сведения о принципах действия рассматриваемых в них электрических машин. Следовательно, изучающему этот курс по данным книгам необходимо будет обращаться к пользованию первой частью курса.

Кроме этого, имеются также следующие небольшие замечания. В параграфе 1-2 первого раздела (стр. 8) понятие «электромагнитной мощности» машины заменено термином «электрическая мощность» для разных режимов работы электрических машин, что является не точным. В начале второго раздела книги после кратких сведений о назначении и области применения трансформаторов даются дифференциальные и комплексные уравнения рабочего процесса в них. При этом режимы холостого хода, короткого замыкания и нагрузки трансформатора рассматриваются как частные случаи рабочего процесса его. Хотя этим способом и удастся несколько сократить общий объем книги, однако рассмотрение физических процессов в указанном разделе получается несколько формальным.

В разделе 2 приводятся схемы замещения для параллельного включения трансформаторов и группы соединения обмоток в виде таблиц (табл. 2-3 и 2-4). Следовало бы для объяснения правильности составления групп соединений обмоток дать методику отыскания однопотенциальных зажимов для случаев доступных и не доступных нулевых точек.

В книге встречаются некоторые нарушения единообразия индексации в обозначениях физических величин. Например, ток холостого хода до стр. 61 обозначается I_0 , а далее — I_x .

Большой материал книги, изложенный на высоком научном уровне, отличается при сравнительно небольшом объеме ясностью, логичностью и последовательностью. Ввиду этого книга проф. Г. Н. Петрова является весьма ценным учебным пособием для студентов, изучающих курс электрических машин. В ней содержится много полезных сведений также и для инженеров, желающих углубить свои знания в этой области.

Доктор техн. наук, проф. Н. П. Ермолин,
кандидат техн. наук, доц. Г. С. Мавромати
и кандидат техн. наук, доц. И. Т. Талышинский

Кафедра электрических машин Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина)

Автор благодарит рецензентов за критический разбор его книги.

Термин «электрический», обычно используемый в сочетании с такими терминами как «машина», «аппарат», «энергия» и др., надо рассматривать как условный, о чем в начале книги имеется оговорка (стр. 7).

Индекс «х» введен, как следует из изложенного на стр. 61, для того чтобы подчеркнуть, что ток I_x , идентичный с током I_0 при холостом ходе, не идентичен с током I_0 при нагрузке.

Г. Н. Петров

Москва

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Башарин А. В. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ. 128 стр., ц. 4 р. 15 к. ЛЭТИ им. Ульянова. Изд. Ленинградского университета.

ГОСТ 433-50. КАБЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ С РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ. 9 стр., ц. 35 коп. Стандартгиз.

ГОСТ 8024-56. АППАРАТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ. НАГРЕВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ. 10 стр., ц. 35 коп. Стандартгиз.

ГОСТ 8033-56. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЕДИНИЦЫ. Взамен ОСТ 515 и ОСТ ВКС 5578. Срок введения 1. 1. 1957 г. 5 стр., ц. 20 коп. Стандартгиз.

Двоскин Л. И. КОНСТРУКЦИЯ И МОНТАЖ ПОЛОГО ПАКЕТА ПЛОСКИХ ШИН 31 стр., ц. 1 р. 95 к. Госэнергоиздат.

Мильман Я. В. и Петров И. А. АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН. Изд. 2-е, переработ. и доп., 392 стр., ц. 14 р. 85 к. Гизлегпром.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Сборник статей под ред. Г. И. Атабекова. 95 стр., ц. 3 р. 70 к. МАИ им. Орджоникидзе. Оборонгиз.

Омельяновский М. Э. ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. 269 стр., ц. 9 р. 40 к. Академиздат.

Петров В. М. и Петров С. М. НОВЫЙ МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНИЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ КАК КАНАЛА СВЯЗИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ. 29 стр., ц. 3 р. 50 к. Академиздат.

Подъяков А. С. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В ГЕРМАНСКОЙ ДЕМОКРАТИЧЕСКОЙ

РЕСПУБЛИКЕ. 12 стр., ц. 70 коп. Оргэнергострой. Госэнергоиздат.

Ратников Е. Ф. АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ. 94 стр., ц. 1 р. 60 к. Свердловское кн. издательство.

Ротштейн А. И. СТАТИСТИКА ЭНЕРГЕТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 127 стр., ц. 4 р. 50 к. Госстатиздат.

Соболев И. М. и Маркевич Е. Н. КУЙБЫШЕВСКАЯ ГЭС. 50 стр., ц. 45 коп. Куйбышевское кн. издательство.

Теумин И. И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ. 535 стр., ц. 15 р. 40 к. «Сов. радио».

ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ. Материалы совещания под ред. М. Э. Омеляновского. 252 стр., ц. 10 р. 20 к. Академиздат УССР.

Форд Д. У. К. ПРОЕКТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ. Пер. с англ. под ред. С. А. Скворцова. 32 стр., ц. 2 р. 20 к. Госэнергоиздат.

Хашинский В. П. и Шустов В. А. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. Изд. 2-е, испр. и доп. 150 стр., ц. 2 р. 10 к. Сельхозгиз.

Цейров Е. М. ВОПРОСЫ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ВОЗДУШНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ. 190 стр., ц. 8 р. 40 к. Труды ВЭИ, вып. 60. Госэнергоиздат.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ. Обработ. П. М. Сви. 20 стр., ц. 70 коп., ОРГРЭС. Госэнергоиздат.



ПОПРАВКИ

В № 9, 1956, стр. 38 на рис. 14 значения намагничивающей силы F_y должны быть умножены на 10; подпись к рис. 14 следует читать: Характеристики фазорегулятора с расширенным диапазоном сдвига фазы и малой мощностью управления при напряжении сети $U_c = 380$ в и токе в обмотке смещения $I_{cm} = 30$ ма.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова,
Н. Г. Дроздов (главный редактор), Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман,
И. И. Петров, В. И. Попков, И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), А. М. Федосеев,
М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.

**ТРАНСФОРМАТОРЫ
для ГЕНЕРАТОРОВ**
до самых крупных размеров и
наивысших напряжений

**ТРАНСФОРМАТОРЫ для
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
СЕТЕЙ**

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**ТРАНСФОРМАТОРЫ с
ВОЗДУШНЫМ
ОХЛАЖДЕНИЕМ**

РЕАКТОРЫ

**ДУГОГАСЯЩИЕ
КАТУШКИ**



Два из пяти 30 000-квт, 132/33-кв трансформаторов „ХАКБРИДЖ“ типа „ОН ОВ“ (погруженный в масло с естественным охлаждением или погруженный в масло с форсированным воздушным охлаждением), поставленных Департаменту железных дорог Нового Южного Уэльса, Австралия и (вставка) трехфазный магнитно-экранированный реактор с воздушным сердечником для введения 3,75%-ного реактивного сопротивления в 30-мгвт 6,6-кв систему

ТРАНСФОРМАТОРЫ „ХАКБРИДЖ“

Общая мощность в установках по всему свету свыше 22 млн. квт.

ВЫПРЯМИТЕЛИ „ХЮВИТТИК“

Общая мощность в установках по всему свету свыше 1,5 млн. квт.

Для:

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**
(100, 1 500 и 3 000 в, постоянного тока)

**ТРАМВАЕВ и
ТРОЛЛЕЙБУСОВ**

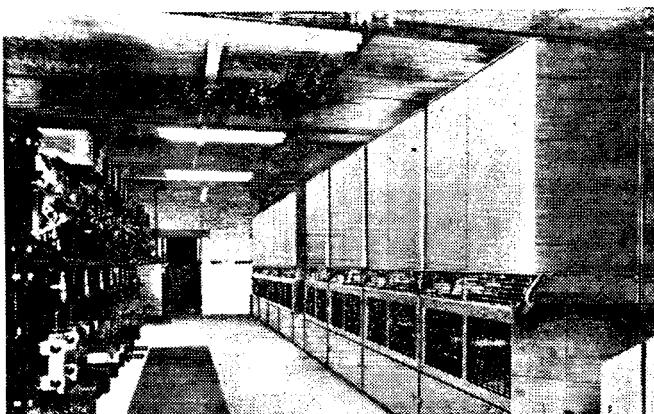
**ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

**ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ и
СИЛОВЫХ СЕТЕЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

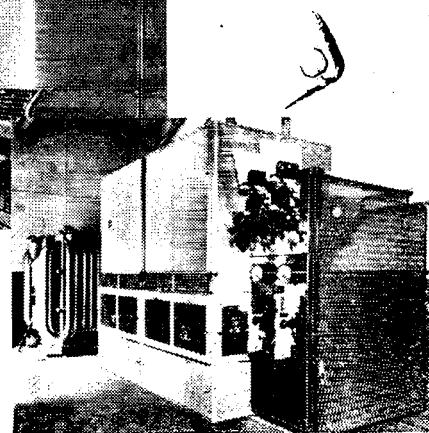
**МАШИН с
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

на сталепрокатных заводах, газовых заводах
текстильных фабриках и пр.

**ЭЛЕКТРОКАР и
ЭЛЕКТРОВОЗОВ
ПОСТОЯННОГО ТОКА
для ЗАРЯДКИ
АККУМУЛЯТОРНЫХ
БАТАРЕЙ**



Два 900-квт выпрямителя с выходной мощностью 3 600 а для привода вспомогательного оборудования сталепрокатного стана и (вставка) типичный 750-квт выпрямитель „ХЮВИТТИК“ для легкого режима тяги.



**HACKBRIDGE AND HEWITTIC ELECTRIC CO., LIMITED
WALTON-ON-THAMES · SURREY · АНГЛИЯ**

Телефон: Walton-on-Thames 760 (8 линий)

Телеграммы и Кабели: "Electric, Walton-on-Thames"

**ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА
на 1957 г.
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЖУРНАЛЫ**

„Электричество“

„Электрические станции“

с приложением

„Энергохозяйство за рубежом“

„Гидротехническое строительство“

„Теплоэнергетика“

„Торфяная промышленность“

„Светотехника“

„Вестник электропромышленности“

Реферативный журнал „Электротехника“

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ

городскими и районными отделами Союзпечати,
во всех конторах, отделениях и агентствах связи
и общественными уполномоченными по подписке
на предприятиях, в учебных заведениях
и учреждениях.

Адрес редакции: Москва К-12, Б. Черкасский пер., д. № 2. Телефон: К 4-24-80.

Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.