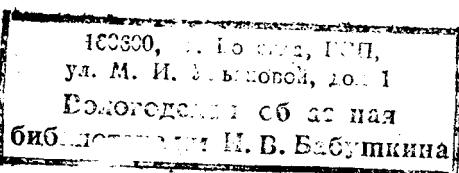


ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



1957

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

9

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

A. М. Некрасов, Е. С. Гройс, М. Л. Зеликин, В. Е. Турецкий и Э. А. Манькин — Электропе- редача постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс	
1	The Transmission System Stalingrad Hydro-electric Sta- tion — Donbass — A. M. Nekrasov, E. S. Groiss M. L. Zelikin, V. E. Turetski, E. A. Mankin
B. А. Веников и Д. А. Федоров — К вопросу о при- менении компенсированных синхронных компен- саторов	10
10	Concerning the Use of Compensated Synchronous Con- densors — V. A. Venikov, D. A. Fedorov
M. М. Соколов и В. М. Терехов — Асинхронный электропривод центробежных насосов с дроссе- лями насыщения	14
14	An Asynchronous Electrical Drive for Centrifugal Pumps Using Saturated Reactors — M. M. Sokolov, V. M. Terekhov
В. И. Радин — Реакция коммутационных токов в электромашинных усилителях с поперечным по- лем	17
17	Commutation Current Reaction in Amplidynes — V. I. Ra- din
В. Л. Иносов и А. М. Лучук — Частотное устрой- ство телеуправления с синхронными фильтрами	23
23	A Frequency Supervisory Control Device with Synchro- nous Filters — V. L. Inosov, A. M. Luchuk
И. С. Пинчук — Переходные процессы в асинхрон- ных двигателях при периодической нагрузке	27
27	Transients in Periodically Loaded Induction Motors — I. S. Pinchuk
П. К. Фейст — Анализ работы многофазных компен- сированных реле сопротивления при помощи кру- говых диаграмм	31
31	An Analysis of the Behavior of Multi-phase Compensat- ed Impedance Relays Using Circle Diagrams — P. K. Feist
Ю. Л. Мукосеев — Эффект близости в прямоуголь- ных шинах	36
36	The Proximity Effect in Rectangular Bus Bars — U. L. Mukosejev
И. П. Чучалин и В. М. Разин — Расчет гашения обратного напряжения в импульсной схеме	41
41	Calculating Back Voltage Extinguishing in a Pulse Cir- cuit — I. P. Chuchalin, V. M. Razin
Л. З. Гоголицын — Определение потерь в конденса- торах при импульсном режиме	45
45	Determining Losses in Capacitors Subjected to Impulse Duty — L. Z. Gogolitzin
Д. А. Ястржембский — Электромашинный метод урав- нивания потенциалов отсылающих пунктов	50
50	A Method of Equalizing the Potentials of Take-off Points Using Machines — D. A. Jastrzemscki
Г. С. Аронзон — Расчет параметров дренажной за- щиты	53
53	Calculating the Parameters of a Drainage Protection — G. S. Aronzon
Г. К. Нечаев и Д. В. Дорофеев — Релейный эф- фект в схемах регулирования температуры	58
58	The Relay Effect in Circuits Regulating Temperature — G. K. Nechaev, D. V. Dorofejev
В. Г. Васильев — Выбор параметров резонансного измерительного элемента частоты	60
60	Selecting Parameters for a Resonant Element Measur- ing Frequency — V. G. Vasiljev
Ф. И. Половиков — Опыты над электретами	63
63	Test of Electrets — F. I. Polovikov
М. С. Моргулис — О одном термоэлектрическом явлении	65
65	On a Certain Thermo-electric Phenomenon — M. S. Mor- gulis
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
М. М. Зархин — Опыт борьбы с потерями в город- ской электрической сети	69
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Ю. В. Плесков — Луиджи Гальвани	69
69	Experience in Reducing Losses in Urban Networks — M. M. Zarkhin
М. О. Каменецкий — Деятельность Э. Арнольда в России	72
72	FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING
ДИСКУССИИ	
О перспективах применения электропередач постоян- ного тока в Советском Союзе — Ю. Г. Толстов, И. Ф. Половой	72
72	DISCUSSION
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
К методике измерения толщины масляной пленки в опо- рах скользящего трения. Об ошибочности приме- нения векторной диаграммы Потье для исследования явнополюсных синхронных машин	73
73	NOTES AND LETTERS
ЗА РУБЕЖОМ	
Р. Я. Бриль — Развитие энергетики Китайской На- родной Республики	73
73	IN OTHER COUNTRIES!
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Пленочные конденсаторы. Современные комплектные распределительные устройства за рубежом. Электрификация железных дорог Японии на од- нофазном токе промышленной частоты. Новые типы стрелочных частотомеров	75
75	IN OTHER ENGINEERING JOURNALS
ХРОНИКА	
Конференция читателей в г. Баку. В секции электро- снабжения промышленных предприятий НТОЭП. Совещание по постоянным магнитам	88
88	CHRONICLE
БИБЛИОГРАФИЯ	
Б. С. Успенский, А. С. Кричевский и И. А. Бер- лин — Книга М. М. Синайского „Электрический привод затворов гидрооружений“	91
91	BIBLIOGRAPHY
А. А. Тайц — Книга Б. А. Телешева „Электротех- ника“	92
92	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	

Электропередача постоянного тока Сталинградская ГЭС— Донбасс

Инж. А. М. НЕКРАСОВ

Техническое управление МЭС,

Инж. Е. С. ГРОЙС

исследовательский институт постоянного тока,

М. Л. ЗЕЛИКИН и инж. В. Е. ТУРЕЦКИЙ

Теплоэлектропроект,

кандидат техн. наук Э. А. МАНЬКИН

Московский трансформаторный завод

Разрабатываемая электропередача Сталинградская ГЭС—Донбасс предусмотрена в Директивах XX съезда КПСС, она свяжет Южную энергосистему со Сталинградской ГЭС и явится одним из звеньев единой высоковольтной сети Европейской части СССР.

Электропередача предназначается для работы в режиме межсистемной связи. Во время паводков энергия будет передаваться от Сталинградской ГЭС в Донбасс, а в периоды года, когда из-за сезонных колебаний стока р. Волги мощность гидроэлектростанции снижается, в обратном направлении.

Номинальная передаваемая мощность определена в 750 Мвт. Ежегодно в оба направления будет передаваться 4 млрд. квт·ч. Длина линии 470 км. Принятое для электропередачи напряжение 800 кв определилось передаваемой мощностью и параметрами вентиляй, на которые можно ориентироваться, учитывая сроки ввода электропередачи.

Электропередача Сталинградская ГЭС—Донбасс — первая крупная передача постоянного тока. Возможность ее осуществления подготовлена исследованиями и разработками, проведенными в последние годы Научно-исследовательским институтом постоянного тока, Всесоюзным электротехническим институтом им. Ленина, Энергетическим институтом им. Кржижановского Академии наук СССР, Московским трансформаторным заводом и др. Большую роль в решении основных вопросов проектирования сыграли опыт эксплуатации экспериментально-промышленной передачи постоянного тока Кашира—Москва и проведенные на ней исследования [Л. 1 и 2].

Проект электропередачи Сталинградская ГЭС—Донбасс [Л. 3] разрабатывается Теплоэлектропроектом совместно с Научно-исследовательским институтом постоянного тока.

Схема и режимы работы электропередачи. В результате сопоставления различных схем для преобразовательных подстанций электропередачи выбрана восьмимостовая схема (последовательное соединение восьми преобразовательных мостов) с заземленной средней точкой на стороне постоянного тока (рис. 1). Среднее выпрямленное напряжение каждого моста 100 кв.

По сравнению с другими схемами с меньшим числом мостов выбранная схема обеспечивает более легкое протекание переходных процессов при нарушении работы одного из мостов. При отключении одного моста остальные семь обеспечивают передачу номинальной мощности с перегрузкой оборудования в допустимых пределах, что позволяет не предусматривать резервных мостов.

Глухое заземление средних точек обеих подстанций делит передачу на две практически независимые полуцепи с рабочим напряжением полюсов относительно земли ± 400 кв и в случае выхода из работы одной полуцепи обеспечивает передачу половины нормальной мощности [Л. 4].

Рассматривались два варианта исполнения трансформаторов, питающих преобразовательные мосты: однофазные трансформаторы мощностью 82 Мва в фазе и трехфазные мощностью по 123 Мва. В первом случае одна группа питает два преобразовательных моста, во втором — один трансформатор питает один мост. В результате рассмотрения было найдено, что при нынешнем уровне техники трансформаторостроения трехфазный трехобмоточный трансформатор указанной мощности с соответствующей изоляцией был бы нетранспортабельным; в двух таких трансформаторах потери холостого хода были бы значительно больше, чем в группе из трех однофазных, а удвоение необходимого числа выключателей 220 кв привело бы к удорожанию подстанции.

Каждый из трансформаторов имеет три рабо-

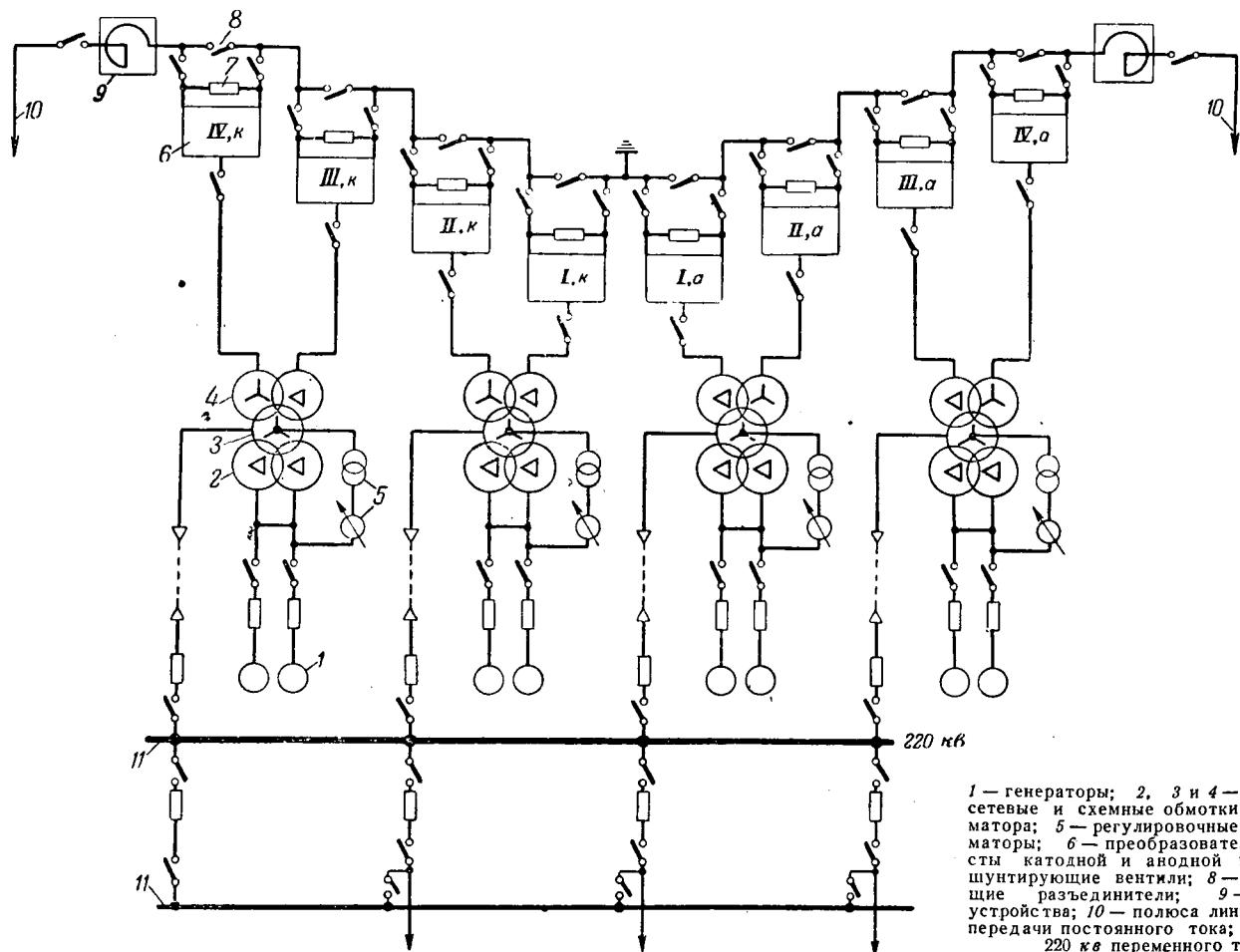


Рис. 1. Схема Стalingрадской преобразовательной подстанции.

чие обмотки: сетевую для связи с сетью трехфазного тока 220 кв; схемную напряжением 83 кв, состоящую из двух ветвей по количеству питаемых ею преобразовательных мостов, и третичную, также состоящую из двух ветвей.

Напряжение третичных обмоток трансформаторов Стalingрадской подстанции 13,8 кв, к каждой из этих обмоток присоединяется по два гидрогенератора.

Напряжение третичных обмоток трансформаторов Донбасской подстанции 10,5 кв; к каждой из этих обмоток присоединяются синхронный компенсатор мощностью 75 Мва и батарея статических конденсаторов мощностью 37,5 Мва (рис. 2).

Мощность компенсирующих устройств выбрана исходя из условия покрытия максимальной потребности преобразователя в реактивной мощности (передача номинальной мощности из Стalingрада в Донбасс) при коэффициенте мощности на шинах 220 кв, равном единице. Рассматривается вариант конденсаторной батареи, присоединенный непосредственно к шинам 220 кв. Применение этого варианта дает снижение потерь [Л. 5].

Трансформаторы будут иметь неизменный коэффициент трансформации. В нейтраль сетевой обмотки каждого из них будет включен регулировочный агрегат, позволяющий изменять ее напряжение под нагрузкой $\pm 9\%$.

Для каждого моста предусматривается шестифазная схема преобразования (рис. 3), а для подстанции в целом — 12-фазная, получаемая путем соединения одной ветви схемной обмотки каждого трансформатора в звезду, а другой — в треугольник. Применение 12-фазной схемы имеет целью уменьшение числа высших гармоник на стороне постоянного тока и в связанных с передачей сетях переменного тока.

Генераторы, питающие одну трансформаторную группу, будучи соединены между собой, работают в условиях, соответствующих 12-фазному режиму.

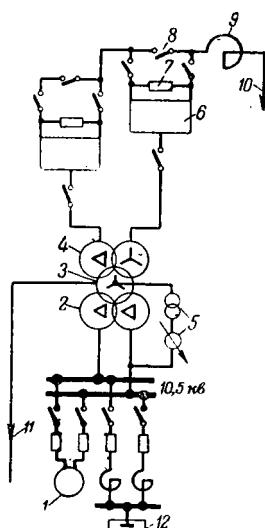


Рис. 2. Схема блока трансформатор — два моста подстанции в Донбассе.

1 — синхронный компенсатор; 2, 3 и 4 — третичная, сетевая и схемная обмотки трансформатора; 5 — регулировочный трансформатор; 6 — преобразовательный мост; 7 — шунтирующий вентиль; 8 — шунтирующий разъединитель; 9 — выхodное устройство; 10 — линия передачи постоянного тока; 11 — к шинам 220 кв переменного тока; 12 — статические конденсаторы.

С целью облегчения условий работы вентиляй и повышения надежности работы преобразовательных схем в каждое плечо моста включаются последовательно два вентиля. Нормально вентиля работают при напряжении, равном половине их номинального напряжения, и лишь в относитель но редких случаях пробоя или обратного зажигания в одном из вентиляй второй кратковременно оказывается под напряжением, равном номинальному. Чтобы распределение напряжения между вентилями плеча моста было равномерным, параллельно каждому из них включаются цепи из конденсаторов и активных сопротивлений.

Зажигание вентиляй в определенной последовательности, определяемой чередованием э. д. с. схемных обмоток трансформатора, достигается подачей на сетки вентиляй положительных отпирающих импульсов длительностью около $\frac{1}{3}$ периода промышленной частоты (время горения вентиля).

В проекте предусматривается быстродействующее сеточное регулирование [Л. 6 и 7], обеспечивающее устойчивость работы инвертора при колебаниях напряжения, коротких замыканиях в приемной сети и при нарушениях режима в отдельных мостах. Система сеточного регулирования ограничивает ток в передаче при аварийных режимах путем воздействия на сетки выпрямителя. Предусматривается быстродействующая защита посредством запирания сеток в случае аварии с последующим их автоматическим отпиранием (сеточное автоматическое повторное включение).

Большое значение для безболезненной ликвидации нарушений режима в отдельных мостах имеют шунтирующие вентиля, которые включаются между полюсами каждого моста (рис. 3). В случае неполадок в схеме моста (обратные зажигания, пробои, пропуски зажигания вентиляй и др.) рабочие вентиля запираются, подается отпирающий импульс на сетки шунтирующих вентиляй, мост шунтируется, и протекание тока в его рабочих вентилях прекращается. Поскольку мощность одного моста составляет лишь 12,5% общей мощности подстанции, работа передачи в целом не нарушается. Через несколько десятых долей секунды рабочие вентиля отпираются и автоматически восстанавливаются нормальная работа моста, так как в большинстве случаев такая пауза в протекании тока достаточна для восстановления нормального состояния вентиля. В случае же повреждений или неполадок, которые не устраняются за время шунтирования моста, включается шунтирующий разъединитель.

Выход моста из работы и ввод его в работу производятся без перерыва в работе передачи при включенном шунтирующем разъединителе посредством разъединителей в цепях полюсов моста и схемной обмотки.

Изменение направления передачи энергии производится посредством сеточного управления без каких-либо переключений в главной схеме.

С целью облегчения условий зажигания вентиляй и снижения радиопомех, возникающих при работе преобразовательной схемы, последователь-

но с каждым вентилем со стороны анода предусматриваются высокочастотные реакторы малой индуктивности (1,5 ... 2 мГн). При зажигании вентиля реактор ограничивает токи разряда параллельных емкостей.

Ограничение величины и скорости нарастания обратного напряжения после погасания вентиляй будет обеспечиваться в основном включением параллельно схемным обмоткам трансформаторов демпфирующих цепей из последовательно соединенных емкостей и активных сопротивлений.

На выходе линии передачи с подстанции предусматривается выходное устройство, основным элементом которого является линейный реактор индуктивностью 1,0 гн. Назначение этого устройства — сгладить форму кривой тока и напряжения в линии [Л. 8], ограничить скорость нарастания и величину аварийных токов, могущих протекать через вентиляи [Л. 9], демпфировать возникающие при переходных процессах низкочастотные колебания в линии.

Если из Сталинграда в Донбасс будет передаваться мощность, меньшая номинальной мощности передачи, то часть энергии генераторов, работающих на передачу постоянного тока, сможет выдаваться на шины 220 кв Сталинградской ГЭС. На подстанции в Донбассе в этом режиме высвобождается реактивная мощность, которая может использоваться в сети Донбассэнерго. Энергия, передаваемая из Донбасса, будет поступать на шины 220 кв Сталинградской ГЭС и через автомо-

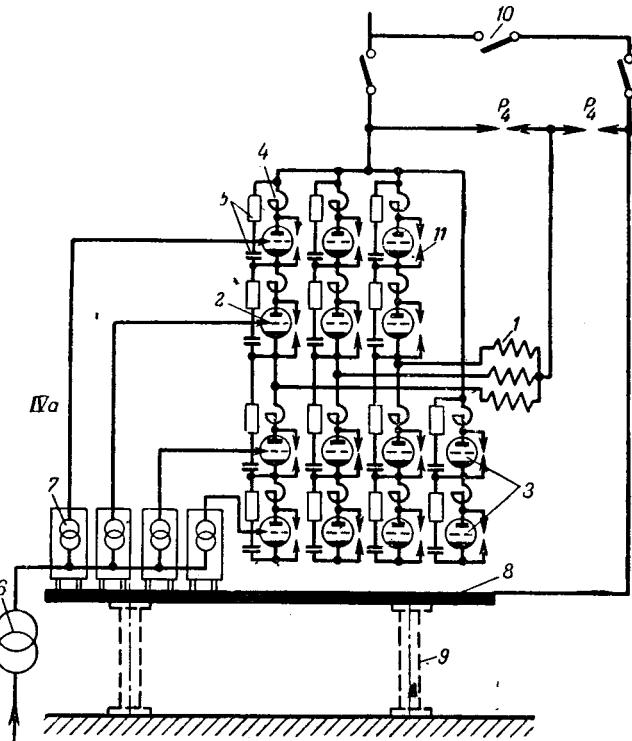


Рис. 3. Схема преобразовательного моста.

1 — схемная обмотка трансформатора; 2 — вентили в плече мостовой схемы; 3 — шунтирующие вентиля; 4 — высокочастотные реакторы; 5 — сопротивления и емкости для деления напряжения между вентилями; 6 — групповой изолирующий трансформатор собственных нужд; 7 — индивидуальные изолирующие трансформаторы (показаны для одной фазы моста); 8 — платформа промежуточного потенциала; 9 — опорные изолиторы; 10 — шунтирующий разъединитель; 11 — шунтирующий разрядный промежуток.

трансформаторы и линию 400 кв направляться в Москву. В этом режиме потребность Сталинградской подстанции (в данном случае инверторной) в реактивной мощности будет покрываться генераторами, которые одновременно смогут выдавать активную мощность на шины 220 кв, а большая часть мощности синхронных компенсаторов и конденсаторов подстанции в Донбассе будет использована в сети Донбассэнерго.

Регулирование режима работы передачи предусматривается вести таким образом, чтобы: а) передаваемая мощность поддерживалась на заданном уровне независимо от колебаний напряжения на стороне переменного тока; б) напряжение на шинах выпрямителя также поддерживалось на заданном уровне (840 кВ) независимо от эксплуатационных колебаний напряжения на стороне переменного тока и от передаваемой мощности, что приводит к наименьшим потерям энергии; в) потребление реактивной мощности было минимальным. При передаче в направлении Сталинградская ГЭС—Донбасс будет осуществляться регулирование частоты в системе Донбассэнерго посредством изменения передаваемой мощности. Регулирование будет осуществляться путем воздействия на сеточное управление преобразователей, регулировочные трансформаторы, систему регулирования гидрогенераторов Сталинградской ГЭС и возбуждение синхронных компенсаторов подстанции в Донбассе.

Уровни изоляции и защита от перенапряжений. Требования к уровням изоляции оборудования электропередачи постоянного тока определяются в основном внутренними перенапряжениями, возникающими при переходных и аварийных процессах.

В настоящее время разработана и проверена опытной эксплуатации передачи Кашира—Москва система мероприятий по снижению уровня пере-

напряжений: демпфирование колебательных процессов, принудительное выравнивание распределения напряжения, обеспечение определенной последовательности автоматических операций в переходных режимах и др.

Однако эти мероприятия не исключают необходимости в непосредственной защите изоляции оборудования разрядниками, главным образом вследствие того, что в каскадной схеме могут возникнуть условия, при которых полное напряжение прикладывается лишь к отдельным ее элементам. Кроме того, разрядники обеспечивают сохранность изоляции оборудования в случае нарушения работы устройств автоматики или демпфирующих устройств.

Каскадное соединение преобразовательных мостов предопределяет применение ступенчатой изоляции подстанционного оборудования по отношению к потенциалу средней (заземленной) точки преобразователя.

Схема защиты от перенапряжений, применимелько к которой определены требования к уровням изоляции оборудования, показана на рис. 4. Принятое размещение разрядников обеспечивает жесткую фиксацию предельных значений напряжения на оборудовании при всевозможных режимах.

Пробивные напряжения выбраны такими, чтобы разрядники срабатывали в редких случаях значительных перенапряжений, возникновение которых возможно лишь при авариях, связанных с серьезными нарушениями работы передачи. Разрядники не должны отключать сопровождающих токов, так как это обеспечивается в результате автоматических операций по восстановлению нормального режима работы схемы. Эти операции приводят либо к шунтированию разрядников (включение шунтирующих вентиляй с последующим автоматическим вводом моста),

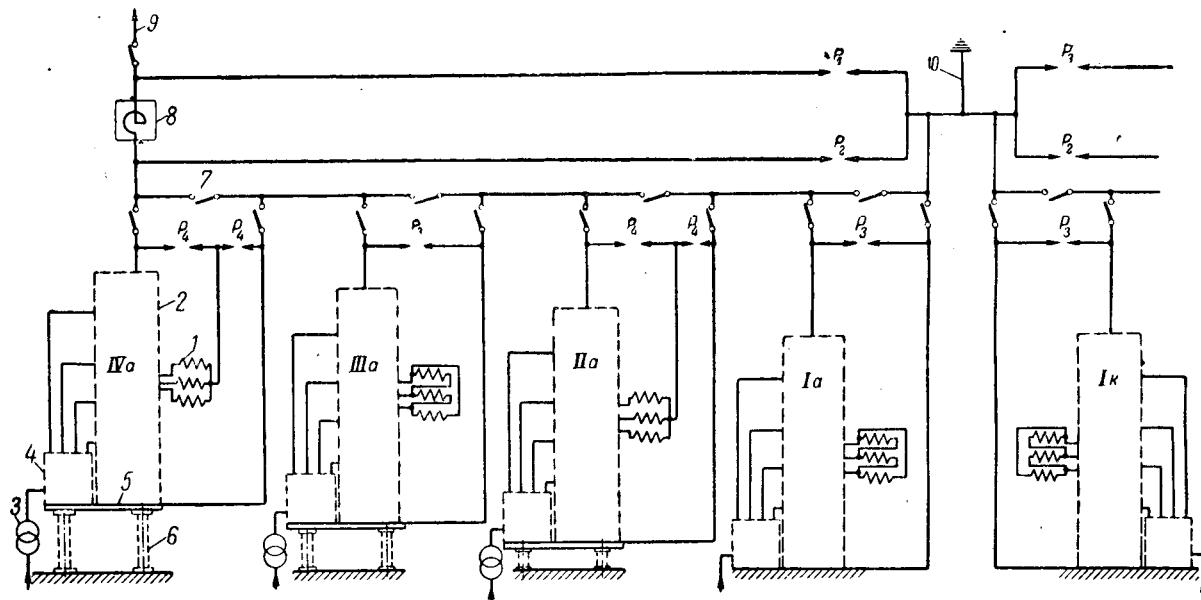


Рис. 4. Схема защиты от перенапряжений (показана часть подстанции).

1 — схемные обмотки трансформаторов; 2 — преобразовательные мосты; 3 — групповые изолирующие трансформаторы собственных нужд; 4 — индивидуальные изолирующие трансформаторы; 5 — платформы промежуточного потенциала; 6 — опорные изоляторы; 7 — шунтирующие разъединители; 8 — выходное устройство; 9 — полюс линии постоянного тока 400 кв; 10 — заземление средней точки преобразовательной схемы.

либо к обесточению разрядника (запирание сеток выпрямителя с его последующим автоматическим повторным включением). Таким образом, в качестве разрядника может быть использован защитный промежуток со стабилизированным пробивным напряжением и относительно быстрой деионизацией после погасания в нем дуги.

Наибольшие напряжения на линии и на оборудовании, присоединенном к полюсам подстанций, определяются верхним пределом пробивного напряжения разрядников P_1 и P_2 (рис. 4), который принят равным двойному рабочему напряжению. Наибольшие значения напряжения на остальном оборудовании определяются пробивными напряжениями разрядников P_3 и P_4 и э. д. с. трансформаторов.

Поскольку перенапряжения имеют характер униполярного импульса длительностью до десятых долей секунды, а в некоторых редких случаях и более, признано целесообразным испытывать изоляцию оборудования повышенным постоянным напряжением. Соответствующие значения испытательных и разрядных напряжений для основного оборудования, определенные с учетом поправок на условия испытаний и необходимых запасов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изоляция	Одноминутное испытательное напряжение, кв	Разрядное напряжение, кв	
		сухоразрядное	мокро-разрядное
Гирлянды изоляторов на линии электропередачи . . .	—	—	970
Изоляторы шин и оборудования, присоединенного к полюсу преобразовательной подстанции	—	1 100	850
Главная изоляция обмотки линейного реактора	1 000	—	—
Опорные изоляторы платформ промежуточного потенциала и ошиновки, связанной с платформами:			
IV моста	—	1 100	850
III моста		800	750
II моста		370	350
Главная изоляция схемных обмоток трансформаторов:			
III и IV мостов	1 000	—	—
I и II мостов	650	—	—
Опорная изоляция вентиляй	—	520	—
Главная изоляция индивидуального изолирующего трансформатора	500	—	—
Главная изоляция групповых изолирующих трансформаторов:			
III и IV мостов	1 000	—	—
I и II мостов	500	—	—

Задача от атмосферных перенапряжений обеспечивается разрядником P_1 , характеристики которого определяют требования к импульсной прочности изоляции линейного реактора и оборудования, расположенного перед реактором со стороны линии. Благодаря большой индуктивности линейного реактора атмосферные перенапряжения в пределах преобразовательной схемы

весьма малы и не оказывают влияния на выбор изоляции.

Каждый вентиль предусмотрено шунтировать промежутком простейшей конструкции. Основное назначение этого промежутка — ограничивать напряжение на вентиле при обрыве дуги в нем, так как пробой вентиля при значительном перенапряжении может привести к повреждению изоляции анодного узла и к нарушению дальнейшей устойчивой работы вентиля.

Основное оборудование преобразовательных подстанций. Главным элементом преобразовательных подстанций является ртутный вентиль¹.

Основные характеристики вентиля: одноанодный, металлический, разборный, с ртутным катодом, с постоянно горящей дугой возбуждения, с управляющими электродами. Охлаждение — масляное. Максимальное значение анодного тока вентиля 900 а, расчетная амплитуда анодного напряжения 130 кв.

Вентиль снабжается шкафом собственных нужд, предназначенным для питания дежурной дуги возбуждения, ртутного и форвакуумного насосов, нагрева анода и анодной камеры. Кроме того, шкаф служит для подачи управляющих импульсов на электроды вентиля, для измерений, питания устройств автоматики, сигнализации и т. п.

Главные трансформаторы мощностью 82,5 Мвт в фазе, питающие преобразовательные мосты, должны удовлетворять ряду требований, существенно отличающихся от требований, предъявляемых к обычным мощным трансформаторам.

В стационарном режиме на главную изоляцию схемных обмоток действует напряжение «подпора», содержащее большую постоянную составляющую. Для главной изоляции схемных обмоток в качестве основного принято испытание повышенным постоянным напряжением.

Для создания изоляции схемной обмотки, удовлетворяющей поставленным требованиям (табл. 1), в ВЭИ им. Ленина и на Московском трансформаторном заводе проводятся систематические экспериментальные исследования на моделях, в ходе которых выявлены некоторые закономерности поведения трансформаторной изоляции при воздействии на нее постоянного напряжения. В частности, в то время как пробивная прочность маслобарьерной изоляции при постоянном напряжении существенно превышает амплитуду пробивного переменного напряжения, величина напряжения разряда по поверхности при постоянном напряжении, наоборот, снижается. Применяя правильные конструктивные формы, учитывающие особенности поведения изоляции при воздействии на нее постоянного напряжения, можно допустить градиенты, существенно превышающие амплитудные значения градиентов в изоляционных конструкциях, рассчитанных на переменное напряжение.

Для окончательной отработки конструкции строится модель изоляции в натуральную вели-

¹ Вентиль разрабатывается Всесоюзным электротехническим институтом им. Ленина. Его данные и описание должны быть предметом специальной статьи.

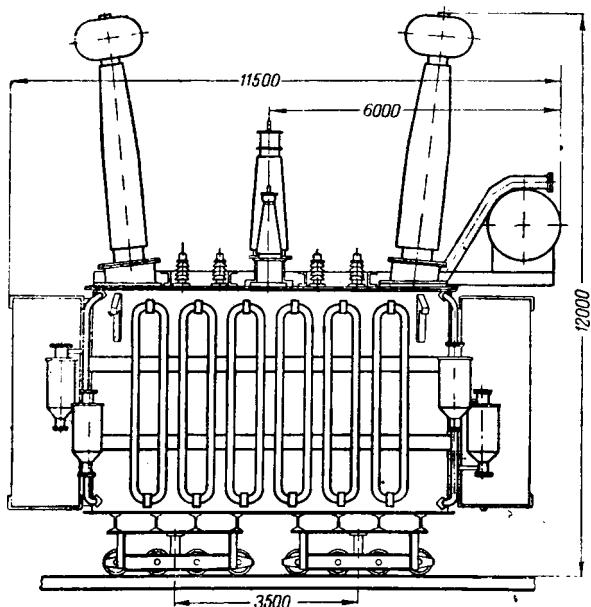


Рис. 5. Эскиз главного трансформатора 13,8/83/220 кв, 85/70, 85 Мв.

чину. Строится также модель для исследования поведения изоляции при весьма продолжительном воздействии выпрямленного напряжения (согласованно потенциалу моста относительно земли в стационарном режиме).

Атмосферным воздействием схемная обмотка практически не подвержена. Однако импульсные воздействия на схемную обмотку возможны, когда происходит перекрытие на одном из элементов изоляции в преобразовательной схеме. Для схемной обмотки IV моста принято импульсное испытательное напряжение 1 000 кв при полной волне 1,5/40 мкsec.

Разумеется, кроме указанных специальных испытаний, трансформатор должен выдерживать обычные испытания изоляции для проверки прочности ее во всех обмотках.

Для ветвей схемной обмотки, питающих отдельные мосты, принято такое взаимное расположение, при котором включение или отключение одного из мостов практически не отражается на работе другого моста, питающегося от второй ветви. При выборе взаимного расположения схемной и третичной обмоток принималось во внимание распределение высших гармоник тока между основными источниками мощности (гидрогенераторами и сетью 220 кв), распределение токов короткого замыкания между этими основными источниками и ряд конструктивных соображений. В результате решено обмотки расположить в следующем порядке: непосредственно у сердечника располагается третичная обмотка, затем—схемная и снаружи—сетевая.

Так как при аварийных режимах, особенно при обратных зажиганиях, трансформаторы подвержены тяжелым электродинамическим воздействиям, при разработке конструкции трансформаторов уделяется много внимания обеспечению высокой механической прочности обмоток, особенно схемной. Эскиз главного трансформатора представлен на рис. 5.

Крупным элементом оборудования преобразовательных подстанций являются линейные реакторы на 900 а постоянного тока с индуктивностью порядка 1,0 гн, что соответствует типовой мощности порядка 130 Мва. Реактор является основным элементом фильтра, сглаживающего высшие гармоники выпрямленного тока и напряжения; он предназначен также для ограничения скорости нарастания аварийного тока и его амплитуды, вследствие чего индуктивность реактора не должна резко спадать при токах, значительно превосходящих его номинальный ток.

Как показали сравнительные расчеты, в этих условиях наиболее рациональным является бессердечниковый реактор. Построение транспортабельного бессердечникового реактора такой большой мощности и высокого уровня изоляции находится в пределах возможности. Чтобы можно было судить о его размерах, сообщим, что вес меди в нем по предварительным расчетам превышает 30 т.

Компоновка преобразовательных подстанций. Вентили и вспомогательное оборудование размещаются в закрытом отапливаемом помещении (вентильный зал), что обеспечивает необходимые для их нормальной работы постоянство температуры и удобство производства работ при ремонтах, а также позволяет упростить вспомогательное оборудование.

Вентили со шкафами собственных нужд и вспомогательным оборудованием размещаются на так называемых платформах промежуточного потенциала, электрически соединенных с одним из полюсов моста. Изоляция этих платформ относительно земли растет вместе с порядковым номером моста, считая от заземленной точки.

Питание собственных нужд вентилями и подача управляющих импульсов к ним осуществляются через групповые изолирующие трансформаторы, включенные между платформами и землей (по одному на мост), и индивидуальные изолирующие трансформаторы (по числу вентиляй).

Индивидуальный изолирующий трансформатор состоит из однофазного элемента, через который подаются управляющие импульсы на сетку, и трехфазного элемента, обеспечивающего энергией собственные нужды вентиля. Групповой изолирующий трансформатор собственных нужд служит для питания трехфазных элементов всех индивидуальных трансформаторов данного моста. Групповой импульсный изолирующий трансформатор состоит из шести или более небольших сеточных трансформаторов, каждый из которых соединен каскадно с соответствующим однофазным элементом индивидуального трансформатора. Вторичные обмотки групповых изолирующих трансформаторов потенциально связаны с платформами преобразовательных мостов.

Большое количество изолирующих трансформаторов, расположенных внутри вентильного зала, требует максимальной их компактности и минимального объема масла. В соответствии с этим в основу конструкции изолирующих трансформаторов положены следующие принципы: а) применение «кабельной» изоляции и соответ-

ствующей технологии сушки и заливки маслом; б) тщательное выравнивание напряженности поля; в) выполнение групповых изолирующих трансформаторов для III и IV мостов из двух ступеней, соединенных каскадно.

На рис. 6 показан групповой изолирующий трансформатор, в котором размещено восемь независимых магнитных цепей (сердечников). На каждой магнитной цепи расположены первичная и вторичная обмотки. Вторичная обмотка верхней ступени каскада изолирована на испытательное постоянное напряжение 1 000 кв.

Принятая система размещения вентилей и их вспомогательного оборудования позволила резко сократить количество элементов оборудования, рассчитанных на полное напряжение относительно земли.

Платформы промежуточного потенциала представляют собой металлические рамы (рис. 7), установленные на опорных изоляторах, высота которых зависит от положения моста в схеме. Для удобства обслуживания все платформы располагаются на одном уровне, а разница в высоте изоляторов компенсируется металлическими колоннами. Изоляция вентиляй относительно платформы одинакова для всех мостов.

Изолирующий трансформатор, элементы демпфирующей цепочки и анодный реактор в конструктивном отношении комплектуются вместе, что позволяет свести этот узел к одной колонне, устанавливаемой рядом с вентилем (рис. 7).

Для измерения выпрямленного тока и напряжения создаются измерительные трансформаторы, основанные на принципе подмагничивания. Они предназначаются не только для контроля стационарного режима, но и для целей защиты при аварийных условиях и в связи с этим должны удовлетворять жестким требованиям в отношении точности передаточного коэффициента в нестационарных режимах.

Обслуживание вентилей и наблюдение за контрольно-измерительными и сигнальными приборами ведется с балконов, располагаемых вдоль стен вентильного зала.

На рис. 8 представлен разрез, а на рис. 9 — план преобразовательной подстанции в Донбассе, которая, кроме преобразования постоянного тока в переменный или обратно, выполняет также функции крупной узловой подстанции 220 кв. Преобразовательная подстанция на Стalingрадской ГЭС совмещена со зданием самой станции [Л. З].

Заземлители, через которые осуществляется работа передачи в однополюсном режиме (другим полюсом служит зем-

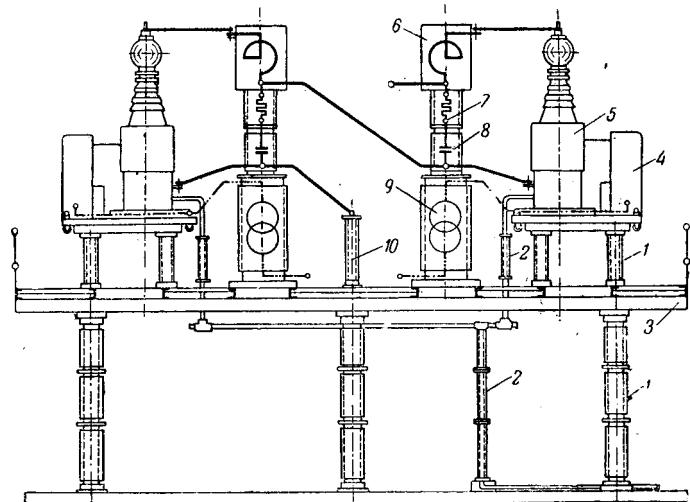


Рис. 7. Платформа промежуточного потенциала.

1 — опорные изоляторы; 2 — изолирующие маслопроводы; 3 — платформа промежуточного потенциала; 4 — шкафы собственных нужд; 5 — ртутные вентили; 6 — высокочастотные реакторы; 7 — омические сопротивления; 8 — конденсаторы; 9 — индивидуальный изолирующий трансформатор; 10 — опорный изолятор.

ля), отнесены от подстанций на расстояние нескольких километров и соединены со средними точками преобразовательных схем воздушными линиями, уровень изоляции которых соответствует уровню изоляции линий на номинальное напряжение 10 кв. Такое размещение заземлителей позволяет уменьшить токи в земле на территории подстанции.

Линия электропередачи. Рассматривались два варианта линейной части передачи: кабельный и воздушный. Их сопоставление показало, что на нынешнем уровне развития кабельного производства стоимость кабельной линии в 2 ... 2,5 раза выше стоимости воздушной. Потери в кабельной линии ввиду ограничения сечения полюса до 1 000 мм^2 выше, чем в воздушной. Переходные процессы в воздушной передаче вследствие значительно меньшей емкости протекают легче, чем в кабельной, и вентили в меньшей степени подвергаются резким изменениям тока. Ввиду этих соображений решено принять воздушный вариант линии. Линия сооружается одноцепной.

Выходы линии с преобразовательной подстанции Стalingрадской ГЭС проходят в здании гидроэлектростанции и по плотине. Вследствие стесненных условий они осуществляются кабелем постоянного тока 400 кв. Длина выводов 3,3 км.

Линия в основном проходит во II климатическом районе гололедности и лишь небольшие ее участки у конечных пунктов попадают в III район.

Расчетная скорость ветра по всей трассе линии принята равной 30 м/сек, за исключением небольшой ее части, проходящей в районе водохранилища Стalingрадской ГЭС, где скорость ветра принята равной 35 м/сек.

При выборе сечения сопоставлялись два типа сталеалюминиевых проводов: АСО-580 и АСО-712. В обоих случаях принималось по два провода на полюс. Поскольку потери в линии, выполненной проводом АСО-712, меньше и до-

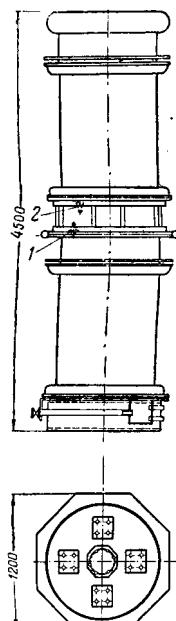


Рис. 6. Эскиз группового изолирующего трансформатора.

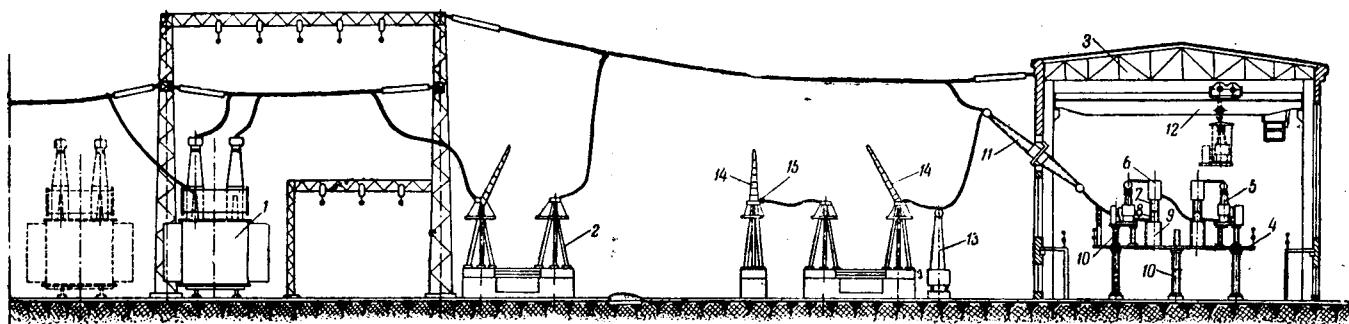


Рис. 8. Подстанция в Донбассе (разрез).

1 — главный трансформатор; 2 — разъединитель в цепи схемной обмотки; 3 — вентильный зал; 4 — платформа промежуточного потенциала; 5 — ртутные вентили со шкафом управления; 6 — высокочастотные реакторы; 7 — омические сопротивления; 8 — конденсаторы; 9 — индивидуальные изолирующие трансформаторы; 10 — опорный изолятор; 11 — проходной изолятор; 12 — мостовой кран с переносным устройством для вентиляй; 13 — измерительный трансформатор постоянного тока; 14 — линейный разъединитель постоянного тока 400 кв; 15 — обходная шина 400 кв.

полнительные капитальные затраты на ее сооружение вследствие этого окупаются в 5 лет, решено применять этот провод. Плотность тока в линии при этом составит 0,63 а/мм². Провода одного и того же полюса располагаются горизонтально, расстояние между ними принято равным 400 мм, дистанционные распорки устанавливаются через каждые 50 м. Потери от короны составят меньше 6% активных потерь в линии.

Максимальное напряжение в алюминии проводов принято равным 8 кг/мм². Высота проме-

жуточных опор 22,5 м, анкерных и угловых опор 18 м. Расстояние между полюсами линии 10 м. Расчетные пролеты приняты равными: во II климатическом районе 370 м, в III климатическом районе 340 м.

Для выбора конструкции опор сопоставлялся ряд их вариантов. Технико-экономические показатели трех основных вариантов приведены в табл. 2. В результате сопоставления принят вариант 1.

Опоры выполняются из оцинкованной стали

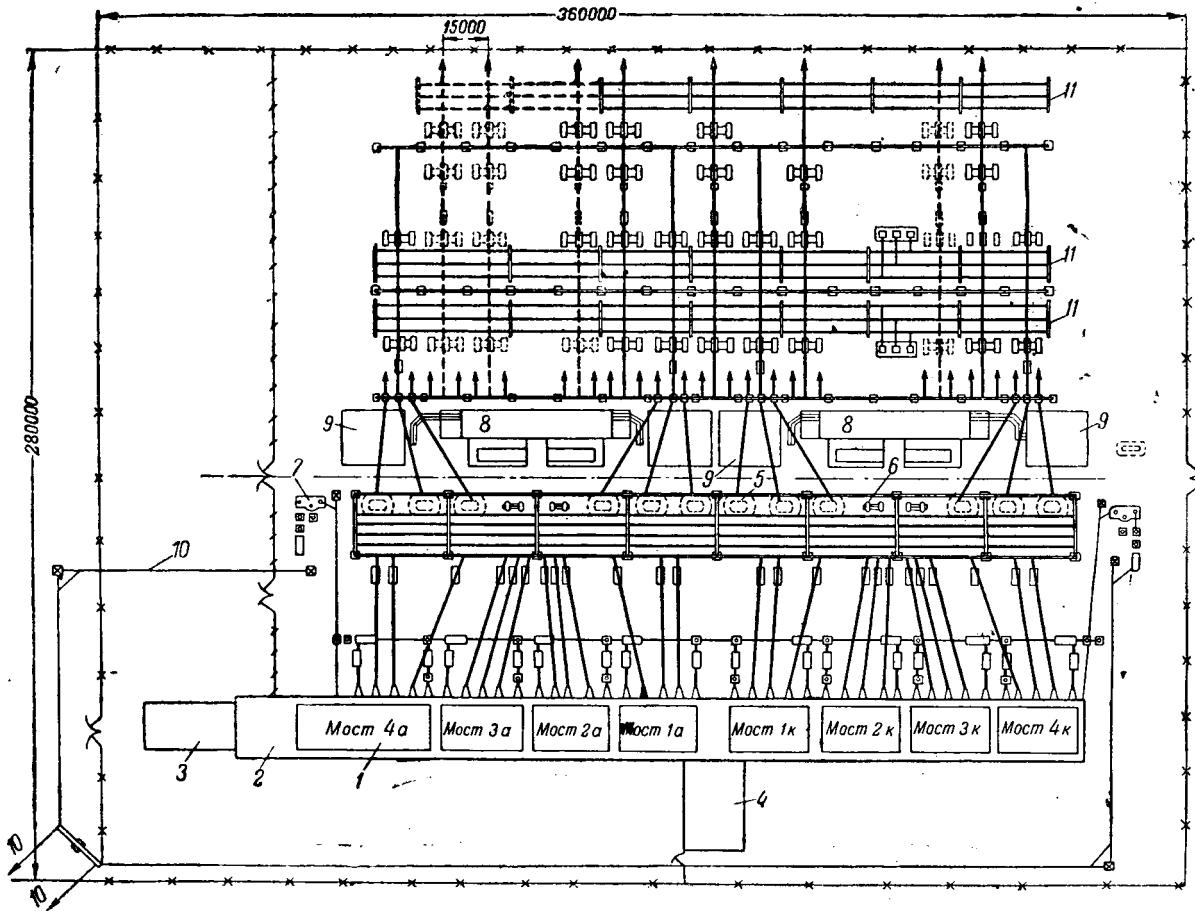


Рис. 9. Подстанция в Донбассе (план).

1 — вентильный зал; 2 — испытательные стенды; 3 — мастерские по ремонту вентиляй; 4 — главный щит управления; 5 — главные трансформаторы; 6 — регулирующие трансформаторы; 7 — линейные реакторы; 8 — синхронные конденсаторы; 9 — батареи статических конденсаторов; 10 — линия постоянного тока; 11 — шины 220 кв переменного тока.

Таблица 2

Характеристика варианта	Расход металла, %	Расход бетона и сборного железобетона, %	Расход изоляторов, %	Стоимость, %
Промежуточная опора — свободно стоящая, провода крепятся в глухих зажимах с общим выпускающим устройством. Анкерно-угловые опоры ставятся в вершинах углов поворотов линии, на прямых участках через каждые 15 км и на ответственных переходах .	100	100	100	100
Промежуточная опора на оттяжках, остальные характеристики такие же, как у опор варианта 1	95,3	121,0	100	101,2
Промежуточная опора на оттяжках с несущей траверсой, крепление проводов в глухих зажимах. Анкерные опоры применяются только на ответственных переходах через железные дороги, линии электропередачи 220 кв, шоссейные дороги 1-го класса. В вершинах углов поворота трассы устанавливаются угловые промежуточные опоры	124,0	143,0	95,5	109,6

чи можно получить, если сравнить их с показателями передачи трехфазного тока.

Теплоэлектропроектом было разработано проектное задание передачи трехфазного тока Стalingрадская ГЭС — Донбасс напряжением 400 кв. Линия была принята одноцепной, с проводами в фазе $3 \times \text{ACO}-480/601$, присоединение линии к сети 220 кв в Донбассе предполагалось осуществить через два автотрансформатора по 400 Мва. Предусматривалась продольно-емкостная компенсация, стоимость которой при экономическом сравнении включалась в стоимость подстанции.

Сопоставление технико-экономических показателей обеих электропередач приведено в табл. 3.

Таблица 3

Показатели	Передача постоянного тока	Передача переменного тока
Капитальные вложения, %:		
в линию	71	100
в подстанции	170	100
в электропередачу в целом	102	100
Потери энергии, в % передаваемой энергии:		
в линии	1,9	4,65
на подстанциях	4,1	1,35
в электропередаче в целом	6,0	6,0
Коэффициент полезного действия, %	94	94

марки Ст-3. Промежуточные и анкерные опоры — одностоечные (Т-образные), угловые — двустоечные. Промежуточные опоры (рис. 10) — широкобазные с основанием $3,8 \times 3,8$ м, что позволяет применить свайные и сборные железобетонные фундаменты почти по всей трассе.

Поддерживающие гирлянды изоляторов запроектированы длиной 4,4 м с мокроразрядным напряжением 970 кв при приложении постоянного напряжения.

От атмосферных перенапряжений линия защищена одним тросом с углом защиты 30° (на промежуточной опоре). При импульсном сопротивлении заземления опор 7 ... 10 ом защитный уровень линии составляет 220 ... 150 ка. Расчетная вероятность грозовых перекрытий для всей линии — 1 раз в 2—3 года. При оценке условий грозозащиты следует иметь в виду, что ряд особенностей передачи постоянного тока (сеточное автоматическое повторное включение, ограничение тока короткого замыкания и быстрое его отключение, сохранение в работе половины передачи при отключении одного полюса) позволяет ориентироваться на существенное облегчение требований к уровню грозозащиты линии.

Для передачи технологических сигналов (изменение направления передачи, работа защиты, регулирование, телемеханика) создаются каналы высокочастотной связи по проводам электропередачи и по радиорелейной линии.

Технико-экономические показатели и сравнение с передачей переменного тока. Наиболее наглядное представление о технико-экономических показателях проектируемой электропередачи

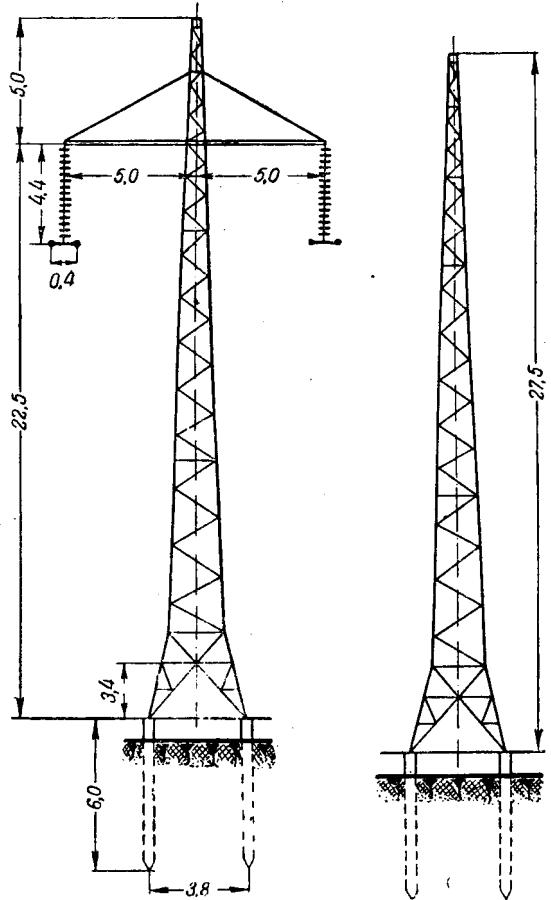


Рис. 10. Промежуточная опора линии электропередачи ± 400 кв.

Как видно из приведенных цифр, линия постоянного тока оказалась почти на 30% дешевле линии переменного тока, а потери энергии в ней почти в 2,5 раза ниже, чем в линии переменного тока. Подстанции же постоянного тока оказались более дорогими, а потери на них значительно большими. Вследствие этого для электропередачи Сталинградская ГЭС — Донбасс, имеющей сравнительно небольшую дальность (470 км), общий объем капиталовложений и к. п. д. всей электропередачи практически оказались одинаковыми как при постоянном, так и переменном токе.

Для электропередачи постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс стоимость передачи 1 квт·ч составила 0,9 коп.

В табл. 4 приведены данные о потерях в отдельных элементах преобразовательной подстанции в Донбассе. Эти данные показывают, что экономические показатели подстанций могут быть улучшены путем замены синхронных компенсаторов статическими конденсаторами, уменьшения числа вентиляй (один вентиль в плече), изыскания способов снижения потерь в трансформаторах.

Таблица 4

Элементы подстанции	Потери, %
Силовые и регулировочные трансформаторы	54
Вентили (собственные нужды и потери в дуге)	16
Устройства для покрытия потребности в реактивной мощности:	
синхронные компенсаторы	19
конденсаторы	4
Выходные устройства и устройства для демпфирования колебаний	7
Всего . . .	100

Выводы. Технико-экономические показатели электропередачи Сталинградская ГЭС — Донбасс

на постоянном токе практически одинаковы с показателями электропередачи на переменном токе. Электропередача на постоянном токе имеет некоторые эксплуатационные преимущества: независимость регулирования частоты в связанных системах, весьма малое влияние аварии в одной системе на работу другой, наличие двух независимых полукепелей с соответствующими возможностями резервирования.

Электропередача постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс является важнейшим этапом для перехода к весьма дальним и мощным передачам, где применение постоянного тока может дать существенный экономический эффект.

[18. I. 1957]

Литература

1. В. П. Пименов и М. Р. Сонин. Электропередача постоянного тока высокого напряжения. Электричество, № 7, 1955.

2. А. М. Некрасов и М. Р. Сонин. Опыт передачи электроэнергии постоянным током. Электрические станции, № 7, 1955.

3. В. П. Пименов, А. В. Пессе, А. М. Рейдер, С. С. Рокотян и В. Е. Турецкий. Электропередача постоянного тока Сталинградская ГЭС — Донбасс. Электрические станции, № 11, 1956.

4. С. А. Баженов, М. И. Михайлов и К. К. Никольский. Коррозия подземных металлических сооружений при передаче энергии постоянного тока по схеме «кабель — земля». Электрические станции, № 1, 1956.

5. В. М. Квятковский. Совместная работа преобразователя с приемной энергосистемой простейшей структуры и компенсация реактивной мощности. Известия НИИПТ, вып. 1, 1956.

6. А. М. Рейдер. Анализ устойчивости системы регулирования передачи постоянного тока Кашира — Москва. Известия НИИПТ, вып. 1, 1956.

7. Е. М. Берлин. Устойчивость системы регулирования передачи постоянного тока при использовании нового безлампового регулятора тока. Известия НИИПТ, вып. 1, 1956.

8. А. М. Пинцов. О расчете гармоник тока звуковых частот в линии электропередачи постоянного тока. Известия НИИПТ, вып. 1, 1956.

9. В. П. Пименов и А. В. Пессе. Опрокидывание инвертора. Электричество, № 6, 1956.



К вопросу о применении компенсированных синхронных компенсаторов¹

Доктор техн. наук, проф. В. А. ВЕНИКОВ
и кандидат техн. наук Д. А. ФЕДОРОВ
Московский энергетический институт

Одним из мероприятий, позволяющих увеличить статическую устойчивость дальних электропередач, является установка на промежуточных подстанциях синхронных компенсаторов. Необходимая для обеспечения статической устойчивости мощность синхронных компенсаторов может быть снижена за счет последовательного включения с ними статических конденсаторов [Л. 1 и 2].

Допустимая степень компенсации реактивного сопротивления компенсатора зависит от его кон-

струкции и от того, на какую внешнюю сеть работает компенсатор. С увеличением отношения эквивалентного сопротивления внешней сети к переходному сопротивлению компенсатора (включая трансформатор) допустимая степень компенсации растет (рис. 1).

На самовозбуждение компенсированного синхронного компенсатора в сильной степени влияет конструкция его демпферных обмоток. От конструкции и параметров демпферных обмоток резко зависит зона самовозбуждения или область неустойчивости электромагнитного процесса. Поэтому

¹ Печатается в порядке обсуждения.

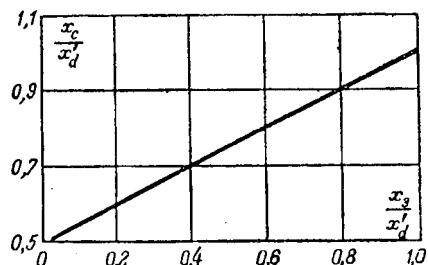


Рис. 1. Степень компенсации реактивности компенсаторов при различном соотношении сопротивлений внешней сети и компенсатора.

му делать общие выводы на основании только расчета или единичного опыта на случайном синхронном компенсаторе, как это делают, например, Ю. А. Розовский и др. в своей статье [Л. 3], неосторожно.

Исследования на электродинамической модели МЭИ с одновременным проведением расчетов по различным методам позволили установить зависимость степени компенсации $\frac{x_c}{x_d}$ от дополнительного активного сопротивления ΔR в цели промежуточного компенсатора с демпферной обмоткой.

Приведенные на рис. 2 зависимости показывают существенное влияние исполнения демпферных обмоток на зону самовозбуждения. С увеличением постоянных времени демпферных обмоток возможная степень компенсации растет (кривые 1 и 2). Хорошие результаты получаются при применении демпферной обмотки, действующей только в поперечной оси машины (кривая 4). С увеличением постоянной времени такой поперечной демпферной обмотки зона самовозбуждения сужается и при значениях постоянной времени, соизмеримых с постоянной времени обмотки возбуждения, может приблизиться к зоне самовозбуждения компенсатора без демпферных обмоток. Кривая 3 относится к конструкции демпферной обмотки, предложенной Н. А. Поляком [Л. 6]. Указанная обмотка, действующая в продольной и поперечной осях, значительно уменьшает область самовозбуждения².

Полученные результаты, показанные на рис. 2, приводят к выводу, что в синхронных компенсаторах, снабженных демпферными обмотками, компенсация может быть доведена до 65 ... 70% переходного сопротивления при небольшом (3 ... 4%) активном сопротивлении в цели статора.

Применение поперечной демпферной обмотки с увеличенной постоянной времени позволяет повысить компенсацию до 80 ... 90% с уменьшением дополнительного активного сопротивления до 1 ... 2%. В компенсаторах без демпферных обмо-

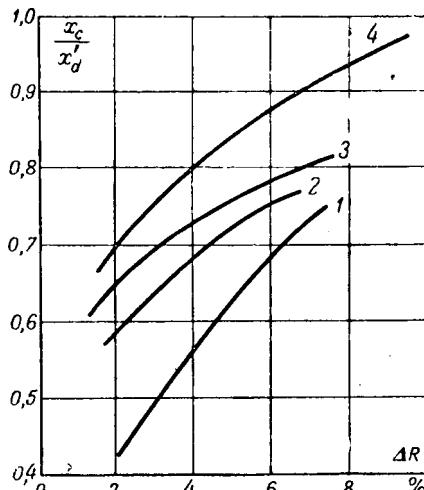


Рис. 2. Степень компенсации при различной конструкции демпферной обмотки.

1 — продольно-поперечная с латунными стержнями; 2 — продольно-поперечная с медными стержнями; 3 — продольно-поперечная специальной конструкции; 4 — поперечная с медными стержнями.

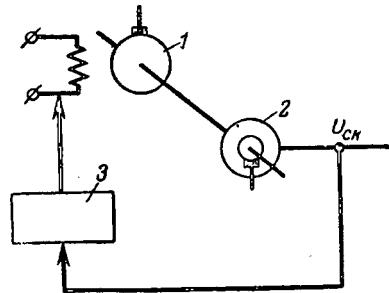


Рис. 3. Принципиальная схема установки для уменьшения потерь холостого хода в моделированных синхронных компенсаторах. СК — синхронный компенсатор; Д — двигатель постоянного тока; У — управляющее устройство.

ток, неизбежно имеющих скрытые демпферные контуры, полная компенсация $\left(\frac{x_c}{x_d} = 1\right)$ практически неосуществима без введения дополнительных активных сопротивлений.

Имеющееся в статье Ю. А. Розовского и др. [Л. 3] замечание относительно влияния потерь холостого хода на самораскачивание компенсаторов справедливо, однако не следует думать, что при лабораторных исследованиях на электродинамических моделях невозможно моделировать эти потери. Введение дополнительного двигателя, сидящего на валу компенсатора, и управление этим двигателем в зависимости от величины напряжения на зажимах компенсатора (рис. 3) или от величины магнитного потока в компенсаторе позволяет в значительной мере приблизить величину потерь холостого хода в модели к потерям в оригинале.

Систематические исследования на моделях и сочетание этих исследований с аналитическими исследованиями не менее существенны, чем эксперименты на отдельных случайных машинах. Следует, кстати, отметить, что в указанной статье не проанализированы результаты эксперимента, поставленного на мощной машине.

Борьба с самовозбуждением возможна разными путями. Эти пути, как показали исследования, проведенные в МЭИ, заключаются в изменении конструкции компенсаторов, во включении компенсирующей емкости через разделительные трансформаторы, позволяющие управлять величиной компенсации³, в установке на компенсаторах специальных автоматических регуляторов возбуждения. Эти регуляторы могут быть особенно эффективны в сочетании с динамической емкостью, осуществленной при помощи специаль-

² При экспериментах на модели эта конструкция была осуществлена не полностью; при полном осуществлении результаты могли бы быть еще лучше.

³ В. А. Веников. Схема включения статических конденсаторов. Авторское свидетельство № 91595 от 29 мая 1950 г.; В. А. Веников, Г. Н. Петров, М. В. Липковский. Трехсердечниковый серийный трансформатор. Авторское свидетельство № 95428 от 12 мая 1951 г.

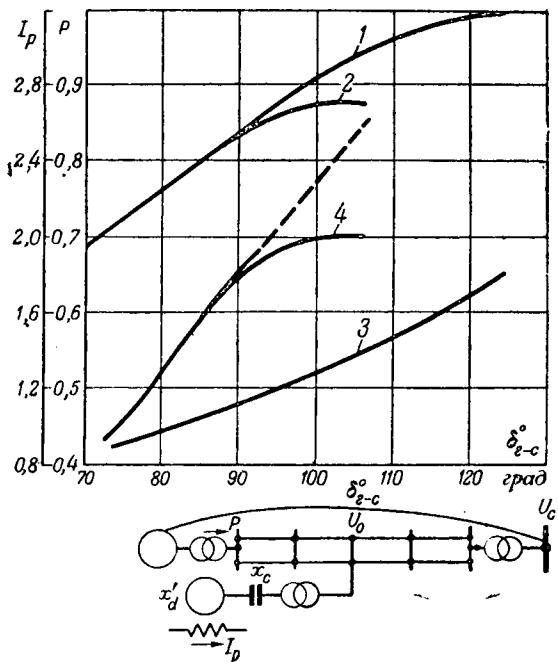


Рис. 4. К определению статической устойчивости передачи с компенсированным синхронным компенсатором.

1 — P при $\frac{x_c}{x'_d} = 0,65$; 2 — P при $\frac{x_c}{x'_d} = 0$;

3 — I_p при $\frac{x_c}{x'_d} = 0,65$; 4 — I_p при $\frac{x_c}{x'_d} = 0$.

ных машин, вводимых в цепь ротора компенсатора⁴.

Наиболее простым и в то же время эффективным способом борьбы с самовозбуждением является рациональная конструкция демпферной обмотки с увеличенной постоянной времени этой обмотки в поперечной электрической оси машины.

Таким образом, вопрос о самовозбуждении синхронных компенсаторов, компенсированных емкостью, вовсе не является решающим. Более существенное значение имеет другой вопрос.

Современное автоматическое регулирование возбуждения, так называемое сильное регулирование, позволяет даже у некомпенсированного синхронного компенсатора, имеющего достаточно большое переходное реактивное сопротивление, поддерживать неизменным напряжение на выводах обмотки статора компенсатора. Если при помощи такого сильного регулирования действительно во всех режимах можно поддерживать неизменным напряжение, то, казалось бы, по условиям статической устойчивости нет надобности применять компенсацию емкостью реактивных сопротивлений компенсаторов.

Следовательно, вопрос о целесообразности применения схемы с компенсированными синхронными компенсаторами для повышения статической устойчивости должен решаться путем сопоставления технико-экономических эффектов, даваемых компенсацией и сильным регулированием.

⁴ А. В. Новиков. Асинхронные моменты синхронных машин с динамической емкостью в цепи возбудителя. Автореферат кандидатской диссертации (Киевский политехнический институт), 1953.

Проведенные исследования показывают, что сильное автоматическое регулирование возбуждения может обеспечить точно такое же улучшение статической устойчивости, как и компенсация реактивного сопротивления компенсатора. Однако, для того чтобы при сильном регулировании получить такие же наибольшие (по условиям статической устойчивости) нагрузки линии, что и при компенсированных компенсаторах, необходимы значительно большие токи возбуждения или, говоря другими словами, большие кратности возбуждения компенсатора в отношении тока и, следовательно, напряжения.

На рис. 4 показаны результаты определения предельно возможной по условиям статической устойчивости мощности, передаваемой по линии, при сильном автоматическом регулировании возбуждения промежуточного компенсатора.

При ограничении тока ротора исследуемого компенсатора двукратной величиной и отсутствии компенсации реактивного сопротивления компенсатора емкостью не удалось достичь мощности, соответствующей предельной для левого участка линии ($P=1$). Вследствие ограничения тока ротора I_p напряжение U_0 в точке присоединения компенсатора падало, и предельная мощность составила всего 0,875 (кривые 2 и 4). При степени компенсации реактивности компенсатора емкостью $\frac{x_c}{x'_d} = 0,65$ ток ротора не достиг двукратной величины и оказался достаточным для поддержания напряжения U_0 постоянным, что позволило достичь мощности, соответствующей предельной для участка линии $P=1$ (кривые 1 и 3).

Если увеличить потолок возбуждения, то и без емкостной компенсации можно достичь предельной нагрузки $P=1$. Но увеличение потолка возбуждения связано с сильным насыщением компенсатора (пунктирная кривая на рис. 4).

Таким образом, емкость в цепи синхронного компенсатора позволяет разгрузить обмотку возбуждения и работать при меньших токах возбуждения. Если это имеет существенное значение, то компенсации емкостью следует отдавать предпочтение перед сильным автоматическим регулированием возбуждения. Если же это значения не имеет, то более целесообразно применять сильное регулирование.

При слишком больших значениях реактивного сопротивления компенсатора области устойчивости при сильном регулировании оказываются слишком узкими (рис. 5, а), и сильное регулирование не может обеспечить достаточно большого улучшения устойчивости. Это — другой случай, при котором компенсация даже небольшой части реактивного сопротивления синхронного компенсатора может иметь существенное значение, резко расширяя область устойчивости (рис. 5).

При математическом анализе статической устойчивости наличие емкости в цепи компенсатора практически учитывается уменьшением его реактивности на величину сопротивления компенсирующей емкости. Анализ резких нарушений режима показывает, что динамическая устойчи-

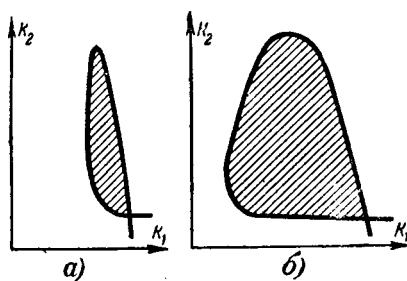


Рис. 5. Влияние компенсации на область устойчивой работы.

$$a) x_d = x_{d_1},$$

$$x'_d = x'_{d_1};$$

$$b) x_d = x_{d_1} - x_c,$$

$$x'_d = x'_{d_1} - x_c.$$

вость с достаточной для практических целей точностью может рассчитываться при таком же допущении.

Компенсирующая емкость не вносит принципиальных изменений в характер переходных процессов, происходящих при динамических режимах, разумеется, при тех же ограничениях, которые были введены для статических режимов, т. е. при исключении самовозбуждения и самораскачивания. Приводимые на рис. 6 полученные на электродинамической модели осциллограммы процесса, происходящего при коротком замыкании на линии с промежуточным компенсатором, иллюстрируют это положение.

В одном случае (рис. 6, а) реактивность компенсатора уменьшилась на 41% шунтированием последовательно включенного индуктивного сопротивления рассеяния⁵. В другом случае (рис. 6, б) примерно такое же уменьшение (на 46%) достигалось включением емкости последовательно с компенсатором. И в том и в другом случае регулятор возбуждения синхронного компенсатора имел один и тот же закон регулирования.

Осциллограммы (рис. 6) показывают, что характер переходного процесса в первом цикле качаний угла генератора не зависит от способа уменьшения реактивного сопротивления компенсатора, и только в последующих циклах появляется некоторое отличие, обусловленное различным действием автоматического регулятора возбуждения, что можно видеть на кривой напряжения возбудителя U_b .

Компенсация реактивного сопротивления компенсатора улучшает динамическую устойчивость передачи. Включение емкости в цепь нерегулируемого синхронного компенсатора увеличивает предел передаваемой мощности по условиям динамической устойчивости так же, как и уменьшение реактивного сопротивления компенсатора любым другим путем (например, изменением конструкции).

При автоматическом регулировании улучшение динамической устойчивости тем больше, чем больше компенсация. При наличии у промежуточного компенсатора, мощность которого составляет около 30% мощности, передаваемой по линии, автоматического регулирования возбужде-

⁵ Здесь должно быть пояснено, что в указанных экспериментах на электродинамической модели последовательно с компенсатором включалась дополнительная индуктивность с целью увеличения сопротивлений машины до необходимых значений.

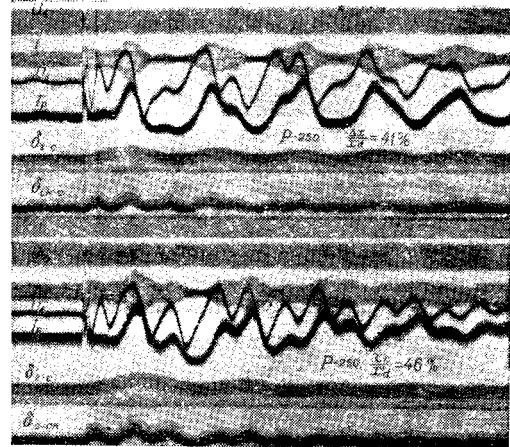


Рис. 6. Осциллограммы процесса, происходящего при коротком замыкании на линии с промежуточным компенсатором.

ния и компенсации $\frac{x_c}{x_d} = 0,7$ по условиям динамической устойчивости по линии, можно передать мощность, на 10% большую, чем при нерегулируемом и некомпенсированном компенсаторе той же мощности.

Из сказанного следует, что компенсация емкостью может быть полезна, хотя она и не является универсальным средством улучшения пропускной способности, как это казалось в первое время. Основной вопрос, на который в настоящее время должно быть обращено внимание, заключается не столько в борьбе с самовозбуждением и самораскачиванием, которые устранимы, сколько в выявлении эффективности компенсации по сравнению с автоматическим регулированием возбуждения сильного действия и выяснении возможности действия автоматического регулирования возбуждения при наличии емкости. Применение компенсации емкостью не исключено и при синхронных компенсаторах относительно малой мощности в сетях более низкого напряжения, на что также следует обратить внимание.

Литература

- Д. И. Азарьев, В. А. Веников и Н. Н. Соколов. Схема дальних электропередач большой пропускной способности. Электричество, № 12, 1953.
- Д. И. Азарьев, В. А. Веников и Н. Н. Соколов. Дальние электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами. Электричество, № 4, 1955.
- Ю. А. Розовский, Е. А. Марченко и В. А. Андреюк. О самораскачивании и самовозбуждении компенсированных синхронных компенсаторов. Электричество, № 5, 1956.
- Д. А. Федоров. Условия самовозбуждения явнополюсной синхронной машины, имеющей продольно-поперечную успокоительную обмотку. Труды МЭИ, вып. 20, 1956.
- Д. А. Федоров. Регулирование возбуждения компенсированного емкостью синхронного компенсатора, работающего в условиях самовозбуждения. Труды МЭИ, вып. 20, 1956.
- Зоны самовозбуждения синхронных компенсаторов с различно выполненными успокоительными системами ротора. Счет о работе сектора релейной защиты и устойчивости, Москва, ноябрь 1955.

Асинхронный электропривод центробежных насосов с дросселями насыщения

Кандидат техн. наук, доц. М. М. СОКОЛОВ
и инж. В. М. ТЕРЕХОВ
Московский энергетический институт

Центробежные насосы в ряде случаев работают в системах автоматического регулирования, поддерживая постоянный уровень жидкости, концентрацию раствора, температуру или другие параметры. Регулирование их производительности, как известно, наиболее целесообразно с экономической точки зрения осуществлять путем изменения скорости приводных двигателей.

Весьма простым и надежным электроприводом центробежных насосов с изменяющейся производительностью является привод от асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, где в качестве регулирующих аппаратов используются дроссели насыщения (рис. 1). Подобные системы могут применяться в различных отраслях промышленности и на электростанциях особенно в тех случаях, когда применение коллекторных машин и коммутационной аппаратуры нежелательно по технологическим условиям.

Регулируемые центробежные насосы по технологическим особенностям их работы требуют малой зоны регулирования скорости, находящейся в области небольших скольжений двигателя. Это обстоятельство позволяет применять бесконтактные обратные связи по току и напряжению (а в некоторых случаях обходиться и без связей) в сочетании с асинхронными короткозамкнутыми двигателями нормального исполнения с обычным или повышенным скольжением. Таким образом, для создания практически бесконтактного электропривода центробежных насосов от асинхронных двигателей нет необходимости заменять их короткозамкнутые роторы специальными, например роторами Шенфера. Малая зона регулирования скорости в области небольших скольжений обуславливает сравнительно высокие энергетические показатели дроссельного электропривода насосов.

Центробежные насосы по сравнению с другими механизмами оказываются в экономическом отношении наиболее целесообразными при дроссельном управлении асинхронными двигателями. Это объясняется тем, что зависимость момента от скорости для установок вентиляторного типа более, чем для других механизмов, приближается

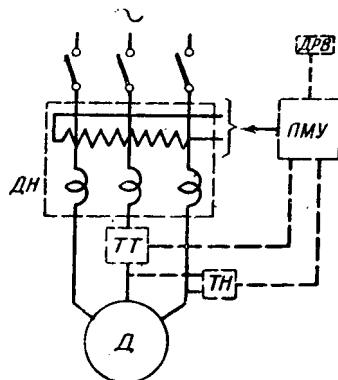


Рис. 1. Принципиальная схема управления асинхронным двигателем при помощи дросселя насыщения.

Д — двигатель; DH — дроссель насыщения; ПМУ — промежуточный магнитный усилитель; ТТ — трансформатор тока; TH — трансформатор напряжения; ДРВ — датчик регулируемой величины.

к зависимости от скорости допустимого по нагреву момента двигателя. Поэтому для одного и того же диапазона скоростей двигатели с вентиляторным моментом могут быть загружены больше, чем двигатели с постоянным статическим моментом. В соответствии с этим энергетические показатели в регулируемых установках вентиляторного типа оказываются выше, а габаритные размеры ниже, чем в установках с постоянным моментом.

По сравнению с реостатным способом регулирования дроссельное управление уступает по к. п. д. и коэффициенту мощности лишь при значительных снижениях скорости (рис. 2 и 3). При расчете графиков рис. 2 принято, что все скорости в заданном диапазоне регулирования используются в течение одинакового времени.

Наиболее благоприятными с экономической точки зрения для дроссельного способа регулирования двигателей являются насосы с противодавлением. Объясняется это, во-первых, тем, что для регулирования производительности этих насосов в широких пределах требуется незначительное изменение скорости. Например, для насоса ЯНЗ-3/25 производительностью $Q = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$ и полным напором $H = 16,8 \text{ м}$ для снижения Q на 35% требуется уменьшение скорости на 10% при статическом напоре $H_c = 12,5 \text{ м}$ и на 35% при $H_c = 0$ (рис. 4). Во-вторых, момент насосов с противодавлением в зоне высоких скоростей примерно пропорционален 3 ... 6-й степени скорости вместо 1,5 ... 2-й степени при отсутствии противодавления [Л. 1]. Указанная зависимость $M = f(n)$ определяется величиной противодавления и конструктивными параметрами насоса. Таким образом, при снижении скорости у насосов с противодавлением статический момент на валу двигателя уменьшается более резко, что позволяет дополнительно снизить установленную мощность двигателя при том же диапазоне скорости.

Ниже рассматривается методика выбора асинхронного двигателя для регулируемого электропривода центробежных насосов. Принято, что дви-

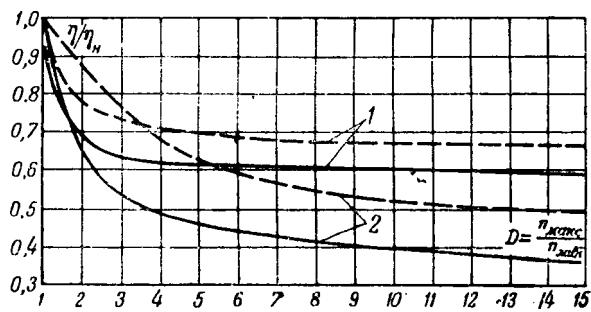


Рис. 2. Обобщенные зависимости относительного к. п. д. установки от диапазона регулирования скорости асинхронного двигателя.

1 — при вентиляторном моменте ($k = 2$); 2 — при постоянном моменте; — реостатное регулирование; — дроссельное регулирование.

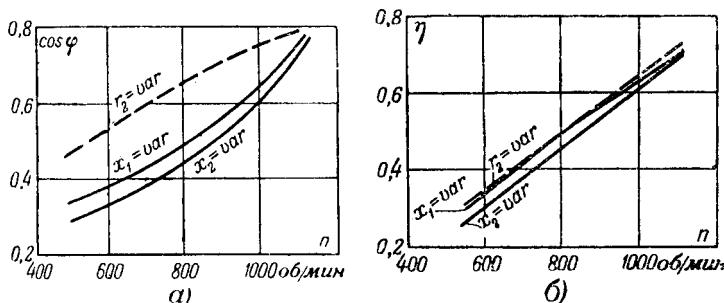


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $\cos \phi$ (а) и к. п. д. (б) от скорости двигателя ($P_n = 3,7$ квт; $n = 1420$ об/мин).

гатель может длительно работать с любой скоростью в заданном диапазоне. При этом не учитывается ухудшение теплоотдачи, так как при небольшом снижении скорости коэффициент теплоотдачи уменьшается незначительно [Л. 2 и 3].

Для центробежных насосов в области высоких скоростей

$$M_c \approx M_{c.n} \left(\frac{1-s}{1-s_{c.n}} \right)^k, \quad (1)$$

где M_c — статический момент на валу двигателя при скольжении s ; $M_{c.n}$, $s_{c.n}$ — момент и скольжение, соответствующие паспортным мощности $P_{c.n}$ и скорости $n_{c.n}$ насоса (рис. 5).

Относя (1) к номинальному моменту M_n двигателя, можно записать:

$$m_c = m_{c.n} \left(\frac{1-s}{1-s_{c.n}} \right)^k. \quad (2)$$

Для общности в качестве приводных рассматриваются асинхронные двигатели как короткозамкнутые, так и с контактными кольцами. Скольжение при номинальных напряжении U_n и моменте M_n двигателя обозначим через s'_n .

Для короткозамкнутых двигателей $s'_n = s_n$, для двигателей с контактными кольцами s'_n зависит от величины дополнительного сопротивления в роторе.

Из известного выражения, связывающего момент, ток ротора и скольжение двигателя, можно получить:

$$i_2^2 = \frac{ms}{s'_n}, \quad (3)$$

где $i_2 = \frac{I_2}{I_{2n}}$ — относительный ток ротора; m — относительный момент двигателя.

Подстановка (2) в (3) дает выражение для тока ротора, когда нагрузкой двигателя является центробежный насос:

$$i_2^2 = m_{c.n} \frac{1}{s'_n (1-s_{c.n})^k} s (1-s)^k. \quad (4)$$

Из (4) находится условие наибольших потерь в обмотке ротора при изменении скорости. Оно соответствует максимуму i_2^2 при неизменных $m_{c.n}$, s'_n , $s_{c.n}$ и k :

$$i_{2\max}^2 = \frac{1}{k+1} \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \frac{m_{c.n}}{s'_n (1-s_{c.n})^k}, \quad (5)$$

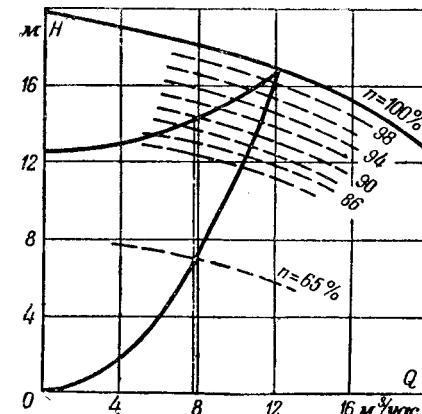


Рис. 4. Характеристики насоса ЯНЗ-3/25.

причём

$$s_{ext} = \frac{1}{k+1}. \quad (6)$$

Нагрев двигателя при изменении скорости будет лежать в пределах установленных норм при относительном токе ротора, меньшем или равном допустимой по условиям нагрева величине $i_{2\max}$. Если пренебречь тепловой взаимосвязью обмоток статора и ротора и принять во внимание приведенные выше допущения, то $i_{2\max} = 1$.

Пусть снижение скорости насоса требуется в таких пределах, что $i_{2\max}$ входит в зону регулирования. Тогда условием допустимого нагрева двигателя будет:

$$i_{2\max} = 1.$$

Учитывая данное условие, а также, что

$$m_{c.n} = \frac{M_{c.n}}{M_n} = \frac{P_{c.n}}{P_n} \frac{1-s_n}{1-s_{c.n}}, \quad (7)$$

из (5) можно получить:

$$P_n = \frac{1}{k+1} \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \frac{1}{s'_n (1-s_{c.n})^k} \frac{1-s_n}{1-s_{c.n}} P_{c.n}.$$

При $s_n \approx s_{c.n} \approx 0,035$

$$P_n \approx 1,035^k \frac{1}{k+1} \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \cdot \frac{1}{s'_n} \cdot P_{c.n}. \quad (8)$$

Пользуясь формулой (8), можно произвести выбор двигателя. Для этого по характеристикам

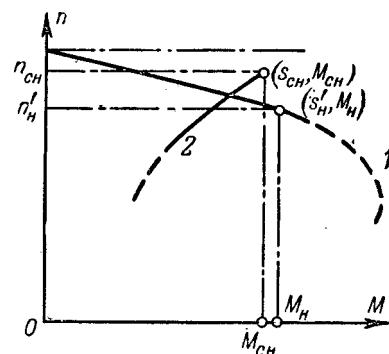


Рис. 5. Характеристики двигателя (1) и насоса (2).

насоса $Q - H$ определяют степень k зависимости момента от скорости. Чем больше противодавление насоса, т. е. чем больше k , тем меньше будет мощность приводного двигателя. Например, для насоса с противодавлением, составляющим 85...95% полного напора насоса ($k \approx 6$), двигатель требуется примерно в 3...3,5 раза меньшей мощности, чем для насоса без противодавления ($k \approx 1,5...2$). Зная мощность и скорость насоса, находят $s_{c.n}$ и примерно оценивают величину s_n .

Желательно использовать двигатели с повышенным скольжением или с дополнительным сопротивлением ротора. Чем выше s_n' , тем меньшей мощности требуется двигатель. Однако следует иметь в виду, что при увеличении s_n' может снижаться предел диапазона регулирования насоса. После определения величин k , $s_{c.n}$, s_n , s_n' по формуле (8) подсчитывается номинальная мощность P_n и по каталогу выбирается подходящий двигатель.

Если требуется небольшое снижение скорости насоса, при котором ток ротора не достигает своего максимума, то двигатель может быть взят меньшей мощности. Условием допустимого нагрева при этом будет:

$$i_2 = 1.$$

Подстановка (7) в (4) с учетом отмеченного условия даст:

$$P_n = \frac{s_m}{s_n'} \left(\frac{1-s_m}{1-s_{c.n}} \right)^k \frac{1-s_n}{1-s_{c.n}} P_{c.n} \approx \frac{s_m}{s_n'} \left(\frac{1-s_m}{1-s_{c.n}} \right) \cdot P_{c.n}, \quad (9)$$

где s_m — максимальное скольжение в заданном диапазоне регулирования.

При помощи формулы (9), определив предварительно k , $s_{c.n}$, s_m , s_n и s_n' , легко произвести выбор двигателя. Если $s_m \geq \frac{1}{k+1}$, то следует пользоваться формулой (8).

Из выражений (8) и (9) следует, что для насосов большой мощности применение короткозамкнутых двигателей с дроссельным управлением нецелесообразно. Двигатели большой мощности имеют малое скольжение порядка 1,5...2%. Поэтому даже при незначительном снижении скорости, например на 5...8%, в насосах с большим противодавлением потребуется двигатель мощностью в 2...2,5 раза большей, чем номинальная мощность насоса. Двигатели же с контактными кольцами, дополнительным сопротивлением в цепи ротора и с дросселями насыщения в статоре могут быть применены и для насосов большой мощности при значительном противодавлении и небольшом снижении скорости. Например, при $s_n = 0,02$, $s_n' = 0,08$ и $k = 6$ будет иметь место $\frac{P_n}{P_{c.n}} \approx 1,02$, т. е. двигатель

практически не приходится завышать по сравнению с номинальной мощностью насоса.

Выводы. 1. По энергетическим показателям дроссельное регулирование незначительно уступает реостатному применительно к механизмам с вентиляторным моментом.

2. При дроссельном управлении асинхронными двигателями электропривод центробежных насосов оказывается существенно экономичнее, чем электропривод механизмов с постоянным моментом.

3. Для центробежных насосов небольшой мощности имеется возможность осуществить управляемый, практически бесконтактный электропривод с использованием асинхронных короткозамкнутых двигателей нормального исполнения.

4. Для насосов с большим противодавлением регулирование скорости при помощи дросселей насыщения может быть применено и для установок большой мощности, если использовать асинхронный двигатель с контактными кольцами и дополнительным сопротивлением в цепи ротора.

5. Формулы (8) и (9) позволяют осуществить выбор двигателя с дроссельным управлением для привода центробежных насосов.

Пример. Требуется выбрать асинхронный короткозамкнутый двигатель для привода насоса ЯНЗ-3;25 ($H = 16,8$ м, $Q = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$, $P_{c.n} = 2,4 \text{ квт}$, $n_{c.n} = 1450 \text{ об}/\text{мин}$), производительность которого может снижаться на 35%. Статический напор магистрали $H_c = 12$ м.

При помощи характеристик $Q - H$ для различных скоростей (рис. 3) выявляется степень зависимости момента насоса от скорости: $k \approx 4$.

Минимальная скорость насоса и соответствующее ей скольжение двигателя: $n_{min} = 1300 \text{ об}/\text{мин}$, $s_m = 0,133$.

Номинальной мощности насоса $P_{c.n}$ соответствует скольжение

$$s_{c.n} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,033.$$

Зная мощность насоса (2,4 квт), можно ориентировочно задаться номинальным скольжением двигателя $s_n = 0,05$. Тогда согласно (9)

$$P_n = \frac{0,133}{0,05} \left(\frac{1 - 0,133}{1 - 0,033} \right)^4 \frac{1 - 0,05}{1 - 0,033} \cdot 2,4 = 4,08 \text{ квт}.$$

По каталогу выбирается двигатель АО-51-4, 4,5 квт, 1440 об/мин, $s_n = 4\%$.

Так как при расчете P_n задались номинальным скольжением, большим, чем у выбранного двигателя, то последний следует проверить на нагрев с учетом действительного скольжения:

$$P_n = \frac{0,133}{0,04} \left(\frac{1 - 0,133}{1 - 0,033} \right)^4 \frac{1 - 0,04}{1 - 0,093} \cdot 2,4 = 5,1 \text{ квт}.$$

Таким образом, при $s_n = 0,04$ требуется двигатель большей мощности. По каталогу выбирается двигатель АО-52-4, 7 квт, 1440 об/мин.

Литература

1. И. А. Сыромятников, Режимы работы асинхронных электродвигателей. Госэнергоиздат, 1955.
2. В. И. Васин, О регулировании скорости короткозамкнутых электродвигателей. ВЭП, № 9, 1956.
3. В. М. Терехов, Методика расчета режимов асинхронных двигателей с дросселями насыщения в статорной цепи. Труды МЭИ, вып. XXVIII, 1956.



Реакция коммутационных токов в электромашинных усилителях с поперечным полем

Инж. В. И. РАДИН

Завод имени Владимира Ильича

Влияние н. с. коммутационных токов на главное поле в коллекторных машинах постоянного тока известно давно [Л. 1]. В обычных машинах постоянного тока это влияние коммутационных токов приходится учитывать при больших перегрузках, коротком замыкании, безреостатном пуске и других неустановившихся процессах, особенно когда машина работает с ослабленным полем.

Существует ряд методов для учета реакции коммутационных токов [Л. 2 и 3].

Но если у обычных машин постоянного тока в номинальных режимах влияние н. с. коммутационных токов на главное поле ничтожно и при проектировании машин им обычно пренебрегают, то в электромашинных усилителях с поперечным полем, где результирующая н. с. обмотки управления по продольной оси мала, влияние н. с. коммутационных токов на продольное поле велико и его необходимо учитывать с достаточно большой точностью.

Я. С. Эпштейн, основываясь на классической теории коммутации, предполагающей, что переходное сопротивление щеточного контакта не зависит от плотности тока и обратно пропорционально поверхности касания щетки коллекторных пластин, вывел уравнение для расчета размагничивающих ампервитков коммутации [Л. 4].

Это уравнение в настоящее время в основном используется для определения реакции коммутационных токов при проектировании электромашинных усилителей с поперечным полем.

Известно, что, кроме коммутационных токов, размагничивающее действие по продольной оси машины оказывают вихревые токи в стали якоря [Л. 5 и 6].

Таким образом, по продольной оси усилителя на холостом ходу действуют три (если поперечные щетки установлены на нейтрали) н. с., а именно н. с. обмотки управления, н. с. коммутируемых токов и н. с. вихревых токов в стали, которые необходимо учитывать для расчета как статических, так и динамических характеристик усилителя. Однако расчеты н. с., произведенные согласно указанным методам, дают в ряде случаев значительные расхождения с результатами экспериментов.

Недостаток в экспериментальном материале не позволял до последнего времени установить, насколько правильны расчеты н. с. коммутационных токов, основанные на уравнении Я. С. Эпштейна, приведенном в [Л. 4].

Методы экспериментального определения реакции коммутационных токов. Существует ряд методов как косвенного, так и непосредственного определения н. с. коммутационных токов, действующих в обычных машинах постоянного тока по продольной оси.

Косвенные методы исходят из изменения напряжения в случае генератора или изменения скорости вращения в случае двигателя, которое вы-

звано реакцией коммутационных токов на главное поле.

Измерить изменение магнитного поля по продольной оси от реакции коммутационных токов можно и непосредственно. Известны методы измерения реакции коммутационных токов при помощи эффекта Холла [Л. 7].

За последнее время был опубликован ряд работ М. И. Алябьева [Л. 8 ... 10], в которых предлагается ряд экспериментальных методов определения реакции коммутационных токов как в обычных машинах постоянного тока, так и в усилителях с поперечным полем.

Однако все указанные методы нельзя praktischki использовать для усилителя с поперечным полем. Главный их недостаток заключается в том, что при помощи их можно приближенно определить суммарное действие н. с. коммутационных токов и вихревых токов в стали, а отделить одно от другого не удается. При этом замечания М. И. Алябьева [Л. 10] о том, что «потери в стали якоря от поперечного поля создают только поперечную размагничивающую силу, которая не входит в баланс продольных намагничивающих сил», не соответствует действительности, как это показано рядом авторов [Л. 5, 6 и 11].

Экспериментальные методы, предложенные М. И. Алябьевым [Л. 8 ... 10] специально для определения реакции коммутационных токов в усилителе с поперечным полем, практически неприемлемы еще и потому, что нельзя точно измерить величину переходного падения напряжения под щетками ($2 \Delta U$), которая к тому же будет меняться с изменением тока подпитки. А зная эту величину для определения реакции коммутационных токов по методам М. И. Алябьева необходимо. Кроме того, для определения реакции согласно этим методам необходимо менять направление вращения усилителя, что, как известно, приводит к изменению положения щеток относительно нейтрали.

Особо необходимо остановиться на работе С. Ф. Березниковского [Л. 12]. В его статье сделана попытка дать подробный анализ составляющих реакций поперечного тока якоря, действующих по продольной оси усилителя. Этот анализ основан на экспериментальном исследовании, методы которого в основном предложены С. Ф. Березниковским.

Автор рассматривает следующие составляющие реакции поперечного тока якоря: н. с. коммутационных токов в зоне поперечных щеток F_k ; н. с., обусловленную вихревыми токами и гистерезисом в сердечнике якоря при перемагничивании его поперечным потоком F_c ; н. с., эквивалентную поперечной реакции якоря при насыщении поперечным потоком путей продольного потока F'_{aq} ; н. с. продольной реакции якоря, вызванную смещением поперечных щеток с нейтрали F'_{ad} .

Указанные составляющие в технической литературе известны и их рассмотрение сомнений не вызывает. Однако применяемые методы экспериментального определения составляющих реакции тока поперечной цепи якоря, а следовательно, и полученные результаты нельзя признать удовлетворительными.

Рассмотрим критически методы определения каждой составляющей.

Намагничающая сила, обусловленная коммутационными токами, определялась методом М. И. Алябьева [Л. 10], который, как уже отмечалось, неприемлем для усилителя с поперечным полем и к тому же еще не позволяет отделить F_k от F_c .

Намагничающие силы поперечной F'_{cq} и продольной F'_{ad} реакций якоря от тока поперечной цепи определялись при помощи флюксметра, измеряющего приращения магнитного потока по продольной оси при неподвижном якоре, вызванные включением тока возбуждения и затем тока в поперечной цепи одного и другого направлений.

При вращающемся якоре и изменении направления вращения отмеченные выше недостатки метода М. И. Алябьева относятся и к данному случаю.

Определение суммы н. с. ($F_k + F_c$) по характеристикам холостого хода при переменной скорости вращения усилителя. Метод весьма приближенный и основан на целом ряде допущений. Нельзя, например, считать F_k и в особенности F_c пропорциональными скорости.

Поскольку величины н. с., составляющих реакцию тока поперечной цепи усилителя, сравнительно невелики, то при определении их требуется особая точность, а применяемые методы должны иметь как можно меньше допущений. Поэтому применяемые С. Ф. Березниковским методы

нельзя признать удовлетворительными, а следовательно, и полученные с их помощью результаты случайны. Приведенный в его статье баланс н. с., действующих по продольной оси для усилителей типов ЭМУ-2,5 и АГ-3, вызывает сомнение.

Непонятно также, при каком сдвиге щеток с нейтрали производилось измерение составляющей F'_{ad} : принудительный ли этот сдвиг щеток или обусловленный тем, что, как указывает С. Ф. Березниковский, «Наличие продольной н. с., несмотря на первоначальную установку щеток на нейтрали, обычно имеет место у всех машин и происходит из-за того, что ось токосъема щетки не совпадает с серединой зеркала щеток»?

Следует отметить, что последнее зависит от многих факторов: конструкции щеточного аппарата, пришлифовки щеток к коллектору, механической обработки самого коллектора, метода установки щеток на нейтрали и т. п. Однако опыты, проведенные на большом количестве усилителей, показывают, что все же можно установить щетки на нейтрали настолько точно, что н. с. F'_{ad} можно с достаточной точностью пренебречь. Такая установка щеток, правда, имеет значение только для исследований (определение составляющих тока поперечной цепи и т. п.); практически же в усилителях с поперечным полем щетки обычно сдвигаются с нейтрали по направлению вращения якоря с тем, чтобы избежать самовозбуждения машины и увеличить ее быстродействие [Л. 6, 13]. При расчетах усилителей учет сдвига щеток производится с достаточной точностью [Л. 6 и 11].

Что касается н. с. F'_{aq} , то, так как усилители обычно вnominalном режиме не насыщены, эта н. с. будет иметь практическое значение при форсировках возбуждения.

Для того чтобы измерить н. с. токов коммутации поперечных щеток в пазы статора для компенсационной обмотки усилителя типа ЭМУ-12АЗ, были заложены специальные обмотки. Соединяя их по-разному и пропуская через них постоянный ток, можно создать магнитный поток по поперечной или продольной оси машины (рис. 1). Таким образом, при помощи этих обмоток можно имитировать магнитное поле по поперечной или продольной оси. На перемычках большого паза статора (рис. 1) были помещены измерительные обмотки. Поперечный магнитный поток усилителя, созданный током, протекающим через короткозамкнутую цепь, при установке поперечных щеток строго на нейтрали не проходит через перемычки большого паза, расположенные на поперечной оси машины; через них проходят магнитные потоки, действующие по продольной оси машины.

Измерение н. с. производилось флюксметром, подключенным к измерительным обмоткам, расположенным на перемычке большого паза.

Порядок проведения эксперимента был следующий:

- Поперечные щетки устанавливались индуктивным методом строго на нейтрали.

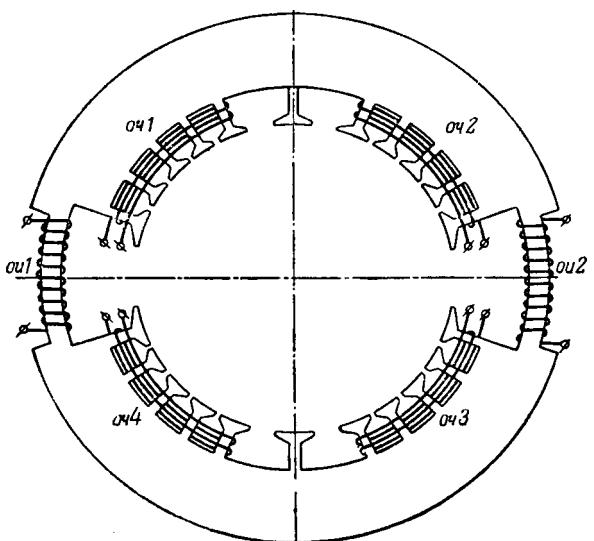


Рис. 1.

oc1, oc2 — измерительные обмотки на перемычках большого паза;
oc1...oc4 — четырехполюсные обмотки для имитирования поля.

б) Через поперечные щетки пропускался постоянный ток от постороннего источника при неподвижном якоре, и флюксметром проверялось наличие поперечного потока в перемычках большого паза. Отсутствие потока указывало на то, что щетки установлены строго на нейтрали.

в) Якорь приводился во вращение, и вновь флюксметром производилось измерение магнитного потока при питании поперечных щеток от постороннего источника. Измеренная при этом н. с. равна сумме н. с. коммутационных токов и н. с. вихревых токов в стали.

г) При помощи вспомогательных обмоток создавалось поле по поперечной оси, идентичное магнитному полю поперечной реакции якоря, щетки поднимались, и флюксметром, подключенным к измерительным обмоткам, измерялась н. с., которая представляла собой н. с. вихревых токов.

Разность между суммарной и н. с. вихревых токов есть н. с. токов коммутации поперечных щеток.

Результаты измерений. Измерения по рассмотренной методике проводились при установке различных марок щеток: ЭГ-8 (переходное падение напряжения, измеренное на короткозамкнутом коллекторе ($\Delta U=2$ в), Т ($\Delta U=6$ в), МГ ($\Delta U=0,2$ в)). Проверялось также влияние на реакцию коммутационных токов таких факторов, как ширина и длина щетки, температура окружающего воздуха, давление на щетки.

На рис. 2 приведены кривые н. с. коммутационных токов для трех марок щеток (ЭГ-8, Т и МГ) и н. с. вихревых токов в стали в зависимости от тока в поперечной цепи якоря. Кривые построены в относительных единицах. За единицу н. с. принят ток в поперечной короткозамкнутой цепи якоря при номинальном напряжении холостого хода (при установке в поперечной цепи щеток ЭГ-8), за единицу тока принят ток в поперечной короткозамкнутой цепи якоря при номинальном напряжении усилителя.

Как видно из кривых рис. 2, суммарная н. с. коммутационных токов и вихревых токов в стали составляет для щеток ЭГ-8 и Т приблизительно половину н. с. обмотки управления, необходимой для создания номинального напряжения холостого хода усилителя. При этом н. с. коммутационных токов примерно составляет $\frac{2}{3}$, а вихревых токов в стали — $\frac{1}{3}$ суммарной н. с. Незначительно меньше реакция коммутационных токов щеток марки Т, обладающих большим переходным сопротивлением, чем щетки ЭГ-8. Переходное падение напряжения ΔU , измеренное на короткозамкнутом коллекторе, для щеток марки ЭГ-8 составляло 2 в, для щеток марки Т — 6 в.

Резко меняется картина при применении меднографитных щеток марки МГ ($\Delta U=0,2$ в). На первый взгляд может показаться, что так как переходное падение напряжения этих щеток мало, а следовательно, и сопротивление короткозамкнутой поперечной цепи усилителя R_2 также значительно меньше, чем при установке графитных и электрографитных щеток, то ток в поперечной цепи якоря I_2 при одинаковых токах управления будет значительно больше. В действительности

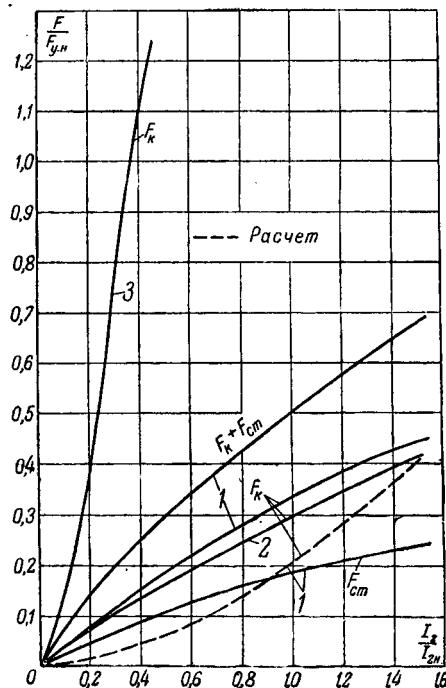


Рис. 2. Зависимость н. с. коммутационных токов (F_k) и вихревых токов в стали (F_{cm}) от тока в поперечной цепи якоря для различных марок щеток.

1 — для щеток марки ЭГ-8; 2 — для щеток марки Т; 3 — для щеток марки МГ.

же при меднографитных щетках размагничивающая реакция коммутационных токов становится настолько большой, что при одинаковых токах управления I_1 ток в поперечной цепи I_2 у экспериментальной машины был в 5 раз меньше, чем при щетках ЭГ-8.

Создавая специальной обмоткой поперечный магнитный поток, равный и противоположно направленный поперечному потоку реакции якоря усилителя, так, чтобы они друг друга уничтожали, можно получить характеристику первого кас-

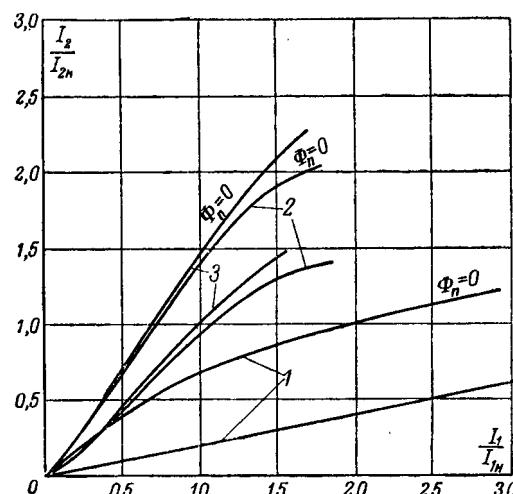


Рис. 3. Характеристики холостого хода первого каскада усилителя для различных марок щеток.

1 — для щеток марки МГ; 2 — для щеток марки ЭГ-8; 3 — для щеток марки Т.

када $I_2=f(I_1)$ без влияния реакции коммутационных и вихревых токов, вызванных поперечным полем машины.

На рис. 3 приведены характеристики $I_2=f(I_1)$, полученные на экспериментальной машине со щетками ЭГ-8, Т и МГ при обычном поперечном поле реакции якоря и при полной компенсации его ($\Phi_n=0$).

Из характеристик рис. 3 видно, что размагничивающий эффект вихревых и коммутационных токов, обусловленный поперечным полем реакции якоря, составляет в относительных единицах при токе I_2 , равном 1, для щеток ЭГ-8 примерно 0,3 суммарной н. с. управления.

Результаты экспериментов интересно сравнить с данными расчета, произведенного по уравнению Я. С. Эпштейна, приведенному в [Л. 4]. На рис. 2 нанесена пунктиром расчетная кривая н. с. коммутационных токов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что н. с. коммутационных токов, полученная из экспериментов, в среднем на 30% больше расчетных.

Расчет н. с. коммутационных токов. Расчет, основанный на классической теории, дает результаты, значительно отличающиеся от действительных.

Была сделана попытка вывести уравнение для расчета н. с. коммутационных токов, основанная на новейших теориях коммутации.

Можно считать, что н. с. тока в короткозамкнутой секции при коммутации создается средним значением этого тока за период коммутации. Для определения среднего значения тока необходимо знать уравнение кривой изменения тока в секции при коммутации. Многочисленные экспериментальные исследования коммутации, проведенные различными авторами [Л. 14 ... 16], показали, что основные исходные положения так называемой классической теории не соответствуют действительности. Поэтому уравнение для определения н. с. коммутационных токов, основанное на классической теории коммутации [Л. 2 ... 4], также нельзя признать удовлетворительным.

О. Г. Вегнером [Л. 14 и 17] было показано, что с достаточной точностью можно считать, что переходное напряжение в период коммутации остается постоянным. На основании этого допущения были получены простые выражения для кривой тока.

Позднее И. С. Елохиным [Л. 16] было сделано допущение о постоянстве в период коммутации переходного сопротивления. На основании этого

допущения было также получено простое выражение для тока коммутации такого же вида, что и уравнение О. Г. Вегнера.

Автором настоящей статьи в течение 1952—1956 гг. проводились подробные экспериментальные исследования коммутации электромашинных усилителей с поперечным полем. Полученные экспериментальным путем кривые тока коммутации щеток, установленных на поперечной оси усилителя, могут быть с достаточно большой точностью описаны уравнением, в основе которого положено предположение о постоянстве переходного сопротивления:

$$i = i_a e^{-\frac{r_s t}{L_s}} + \frac{e_k}{\Sigma r} \left(1 - e^{-\frac{\Sigma r}{L_s} t} \right), \quad (1)$$

где i_a — ток в параллельной ветви обмотки якоря;

e_k — э. д. с. от внешнего поля коммутационной зоны;

$\Sigma r = r_1 + r_2 + r_c$ — суммарное активное сопротивление коммутируемого контура, состоящее из переходного сопротивления щеточного контакта и активного сопротивления коммутируемой секции.

Как уже отмечалось [Л. 17], расчеты кривой тока по уравнениям, основанным на предположении как постоянства переходного напряжения, так и постоянства переходного сопротивления, дают при некоторых условиях близкие результаты. Это объясняется тем, что в уравнении (1) для каждой нагрузки нужно брать свое значение переходного напряжения.

Из уравнения (1) найдем среднее значение тока за период коммутации:

$$i_{cp} = \frac{e_k}{\Sigma r} \left[1 - \frac{T_c}{T_k} \left(1 - e^{-\frac{T_k}{T_c}} \right) \right] + i_a \frac{T_c}{T_k} \left(1 - e^{-\frac{T_k}{T_c}} \right), \quad (1a)$$

где $T_c = \frac{L_s}{\Sigma r}$ — постоянная времени коммутируемой секции;

T_k — период коммутации.

Для расчета среднего значения тока за период коммутации по уравнению (1a) необходимо знать зависимость переходного сопротивления $r_1 + r_2 = f(i_a)$ и период коммутации T_k [Л. 13].

Экспериментальные исследования показали, что с достаточной точностью при расчетах н. с. коммутационных токов можно сделать допущение, что действительный период коммутации равен периоду перекрытия, как это принято для расчета коллекторных машин.

На рис. 4 приведена кривая переходного сопротивления $r_1 + r_2$ в зависимости от плотности тока для щеток ЭГ-8, наиболее часто применяемых в усилителях, полученная экспериментальным путем. Следует отметить, что данной кривой можно воспользоваться и при расчетах н. с. коммутационных токов при применении других ма-

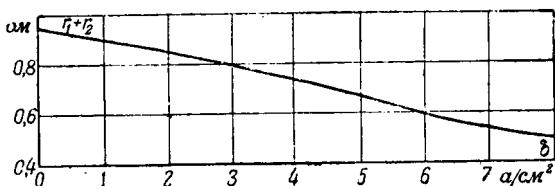


Рис. 4. Зависимость переходного сопротивления ($r_1 + r_2$) от плотности тока в поперечной цепи (δ) для щеток марки ЭГ-8.

рок электрографитных щеток (ЭГ-4, ЭГ-83, ЭГ-2).

При э. д. с. внешнего поля, равной нулю ($e_k = 0$), уравнение (1а) принимает еще более простой вид:

$$i_{cp} = \frac{T_c}{T_k} i_a \left(1 - e^{-\frac{T_k}{T_c}} \right). \quad (2)$$

При $\frac{T_k}{T_c} \geq 3$, что часто имеет место, $1 - e^{-\frac{T_k}{T_c}} \approx 1$ и уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$i_{cp} = \frac{e_k}{\Sigma r} \left(1 - \frac{T_c}{T_k} \right) + i_a \frac{T_c}{T_k}; \quad (1б)$$

$$i_{cp} = \frac{T_c}{T_k} i_a. \quad (2a)$$

Дальнейшее определение н. с. коммутационных токов, если известна средняя величина тока в коммутируемой секции за период коммутации, можно производить по формулам, приведенным в [Л. 4 и 6].

Из полученных уравнений легко найти э. д. с. e_{k0} при которой среднее значение тока за период коммутации, а следовательно, и н. с. коммутационных токов по продольной оси будут равны нулю. Из уравнения (1б)

$$e_k = -i_a \Sigma r \frac{T_c}{T_k - T_c}. \quad (3)$$

Для проверки уравнений (1а), (2) и (3) вышеуказанным методом были получены экспериментальные кривые зависимости н. с. коммутационных токов при различных токах в поперечной цепи усилителя в обычном и компенсированном поперечном поле ($e_k = 0$) и полученные результаты сравнены с данными, полученными из расчета по уравнениям (1а) и (2). Экспериментальные и расчетные кривые для щеток марки ЭГ-8 показаны на рис. 5. На рис. 6 приведены характеристики холостого хода усилителя, снятые экспериментально при $e_k = e_{kn}$, $e_k = 0$ и $e_k = -i_a \Sigma r \frac{T_k}{T_k - T_c}$ для щеток марки ЭГ-8; здесь же показаны характеристики, полученные расчетным путем.

Как видно из рис. 5 и 6, расчетные и экспериментальные кривые совпадают с достаточно большой точностью. Следует отметить, что методика расчета поперечного поля усилителей в трудах Я. С. Эпштейна, Ф. А. Горяинова и Г. К. Салгуса разработана достаточно полно и дает хорошие результаты. Таким образом, величину e_k можно рассчитать с достаточно высокой точностью.

Полученные уравнения требуют дальнейшей экспериментальной проверки на большом количестве усилителей различных типов. Что же касается обычных машин постоянного тока, то н. с.

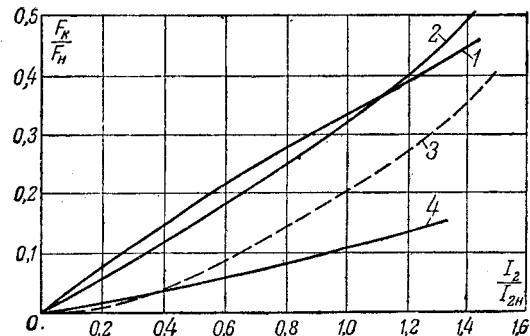


Рис. 5. Экспериментальная (1) и расчетные (2, 3 и 4) кривые н. с. коммутационных токов.

2 — при расчете по уравнению (1а); 3 — при расчете по уравнению Я. С. Эпштейна [Л. 4]; 4 — при расчете по уравнению (2) ($\Phi_n = 0$).

коммутационных токов обычно учитывают в режимах короткого замыкания или при форсировках возбуждения при значительных плотностях тока, проходящего через щетки. Расчет же н. с. по уравнениям (1), (2), (1а), (2а) дает хорошие результаты для нормальных плотностей тока в щетках.

Полученные экспериментальные и расчетные данные позволяют сделать некоторые практические выводы о роли н. с. коммутационных токов в электромашинных усилителях с поперечным полем. С одной стороны, она действует размагничивающе, составляя примерно 25...35% общей н. с., действующей по продольной оси, и уменьшает коэффициент усиления усилителя, но, с другой стороны, она стабилизирует как стати-

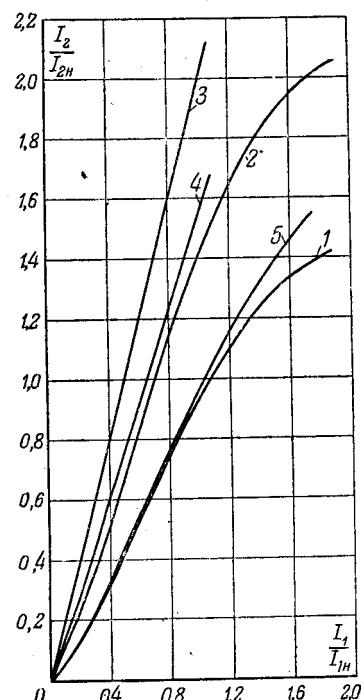


Рис. 6. Характеристики холостого хода усилителя для щеток марки ЭГ-8.

1 — экспериментальная характеристика; 2 — экспериментальная характеристика при $\Phi_n = 0$; 3 — характеристика без н. с. коммутационных токов и вихревых токов в стали; 4 — расчетная характеристика при $\Phi_n = 0$; 5 — расчетная характеристика.

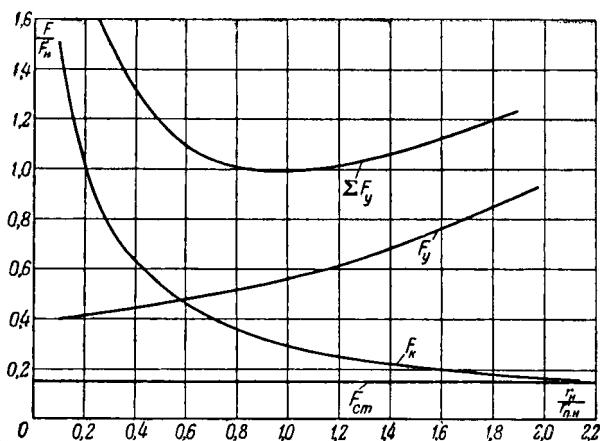


Рис. 7. Кривые зависимости н. с. коммутационных токов (F_k), н. с. вихревых токов в стали (F_{cm}), н. с. управления (F_y), суммарной н. с. управления (ΣF_y) от переходного сопротивления щеточного контакта при постоянном номинальном токе в поперечной цепи якоря усилителя ЭМУ-12АЗ.

ческие, так и динамические характеристики усилителя.

Температура окружающей среды и ряд других факторов оказывают значительное влияние на переходное сопротивление щеточного контакта. Так, с увеличением температуры сопротивление щеточного контакта уменьшается и, поскольку в усилителе поперечная цепь замкнута накоротко, должен увеличиваться ток поперечной цепи I_2 , но одновременно с этим увеличивается и размагничивающее действие коммутационных токов, поскольку возрастает ток i_a и уменьшается Σr (из анализа полученных уравнений можно в первом приближении считать, что размагничивающие ампервитки коммутационных токов обратно пропорциональны Σr), а это будет оказывать на характеристики усилителя действие, обратное уменьшению сопротивления короткозамкнутой поперечной цепи. Таким образом, при изменениях температуры и других факторов, влияющих на переходное сопротивление щеточного контакта, н. с. коммутационных токов будет оказывать стабилизирующее влияние на характеристики усилителя.

При переходных процессах н. с. коммутационных токов играет роль отрицательной обратной связи, увеличивая быстродействие усилителя [Л. 5, 6, 12 и 13].

Существует мнение, что усилитель с поперечным полем имеет нестабильные характеристики из-за нестабильности щеточного контакта в поперечной цепи при изменении температурных и других условий. Опыт серийного выпуска усилителей с поперечным полем в течение ряда лет на Московском электромеханическом заводе имени Владимира Ильича показывает, что при рациональной конструкции щеточного аппарата, хорошей обработке коллектора и притирке щеток можно обеспечить высокую стабильность характеристик усилителя.

На рис. 7 приведены кривые зависимости н. с. коммутационных токов F_k ; н. с. вихревых токов в стали F_{cm} ; н. с. управления F_y , необходимой для создания э. д. с. в поперечной цепи без учета размагничивающего действия коммутации вихревых токов в стали; суммарной н. с. управления ΣF_y от переходного сопротивления щеточного контакта при постоянном номинальном токе в поперечной цепи якоря для ЭМУ-12АЗ. Кривые построены в относительных единицах, причем за единицу приняты переходное сопротивление щеточного контакта при применении электрографированных щеток и номинальная суммарная н. с. управления машины. При построении кривых предполагалось отсутствие насыщения стали от суммарной н. с. управления.

Как видно из рис. 7, в диапазоне изменения переходного сопротивления от 0,8 до 1,2 номинального суммарная н. с. усилителя практически не меняется.

Выводы. 1. Существующие экспериментальные методы не позволяют определить с достаточной точностью величину н. с. коммутационных токов.

2. Метод, при помощи которого было проведено экспериментальное исследование н. с. в усилителе, позволяет отделить н. с. коммутационных токов от н. с. вихревых токов.

3. В усилителе с поперечным полем н. с. коммутационных токов составляет примерно 25 ... 35% суммарной н. с. управления.

4. Расчет н. с. коммутационных токов, основанный на уравнениях классической теории коммутации, дает результаты, значительно отличающиеся от действительных.

Расчет н. с. при помощи уравнения тока в коммутируемой секции, выведенный из предположения постоянства переходного сопротивления щеток за период коммутации, дает результаты, достаточно близкие с экспериментом.

5. Размагничивающее действие коммутационных токов в усилителе с поперечным полем, с одной стороны, уменьшает коэффициент усиления, а с другой стороны, несколько стабилизирует статические характеристики при изменении условий, влияющих на переходное сопротивление щеточного контакта.

При переходных процессах н. с. коммутационных токов выполняет роль отрицательной обратной связи, увеличивая быстродействие машины.

6. Конструкция и технология изготовления щеточного аппарата и коллектора усилителя значительно влияют на стабильность его характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Арнольд. Машины постоянного тока, т. 1. Гостехиздат, 1931.
2. В. Т. Касьянов. Реакция якоря машин постоянного тока. ВЭП, № 2, 1940.
3. Н. П. Ермолин. Переходные процессы в машинах постоянного тока. Госэнергоиздат, 1951.
4. Я. С. Эпштейн. Особенности проектирования амплидинов. Электричество, № 12, 1945.
5. Н. М. Якименко. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. Электричество, № 9, 1948.
6. Я. С. Эпштейн. Методика и теоретическое обоснование

Частотное устройство телеуправления с синхронными фильтрами

Доктор техн. наук, проф. В. Л. ИНОСОВ и инж. А. М. ЛУЧУК

Украинская сельскохозяйственная академия

Выпускаемые нашей промышленностью устройства телеуправления разработаны для удовлетворения нужд главным образом крупных энергосистем и железнодорожного транспорта [Л. 1] и решают задачу телеуправления преимущественно сосредоточенными объектами. Между тем для нужд сельских энергосистем, некоторых промышленных предприятий, ирригационных сооружений и т. п. необходимы устройства, отличающиеся более простой конструкцией, ясной схемой действия и небольшой стоимостью.

На факультете электрификации Украинской сельскохозяйственной академии было разработано устройство телеуправления [Л. 2] с частотным кодом, которое имеет небольшую емкость и может применяться для управления объектами, размещенными на большой площади. Оно построено из однотипных блоков, соединяющих в себе генератор звуковой частоты небольшой мощности и узкополосный фильтр, основанный не на явлении резонанса, как обычно, а на синхронизме частот сигнала и местного генератора. Подробное описание фильтра дано в одной из работ авторов [Л. 3]. В дальнейшем будем называть его синхронный фильтр-генератор или сокращенно СФГ.

Новое устройство телеуправления было установлено в Корсунь-Шевченковской сельской энергосистеме в июле 1956 г. и до настоящего времени работает безотказно.

Опыт эксплуатации разработанной схемы телеуправления показал, что она обладает весьма большой помехоустойчивостью и что даже при работе системы по высокочастотной связи, где помехи особенно сильны, защиту от ложных срабатываний, примененную в этой системе, можно упростить.

В дальнейшем А. М. Лучук разработал синхронный фильтр на кристаллических триодах. Такой синхронный фильтр-генератор имеет размеры спичечной коробки, более высокую надеж-

ность в работе и меньшее потребление электроэнергии.

Ниже приводится краткое описание синхронного фильтр-генератора на кристаллических триодах, и рассматривается вопрос о возможной емкости устройств с таким фильтром. Кроме того, в качестве примера описывается устройство телеуправления, сигнализации и измерения на синхронных фильтрах с упрощениями, подсказанными опытом эксплуатации.

Работа СФГ основана на следующем принципе.

Исполнительное реле фильтра срабатывает лишь в случае, если частота приходящего сигнала будет совпадать с частотой местного генератора. Так как точное совпадение этих частот маловероятно, то в СФГ использовано явление захватывания частоты местного генератора частотой приходящего сигнала, когда разность этих частот невелика. Следовательно, зона срабатывания реле фильтра определяется зоной захватывания.

На рис. 1 приведена схема СФГ на кристаллических триодах. Нами были использованы плоскостные триоды типа П2Б, но желательно применять более мощные триоды.

В схеме местного генератора типа LC с индуктивной обратной связью использован триод T_1 . Обмотка 1 трансформатора T_P является индуктивностью контура местного генератора. Обратная связь подается на эмиттер триода с обмотки P . Через эту же обмотку подается напряжение захватывания частоты сигнала f_c . Ширина полосы захватывания определяется отношением напряжения сигнала к напряжению на обмотке обратной связи.

В схеме сравнения частот использованы триоды T_2 и T_3 . В цепи коллекторов этих триодов включены встречные обмотки a_1 и a_2 выходного реле фильтра. Токи эмиттеров триодов T_2 и T_3 определяются соответственно суммой и разностью напряжений сигнала и местного генератора.

нование расчета ЭМУ. МЭМЗ. Технический отчет ОБД. 126.000, 1953.

7. G. Loocke. Messung der Bürstenkurzschlußströme einer Gleichstrommaschine mit Hilfe des Halleffektes. E и M, № 14, 1955.

8. М. И. Алябьев. Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока. Электричество, № 5, 1950.

9. М. И. Алябьев. Определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока. Электричество, № 4, 1949.

10. М. И. Алябьев. Опытное определение коммутационной реакции в электромашинных усилителях с попеченным полем и в машинах постоянного тока. Электричество, № 2, 1952.

11. П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов и Ф. А. Горяинов. Проектирование электрических машин. Госэнергоиздат, 1956.

12. С. Ф. Березниковский. Реакция тока попечной цепи якоря электромашинного усилителя. Электричество, № 12, 1956.

13. В. В. Рудаков. Влияние сдвига щеток попечной цепи на переходный процесс электромашинного усилителя. Электричество, № 11, 1952.

14. О. Г. Вегнер. О некоторых вопросах коммутации тока при помощи коллектора и щеток. Труды Ленинградского индустриального института, № 7, 1938.

15. Н. М. Синельников. К вопросу о коммутации машин постоянного тока. Электричество, № 5, 1952.

16. М. Ф. Карапес. Коммутация машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1955.

17. О. Г. Вегнер. Вопросы современной теории коммутации тока в коллекторных машинах. Электричество, № 7, 1956.

[1.3.1957]



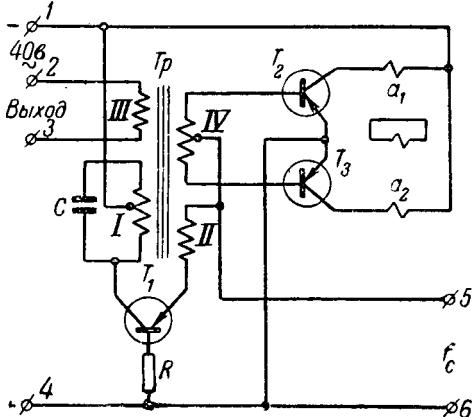


Рис. 1.

Так как ток коллектора определяется током эмиттера, то при несовпадении частот сигнала и местного генератора токи в цепях коллекторов триодов T_2 и T_3 будут содержать находящиеся в противофазе переменные составляющие, частота биений которых

$$f_b = f_0 - f_c,$$

где f_0 — частота местного генератора.

Поэтому в магнитопроводе выходного реле появится н. с., имеющая частоту f_b . Эта н. с. может быть скомпенсирована н. с. короткозамкнутой обмотки реле или исключена путем присоединения параллельно обмоткам реле конденсаторов.

Нижнее значение частоты биений ограничивается полосой захватывания местного генератора, и параметры короткозамкнутой обмотки реле или конденсаторов подбираются так, чтобы исключить срабатывание реле при биениях.

При совпадении частоты сигнала с частотой местного генератора, т. е. при захватывании частоты генератора частотой сигнала, вектор напряжения местного генератора неподвижен относительно вектора напряжения сигнала. При этом к эмиттерам триодов T_2 и T_3 будут подводиться неравные напряжения

$$U_2 = U_0 + U_c \cos \varphi$$

и

$$U_3 = U_0 - U_c \cos \varphi,$$

где φ — угол между векторами напряжений местного генератора U_0 и сигнала U_c .

Постоянные составляющие токов коллекторов также не будут равны, и в якоре выходного реле появится постоянная н. с., пропорциональная (при $U_c < U_0$) напряжению сигнала. При достаточном напряжении сигнала выходное реле сработает.

Описанный синхронный фильтр-генератор состоит из небольшого числа малогабаритных деталей, поэтому размеры фильтра (без выходного реле) соизмеримы с размерами малогабаритных телефонных реле типа РКН.

Полоса пропускания СФГ 1 ... 1,5 %. Несмотря на то, что технически возможно еще более сузить эту полосу, делать этого не следует, так как при более узкой полосе потребовались бы специальные меры по стабилизации частоты генераторов, что усложнило бы схему фильтра.

Нестабилизованные генераторы имеют суммарный ход частоты от действия всех факторов не более $\pm 0,25\%$, что и обеспечивает надежную работу устройства при указанной полосе пропускания. При такой полосе пропускания фильтра соседние частоты можно разнести на 5 ... 6 %, что дает возможность уложить в одной октаве примерно 14 частот.

Синхронные фильтр-генераторы не реагируют на частоты с четной кратностью, но отзываются, правда с меньшей чувствительностью, на частоты с нечетной кратностью. Такой ближайшей частотой является тройная. Учитывая это, в одной системе не следует применять диапазон частот более 1,58 октавы. Так, например, при нижней применяемой частоте $f_1 = 1000$ гц можно применять все частоты меньше 3 000 гц. Из этого следует, что в устройствах телеуправления и телесигнализации Украинской сельскохозяйственной академии может быть применено до 20 различных частот.

Наиболее удачным следует считать диапазон частот от 1 200 до 2 500 гц, в котором можно уложить примерно 15 ... 16 частот. Эти частоты лежат в «полосе прозрачности» телефонных каналов и аппаратов. В этом диапазоне можно получить большее, чем в инфразвуковом, быстродействие частотных устройств. Спектральная же плотность речи и помех здесь относительно невелика.

Правильность сказанного подтверждается и другими работами [Л. 4].

В настоящее время применяется главным образом импульсно-временной код, использующий два качества: есть и нет. Применение кода, использующего три качества, например смешанно-качественного кода, предложенного Б. К. Щукиным, уже дает значительные преимущества. Применение частотного кода, состоящего из большого числа частот, позволяет вообще отказаться от импульсной серии, что повышает быстродействие и упрощает устройства телемеханики, а также дает возможность получить необходимую емкость этих устройств. Необходимая для такого кода полоса частот не превышает 1,5 октавы, в то время как для четкой передачи импульсно-временного кода необходима минимальная полоса пропускания 3 ... 4 октавы.

Известно, что наиболее универсальным является код по форме импульса. Однако на практике такой код мало приемлем, так как любая помеха необратимо искажает форму импульса. Кроме того, этот вид кодирования предъявляет трудновыполнимые требования к каналу связи в отношении амплитудных и фазных искажений.

Чисто частотный код выгодно отличается от кода по форме импульса тем, что снимает требование сохранения амплитудных и фазных соотношений между частотами (интересно отметить, что наше ухо также не реагирует на фазные соотно-

шения, а изменение амплитудных соотношений не изменяет содержания речи).

Поэтому частотный код более приемлем, чем код по форме импульса.

Возможны следующие системы построения частотного кода:

1. Каждая команда имеет свою, предписанную ей частоту. При n частотах максимальное число двухпозиционных объектов

$$N = \frac{n}{2}.$$

В канал связи посыпается одна частота.

2. Каждый объект имеет одну, предписанную ему частоту, и каждой из двух операций «включить» и «отключить» предписывается также своя частота. Число управляемых двухпозиционных объектов

$$N = n - 2,$$

в канал связи посыпается одновременно две частоты.

3. Применяется групповое избирание. Для выполнения команды посыпаются частоты группы, объекта и операции. Возможная емкость устройства

$$N = k(n - k - 2),$$

где k — число групп объектов.

Одновременно посыпается три частоты.

4. Для выбора объекта применяется сочетание двух частот. При числе групп объектов k и числе частот n число объектов

$$N = \frac{k(n - k - 2)(n - k - 3)}{2}.$$

Две частоты по-прежнему приписываются операциям «включить» и «отключить». Одновременно посыпаются четыре частоты.

Возможны и более сложные кодообразования, но и перечисленные простейшие системы дают вполне достаточную емкость. Так, четвертый вариант при $n=16$ и $k=3$ дает емкость

$$N = \frac{3(16 - 3 - 2)(16 - 3 - 3)}{2} = 165.$$

Если требуются средние значения емкости, то наиболее пригодным оказывается третий вариант, так как при нем получаются очень простые схемы устройства. Первый вариант не может быть рекомендован ввиду малой помехоустойчивости. Третий вариант при числе частот $n=16$ и числе групп $k=3$ дает емкость $N=33$ двухпозиционных объектов.

Частотное устройство, выполненное по третьему варианту, допускает телеизмерение стольких параметров, сколько объектов в группе, если выбор параметров выполнить как отдельную группу. Так, например, при 16 частотах в устройстве, трех группах телеуправления и одной группе телеизмерений можно получить следующую общую емкость устройства: число двухпозиционных объектов управления 30, число телеизмерений по вызову 10, число сигналов положения объекта 60. При этом для телеизмерения может быть применена любая из существующих аппаратур, напри-

мер частотно-импульсная, время-импульсная, число-импульсная, фазная и др.

Такая емкость удовлетворяет большому числу случаев применения устройств телеуправления, телесигнализации и телеизмерения и, как было показано выше, не является предельной.

Ниже для примера приводится описание частотного устройства телеуправления, телесигнализации и телеизмерения, выполненного по третьему варианту на две группы объектов телеуправления и одну группу телеизмерений по вызову. Это устройство предназначено для телеуправления 12 двухпозиционными объектами и позволяет осуществить телеизмерение по вызову шести параметров (рис. 2).

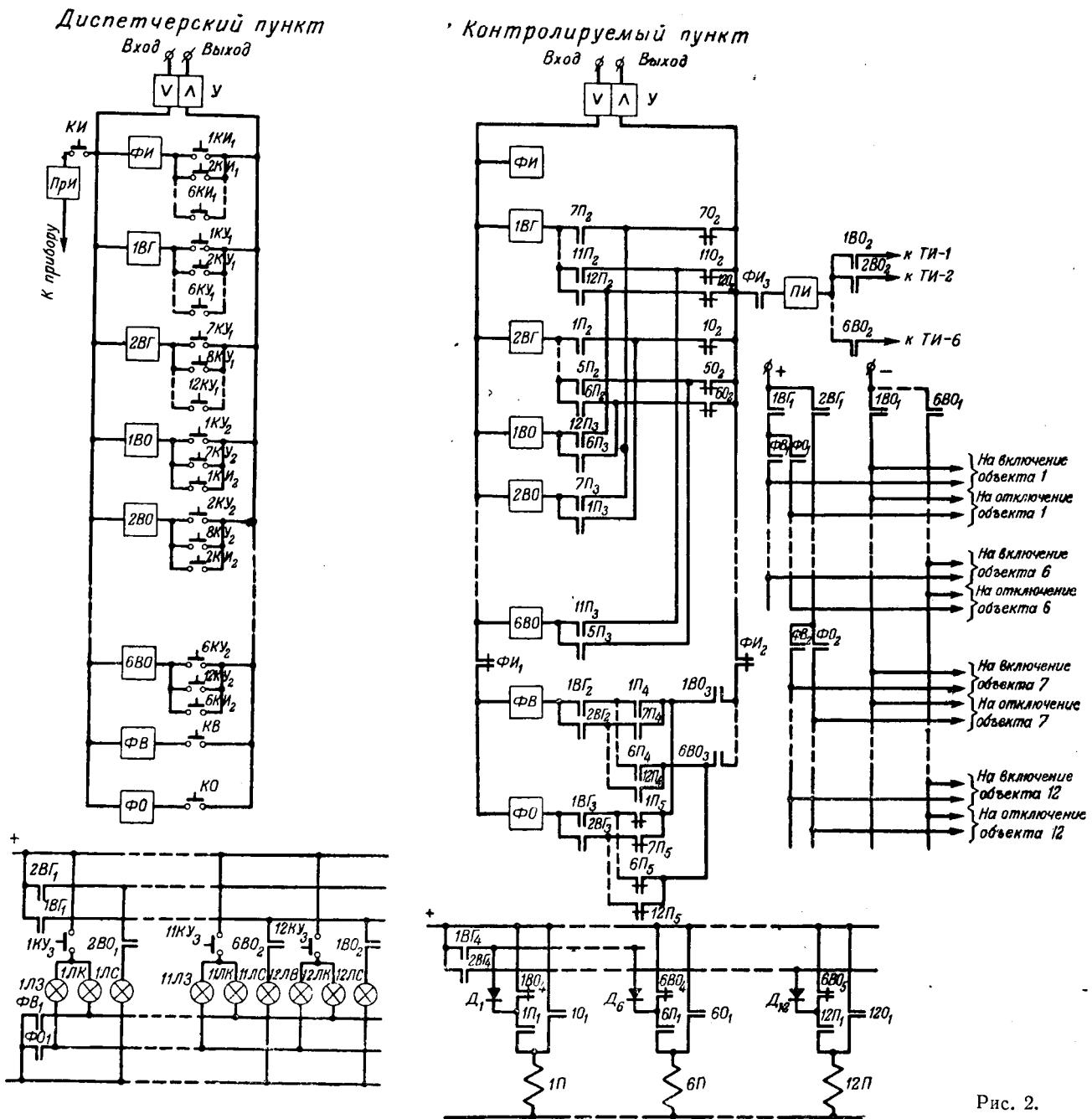
Передающий и приемный полукомплекты состоятся из 11 синхронных фильтров-генераторов, из которых два фильтра служат для выбора группы (BG), шесть — для выбора объекта в группе (BO), два — для выбора операции включить (FB) и отключить (FO) и одного — для вызова телеизмерения (FI). На схеме эти фильтры условно обозначены прямоугольниками.

В схеме применено минимальное количество реле и контактов. На диспетчерском пункте установлено четыре реле в общих блоках и шесть реле в индивидуальных блоках. Все эти реле имеют по одной контактной группе. На контролируемом пункте установлено пять реле в общих блоках и шесть реле в индивидуальных блоках. Число контактов реле — не более пяти. Кроме того, на контролируемом пункте установлено 12 реле-повторителей и имеется две пары блок-контактов объекта (O).

Выбор объекта производится ключом управления KU данного объекта. При этом с диспетчерского пункта в канал связи посыпается одновременно частота фильтра выбора группы BG и выбора объекта в группе BO . Например, для выбора объекта 1 посыпается частота $1BG$ и $1BO$.

На контролируемом пункте срабатывают синхронные фильтры-генераторы, настроенные на частоты $1BG$ и $1BO$. Контактами этих реле выполняются следующие операции: 1) подготавливается оперативная цепь включения объекта 1 (контакты $1BG_1$ и $1BO_1$); 2) в канал связи подается частота FO (контакты $1BO_3$, $1BG_1$ и реле-повторитель $1P_5$). При этом на диспетчерском пункте срабатывает реле FO и загорается зеленая лампочка объекта 1 (контакты $1KU_3$ и FO_4), указывающая, что данный объект отключен. Нажатием кнопки «включить» (KB) в канал связи посыпается исполнительная частота включения. На контролируемом пункте срабатывает реле FB , которое своими контактами FB_1 замыкает подготовленную ранее цепь включения объекта 1.

Своими контактами $1O_1$ объект включает свое реле-повторитель $1P$. При этом размыкаются контакты $1P_5$ и замыкаются контакты $1P_4$, частота FO снимается, а в канал связи посыпается частота FB . Зеленая лампочка на диспетчерском пункте гаснет и загорается красная лампочка LK . После этого посыпаемые частоты снимаются с канала связи, реле отпускают свои контакты, лампочки гаснут и устройство приходит в исходное



ветствующих объектов другой группы удерживаются во включенном состоянии контактами объекта 70_1 . Если при квитировании сигнала объекта 1 первой группы произойдет отключение объекта 7 второй группы, то реле-повторитель будет удерживаться во включенном состоянии через контакт $2B\Gamma_4$ и диод $D7$.

Теперь положение реле P соответствует положению объекта, выходная цепь фильтра BO размыкается, реле BO на диспетчерском пункте отпускает контакты, гаснет лампочка LC и зажигается зеленая лампочка данного объекта. После этого ключом KU снимаются частоты фильтров BG и BO , и устройство приводится в исходное состояние.

При телеизмерении по выбору ключом измерения KI с диспетчерского пункта в канал связи подается частота фильтра измерения ΦI и BO . На контролируемом пункте срабатывают реле соответствующего объекта и ΦI . Реле ΦI контактами ΦI_1 и ΦI_2 разрывает входную и выходную цепи исполнительных блоков, а контактами ΦI_3 присоединяет к каналу связи передатчик измерений PI . Реле BO контактами BO_2 присоединяет к PI соответствующий датчик и в канал связи поступает модулированная (манипулированная) частота измерения. На диспетчерском пункте эта частота подается на приемник измерений, а оттуда на измерительный прибор.

На основе разработанного авторами узкополосного синхронного фильтра-генератора можно выполнить простые по структурной схеме, надеж-

ные и обладающие достаточной емкостью устройства телеуправления, телесигнализации и телеизмерения. Описанная в статье схема является лишь примером подобных устройств. Несомненно, что схемные решения устройств телеуправления на базе синхронного фильтр-генератора могут быть выполнены в различных вариантах в зависимости от конкретных технических условий.

Описанные устройства весьма технологичны. Синхронные фильтр-генераторы, на основе которых построены устройства телеуправления, просты, однотипны и могут производиться по новейшей технологии изготовления радиоаппаратуры. Синхронные фильтр-генераторы могут присоединяться к основным шасси при помощи штекельных разъемов и при необходимости легко заменяться.

Литература

1. М. А. Гаврилов. Современное состояние и основные проблемы исследовательской работы в области телеуправления. „Телемеханизация в народном хозяйстве ССРС“ (Сборник материалов совещания), Москва, 1956.
2. В. Л. Иносов и А. М. Лучук. Частотное устройство телеуправления. Изд. Института научной и технической информации Академии наук ССРС, 1957.
3. В. Л. Иносов и А. М. Лучук. Синхронный фильтр-генератор для частотных устройств телемеханики. „Автоматика и телемеханика“, № 10, 1956.

4. Н. Ф. Пенкин. Диспетчерская централизация на железнодорожном транспорте. „Телемеханизация в народном хозяйстве ССРС“ (Сборник материалов совещания), Москва, 1956.

[28.4.1957]



Переходные процессы в асинхронных двигателях при периодической нагрузке

Кандидат техн. наук, доц. И. С. ПИНЧУК

Челябинский политехнический институт

Во многих производственных механизмах, таких как лесопильные рамы, электромашинные вибраторы и другие, нагрузка и скорость ротора приводного асинхронного двигателя изменяются в течение периода с большой частотой и в широких пределах. Токи в обмотках ротора и статора, а следовательно, и врачающий момент двигателя не успевают принимать установившиеся значения, соответствующие мгновенному значению скорости ротора, так как постоянные времени электромагнитного переходного процесса в двигателе сравнимы, а иногда и больше периода нагрузки. Для таких механизмов приводной двигатель следует выбирать с учетом электромагнитного переходного процесса, вызываемого изменением скорости ротора в пределах периода нагрузки.

Задача о переходном электромагнитном процессе решается аналитически только при заданном законе изменения скорости ротора и при отсутствии активного сопротивления в цепи статора (последнее начинает оказывать существенное влияние на процесс только тогда, когда оно

сравнимо или больше индуктивного сопротивления короткого замыкания).

Решая уравнения переходного процесса [Л. 1] для этого случая, можно представить выражение для врачающего момента двигателя при начальном скольжении $s_0=0$ в следующем виде:

$$M = 2M_k \int_0^t e^{-\alpha'_r(t-\tau)} \cos [\beta(t) - \beta(\tau)] s(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где M_k — максимальный (критический) момент в статическом режиме;

$\alpha'_r = s_k$ — коэффициент затухания переходной составляющей токов, равный критическому скольжению s_k [Л. 2];

$\beta(t) = \int_0^t s(t) dt$ — угол смещения ротора относительно врачающегося поля двигателя;

$s(t)$ — скольжение.

В частности, при $\alpha'_r = 0$

$$M = 2M_k \sin \beta, \quad (2)$$

что соответствует выражению, используемому В. С. Могильниковым в [Л. 3].

Установившийся режим при периодической нагрузке. Ограничиваюсь случаями, когда среднеквадратичное значение момента двигателя и, следовательно, среднее значение скольжения не превышают номинальных (это диктуется условиями нагрева), можно в формуле (1) множитель $\cos [\beta(t) - \beta(\tau)]$ положить равным единице и определять момент из соотношения

$$M = 2M_k \int_0^t e^{-s_k(t-\tau)} s(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Такая возможность объясняется тем, что в рассматриваемом случае $\cos [\beta(t) - \beta(\tau)]$ начинает существенно отличаться от единицы только при таких значениях $t - \tau$, при которых $e^{-s_k(t-\tau)}$ уже близко к нулю.

Получающаяся при этом погрешность тем меньше, чем меньше постоянная составляющая и амплитуда переменной составляющей момента двигателя и чем больше частота последней.

Например, при чисто синусоидальной нагрузке и амплитуде момента двигателя $M_m = 0,707 M_k$ (максимально допустимой по условиям нагрева для двигателя с перегрузочной способностью $\lambda = 2$) погрешность в амплитуде будет меньше $6 \dots 4\%$ при частотах $(25 \dots 150) s_k$, снижаясь до $2,6\%$ при очень больших частотах.

При частотах ниже $20 s_k$ переходный электромагнитный процесс выражен настолько слабо, что его можно не учитывать. Расчеты показывают, что практически во всех случаях, где существенно проявляется электромагнитный переходный процесс, допустимо пользоваться формулой (3).

Замена формулы (1) формулой (3) делает задачу линейной, позволяя определить моменты двигателя не только при заданном законе изменения скольжения, но и при заданном законе изменения момента нагрузки. Кроме того, становится возможным применять метод наложения, разлагая кривую момента нагрузки в тригонометрический ряд и определяя момент двигателя, вызываемый каждой составляющей момента нагрузки. Уравнение (3) целесообразно преобразовать к следующему виду:

$$s = \frac{s_k}{2M_k} M + \frac{1}{2M_k} \frac{dM}{dt}, \quad (4)$$

или, если время измеряется в секундах:

$$s = \frac{s_k}{2M_k} M + \frac{1}{2\omega M_k} \frac{dM}{dt}, \quad (5)$$

где ω — угловая частота сети.

Момент двигателя определяется совместным решением уравнения (5) с уравнением динамики электропривода:

$$M_e = M + J \frac{\omega}{p} \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (6)$$

где M_e — момент нагрузки;

J — момент инерции привода, приведенный к валу двигателя;

p — число пар полюсов двигателя.

При синусоидальной нагрузке:

$$M_e = M_{e \max} \cos 2\pi ft$$

решение имеет вид:

$$M = \frac{M_{e \max}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \frac{T_m}{T}} \cos(2\pi ft - \varphi), \quad (7)$$

где

$$\varphi = \arctg 2\pi f T - \arctg 2\pi f \left[T \left(1 - \frac{f^2}{f_0^2} \right) - T_m \right].$$

Отношение амплитуд или среднеквадратичных значений момента двигателя к моменту нагрузки

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \cdot \frac{T_m}{T}}, \quad (7a)$$

где f — частота нагрузки;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{T \cdot T_m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot M_k}{J}} \text{ — частота собственных незатухающих колебаний;}$$

$$T = \frac{1}{\omega \cdot s_k} \text{ — электромагнитная постоянная времени, сек;}$$

$$T_m = \frac{\omega \cdot s_k \cdot J}{2pM_k} \approx \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 s_k}{2M_k} \text{ — механическая постоянная времени привода, сек.}$$

Действительное значение резонансной частоты

$$f_p = f_0 \sqrt{1 - \frac{T_m}{2T}}. \quad (8)$$

При резонансе:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\frac{T_m}{T} - \left(\frac{T_m}{2T}\right)^2}}. \quad (9)$$

На рис. 1 приведено семейство кривых $m = F(f)$ при различных значениях отношения T_m/T .

Наличие электромагнитного переходного процесса в двигателе приводит к специфическим результатам, главные из которых состоят в следующем:

1. Значительно изменяется частотная характеристика привода, т. е. зависимость $m = F(f)$ и, в частности, появляется возможность резонанса. Резонансная частота у короткозамкнутых двигателей единой серии А без дополнительных маховых масс лежит в пределах $6 \dots 14$ гц, а отношение моментов при резонансе достигает значений $m = 2,5 \dots 3,0$.

Дополнительные маховые массы, увеличивая отношение T_m/T , снижают резонансную частоту и амплитуду момента двигателя при резонансе. Резонанс невозможен при $T_m/T > 2$. Благодаря

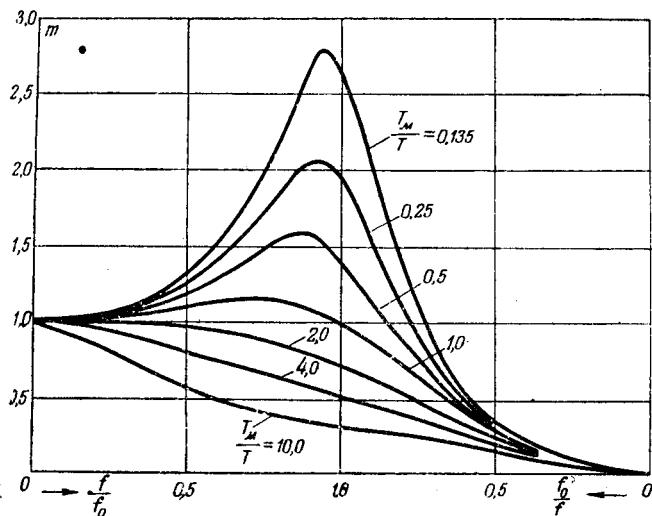


Рис. 1. Частотные характеристики привода с учетом электромагнитного процесса в двигателе.

этому в реальных установках резонанс наблюдается очень редко.

2. Расчет переменной составляющей момента двигателя, базирующийся на статической механической характеристике, дает заниженные значения при низких частотах ($f < \sqrt{2} f_0$) и завышенные при высоких частотах ($f > \sqrt{2} f_0$). В обоих случаях ошибка может достигать 200%.

3. При высоких частотах изменение механической характеристики за счет активного сопротивления ротора практически не оказывается на моменте двигателя, пока соблюдаются условие $(2\pi f T)^2 \gg 1$.

Экспериментальное исследование производилось на двигателе АД-41-4, спаренном жесткой муфтой с машиной постоянного тока, при помощи которой создавалась практически синусоидальная нагрузка различной частоты при неизменной амплитуде. Осциллографировались линейный ток i_a , линейное напряжение u_{bc} и ток якоря нагрузочной машины. Учитывая симметрию двигателя и системы напряжений, мгновенные значения потребляемой от сети мощности определялись из соотношения

$$P = \sqrt{\frac{3}{2}} U_a \cdot i_0, \quad (10)$$

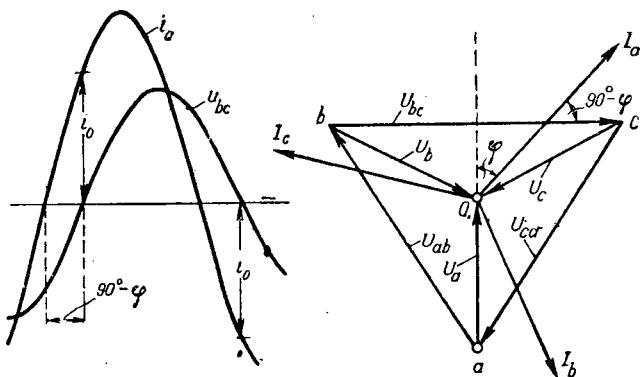


Рис. 2. Определение потребляемой двигателем мощности по осциллограммам линейных токов и напряжения.

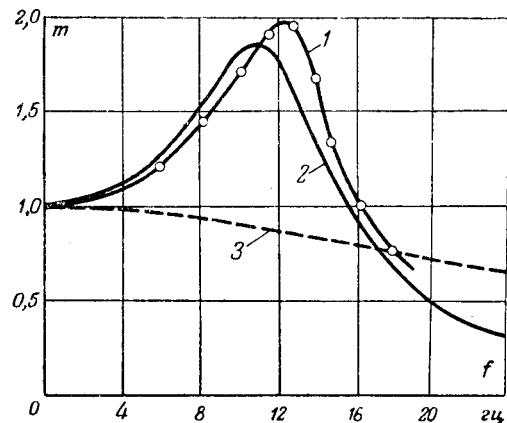


Рис. 3. Сравнение экспериментальной частотной характеристики с расчетными.

где i_0 — мгновенное значение тока i_a в момент, когда напряжение u_{bc} проходит через нуль, представляющее собой увеличенную в $\sqrt{2}$ раз активную составляющую линейного тока (рис. 2).

По известной мощности с учетом потерь в статоре определялись мгновенные значения момента двигателя с интервалом в 0,01 сек и строилась кривая $M = F(t)$, по которой определялась амплитуда момента двигателя и ее отношение к амплитуде нагрузки для каждой частоты нагрузки.

Сравнение результатов эксперимента с расчетом дано на рис. 3. Кривая 1 построена по экспериментальным данным, кривая 2 рассчитана по формуле (7а) с использованием каталоговых данных, кривая 3 рассчитана без учета электромагнитного переходного процесса. Сравнение подтверждает применимость предлагаемого метода учета электромагнитного переходного процесса при периодической нагрузке. Некоторое расхождение между кривыми 1 и 2 объясняется погрешностью эксперимента, неточностью каталоговых данных и наличием не учитываемого методикой активного сопротивления обмотки статора.

Электрическая схема замещения. Исходя из уравнений (5) и (6) нетрудно заключить, что значения скольжения, моментов нагрузки, двигателя и момента инерции будут численно равны соответственно значениям напряжения и токов i_1, i_2, i_3 в схеме, изображенной на рис. 4,а, если

$$r = \frac{s_k}{2M_k}; \quad L = \frac{1}{2\omega M_k} \quad \text{и} \quad C = J \frac{\omega}{p}.$$

Таким образом, задача может быть сведена к расчету элементарно простой электрической цепи.

Некоторым усложнением цепи можно учесть влияние элементов, связывающих двигатель с рабочей машиной (муфты, ременные передачи и др.), которое при высоких частотах нагрузки оказывается весьма существенным. Например, в цепи, представленной на рис. 4,б, индуктив-

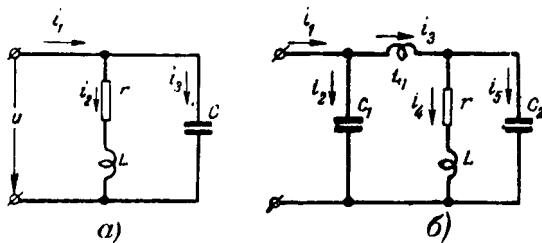


Рис. 4. Схемы замещения.

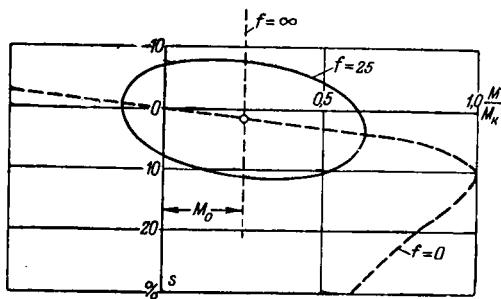


Рис. 5. Механические характеристики двигателя.

ностью L_1 учитывается упругость муфты. Здесь r и L те же, что и в схеме рис. 4,а:

$$C_1 = J_1 \frac{\omega}{p}; C_2 = J_2 \frac{\omega}{p}; L_1 = \frac{p}{k\omega},$$

где J_1 — момент инерции рабочей машины;

J_2 — момент инерции двигателя;
 k — упругость муфты, $\text{кгм}/\text{рад}$.

Ток i_1 численно равен моменту нагрузки, а ток i_4 — моменту двигателя.

Механическая характеристика двигателя зависит от характера нагрузки и тем сильнее отличается от статической, чем выше частота нагрузки. Аналитическое выражение ее может быть получено из формулы (3) или как зависимость напряжения u от тока i_2 в схеме замещения рис. 4,а.

При синусоидальной нагрузке механическая характеристика практически представляет собой эллипс (рис. 5), вырождающийся в статическую характеристику при $f=0$ и вертикальную линию при $f=\infty$. Следует отметить, что при высокой частоте нагрузки механическая характеристика будет достаточно мягкой даже при очень малом активном сопротивлении ротора и практически не зависит от него, если $(2\pi f T)^2 \gg 1$.

Пример. Требуется рассчитать кривую момента, развиваемого асинхронным двигателем А82-8 ($P_n = 28 \text{ квт}$,

$s_n = 2,65\%$, $\lambda = \frac{M_k}{M_n} = 2,0$), если момент рабочей машины, приведенный к валу двигателя, равен (кривая 1 рис. 6):

$$M_c = 20 + 15 \cos 25t + 25 \cos (50t - 90^\circ) \text{ кгм},$$

а суммарный маховой момент привода [$GD^2 = 7,1 \text{ кгм}^2$. Находим максимальный момент

$$M_k = \frac{975P_n}{n_n} \cdot \lambda = \frac{975 \cdot 28}{730} \cdot 2 = 74,8 \text{ кгм}$$

и критическое скольжение

$$s_k = s_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 2,65 (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 9,9\%.$$

Параметры схемы замещения (рис. 4,а):

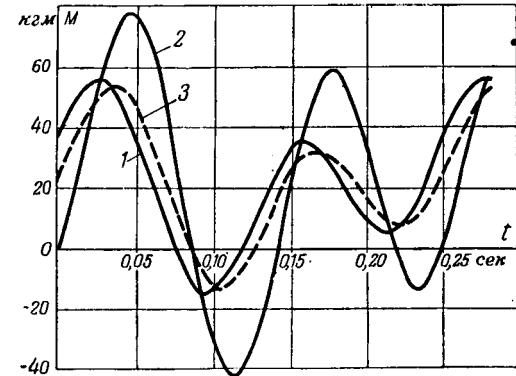


Рис. 6. Нагрузочные диаграммы двигателя с учетом (2) и без учета (3) электромагнитного переходного процесса.

$$r = \frac{s_k}{2M_k} = \frac{0,099}{2 \cdot 74,8} = 6,63 \cdot 10^{-4};$$

$$L = \frac{1}{2\omega M_k} = \frac{1}{2 \cdot 314 \cdot 74,8} = 0,213 \cdot 10^{-4};$$

$$C = J \frac{\omega}{p} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{\omega}{p} = \frac{7,1}{4 \cdot 9,81} \cdot \frac{314}{4} = 14,2.$$

Постоянная составляющая момента двигателя равна постоянной составляющей момента нагрузки $M_0 = 20 \text{ кгм}$.

Переменные составляющие найдем, исходя из схемы замещения. В комплексной форме

$$\frac{\dot{M}}{M_c} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-jx_C}{r + j(x_L - x_C)},$$

поэтому

$$\begin{aligned} \dot{M}_1 &= 15e^{j25t} \frac{1}{6,63 \cdot 10^{-4} + j(25 \cdot 0,213 \cdot 10^{-4} - \frac{1}{25 \cdot 14,2})} = \\ &= 17,8 \cdot e^{j(25t - 16^\circ)} \text{ кгм}; \\ \dot{M}_2 &= 25 \cdot e^{j(50t - 90^\circ)} \times \\ &\quad \times \frac{1}{6,63 \cdot 10^{-4} + j(50 \cdot 0,213 \cdot 10^{-4} - \frac{1}{50 \cdot 14,2})} = \\ &= 47,3 \cdot e^{j(50t - 152^\circ)} \text{ кгм}. \end{aligned}$$

Момент двигателя (кривая 2, рис. 6)

$$M = 20 + 17,8 \cos (25t - 16^\circ) + 47,3 \cos (50t - 152^\circ) \text{ кгм}.$$

Среднеквадратичное значение момента двигателя

$$M_e = \sqrt{20^2 + \frac{17,8^2}{2} + \frac{47,3^2}{2}} = 32,4 \text{ кгм}.$$

При расчете по статической характеристике (спрямленной)

$$M = 20 + 14,6 \cos (25t - 13^\circ) + 22,3 \cos (50t - 115^\circ) \text{ кгм}$$

(кривая 3 рис. 6), $M_e = 24 \text{ кгм}$.

Литература

1. А. А. Янко-Триницкий. Уравнения переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решения. Электричество, № 3, 1951.

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

3. В. С. Могильников. Резонанс в асинхронных электроприводах при пульсирующей нагрузке. Электричество, № 8, 1956.

Анализ работы многофазных компенсированных реле сопротивления при помощи круговых диаграмм

Кандидат техн. наук П. К. ФЕЙСТ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

За последнее время в качестве одного из элементов дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий широко используется многофазное компенсированное реле сопротивления¹, реагирующее на площадь треугольника линейных напряжений в конце защищаемой зоны [Л. 1]. В связи с тем, что это реле не имеет определенной характеристики срабатывания в комплексной плоскости, анализ его действия в различных режимах работы защищаемой линии связан с некоторыми трудностями. Поэтому весьма желательно разработать простую методику, позволяющую достаточно наглядно проводить такой анализ и не требующую трудоемких расчетов.

Для полноты исследования важно учитывать не только место короткого замыкания, но и его вид, величину переходных сопротивлений в месте повреждения, а также нагрузку, передаваемую по линии. Методика должна позволять учитывать изменения в желательных пределах отношения абсолютных величин э. д. с. на концах электропередачи и углов между их векторами.

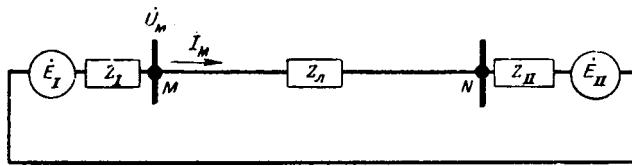


Рис. 1. Схема замещения электропередачи.

Ввиду наличия в энергосистемах Министерства электростанций устройств однофазного автоматического повторного включения нужно иметь возможность производить указанный анализ и для неполнофазных режимов работы линии. В частности, весьма важно выяснить, может ли дистанционная защита с многофазным компенсированным реле сопротивления удовлетворительно действовать при замыкании двух оставшихся в работе фаз линии. Это важно вследствие того, что реле избирательного органа, резервирующее основные защиты линии в неполнофазном режиме ее работы, надежно действуют только при повреждениях, связанных с замыканиями на землю.

В настоящей работе делается попытка анализа работы многофазного компенсированного реле сопротивления при помощи круговых диаграмм. Анализ проводится применительно к схеме электропередачи, представленной на рис. 1. Реле установлено в точке М защищаемой линии. Предполагается, что э. д. с. E_1 и E_2 и сопротивления Z_1 и Z_2 в схемах замещения для различных режимов работы линии определены с учетом нагрузки.

¹ Реле типа ИСБ-182 или КРС-121 Чебоксарского электроаппаратного завода, применяемые в дистанционных защитах типов ПЗ-156 и ПЗ-157 соответственно.

Известно [Л. 1 и 2], что условия срабатывания реле сопротивления, реагирующего на площадь треугольника линейных напряжений в конце защищаемой зоны, характеризуются неравенством

$$|\dot{U}_{M2} - Z_y \dot{I}_{M2}| > |\dot{U}_{M1} - Z_y \dot{I}_{M1}|, \quad (1)$$

где \dot{U}_{M1} , \dot{U}_{M2} , \dot{I}_{M1} и \dot{I}_{M2} — симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений и токов, подводимых к реле;

Z_y — сопротивление, характеризующее зону работы реле (уставка реле).

Задача сводится к тому, чтобы токи и напряжения, входящие в неравенство (1), выразить через параметры электропередачи в функции отношения э. д. с. на ее концах r и угла между их векторами θ . Очевидно, это должно быть сделано с учетом режима работы линии (полнофазного или неполнофазного) и условий короткого замыкания (места, вида и величины переходных сопротивлений в месте повреждения).

После указанных преобразований неравенство (1) определит на комплексной плоскости некоторую область, ограниченную окружностью. При данных конкретных условиях, обусловленных режимом работы электропередачи и защищаемой линии, а также местом и видом повреждения, эта область заключает в себе все значения r и θ , при которых реле будет работать, и, следовательно, может рассматриваться как область работы реле, а ограничивающая ее окружность как его характеристика.

Реальные значения r и θ легко находятся на основании условий, характеризующих рассматриваемый режим работы электропередачи и место короткого замыкания. На комплексной плоскости эти значения r и θ располагаются в области, ограниченной дугами окружностей, параметры которых определяются предельными значениями r и θ , принятymi к рассмотрению и поправленными на величины, зависящие только от места короткого замыкания. При наличии специального бланка «общей диаграммы» [Л. 3 и 4] границы этой области определяются непосредственно по чертежу.

Область реальных значений r и θ и область работы реле полностью характеризуют его поведение в данных конкретных условиях.

Ниже приводится вывод расчетных выражений, определяющих характеристику срабатывания реле при различных режимах работы защищаемой линии.

Неполнофазный режим работы защищаемой линии (отключена одна фаза). С учетом обозначений, принятых на рис. 2:

$$I_{M1} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{II}}{\Sigma Z_1 + \Sigma Z_2 + \Sigma Z_0} = \frac{\dot{E}_1}{Z^{(1,2)}} (1 - pe^{j\theta});$$

$$I_{M2} = -\frac{\Sigma Z_0}{\Sigma Z_2 + \Sigma Z_0} \cdot I_{M1}.$$

$$\text{Здесь } p = \frac{E_{II}}{E_1};$$

θ — угол между векторами э. д. с. \dot{E}_1 и \dot{E}_{II} ;

ΣZ_1 , ΣZ_2 и ΣZ_0 — суммарные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей схемы замещения рис. 2, определяемые соотношением $\Sigma Z = Z_1 + Z_2 + Z_{II}$.

Очевидно,

$$\dot{U}_{M1} - Z_y I_{M1} = \dot{E}_1 - (Z_{II} + Z_y) I_{M1} = \\ = \left(\frac{1}{1 - pe^{j\theta}} - \frac{Z_{II} + Z_y}{Z^{(1,2)}} \right) \dot{E}_1 (1 - pe^{j\theta}); \quad (2)$$

$$\dot{U}_{M2} - Z_y I_{M2} = -(Z_{II} + Z_y) I_{M2} = \\ = \frac{\Sigma Z_0}{\Sigma Z_2 + \Sigma Z_0} \cdot \frac{Z_{II} + Z_y}{Z^{(1,2)}} \cdot \dot{E}_1 (1 - pe^{j\theta}). \quad (3)$$

На основании выражений (1), (2) и (3) условие срабатывания реле сопротивления запишется следующим образом:

$$K^{(1,2)} \left| \frac{Z_{II} + Z_y}{Z^{(1,2)}} \right| > \left| \frac{Z_{II} + Z_y}{Z^{(1,2)}} - \frac{1}{1 - pe^{j\theta}} \right|, \quad (4)$$

где

$$K^{(1,2)} = \left| \frac{\Sigma Z_0}{\Sigma Z_2 + \Sigma Z_0} \right|.$$

Как уже указывалось выше, неравенство (4) определяет область срабатывания исследуемого

реле на комплексной плоскости, ограниченную окружностью, радиус которой

$$R^{(1,2)} = K^{(1,2)} \left| \frac{Z_{II} + Z_y}{Z^{(1,2)}} \right|, \quad (5)$$

а радиус-вектор центра

$$p^{(1,2)} = \frac{Z_{II} + Z_y}{Z^{(1,2)}}. \quad (6)$$

Таким образом, реле будет работать только при тех значениях p и θ , при которых конец вектора $\frac{1}{1 - pe^{j\theta}}$ будет лежать внутри указанной окружности. Следовательно, эта окружность может рассматриваться как характеристика срабатывания реле.

Нетрудно видеть, что определенная таким образом характеристика реле зависит не только от его уставки Z_y , но также и от параметров электропередачи — сопротивлений Z_{II} , Z_{II} и $Z^{(1,2)}$.

Для анализа работы реле удобно воспользоваться графиком «общей диаграммы» [Л. 3 и 4], который в уменьшенном в 4 раза виде приведен на рис. 3. Если этот график правильно ориентирован относительно осей комплексной плоскости, то непосредственно на нем можно определить геометрические места концов вектора $\frac{1}{1 - pe^{j\theta}}$. Этими геометрическими местами являются два взаимно-ортогональных семейства окружностей или дуг этих окружностей.

При постоянном p и переменном θ геометрическим местом концов вектора $\frac{1}{1 - pe^{j\theta}}$ являются окружности, центры которых расположены на вертикальной оси графика, а при постоянном θ и переменном p ограниченные точками A и B дуги окружностей, центры которых расположены на горизонтальной оси графика. Очевидно, конец вектора $\frac{1}{1 - pe^{j\theta}}$, отвечающий некоторым значениям p и θ , находится в точке пересечения окружности и дуги, соответствующих этим значениям p и θ .

Так как окружности и дуги графика programmedированы в значениях произведения $K_i p$ и суммы $\delta_i + \theta$, где δ_i — аргумент K_i , то одни и те же окружности и дуги соответствуют бесчисленному множеству значений p и θ в зависимости от значений комплексной величины K_i . Последняя введена в график «общей диаграммы» для учета условий перехода от э. д. с. и сопротивлений действительных генераторов электропередачи к э. д. с. и сопротивлениям ее эквивалентных генераторов и учета условий коротких замыканий, если они имеются.

Поскольку в нашем случае неполнофазный режим рассматривается применительно к схеме рис. 1, в которой э. д. с. действительных генераторов уже замещены эквивалентными, комплексная величина $K_i = 1$. В общем случае зна-

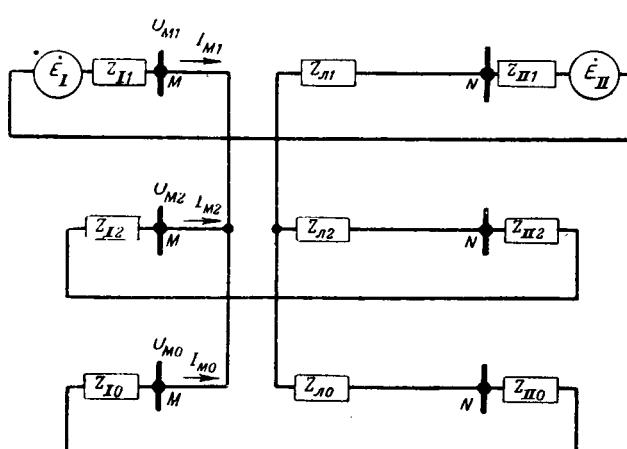


Рис. 2. Расчетная схема замещения электропередачи при неполнофазном режиме.

чения p и θ , соответствующие любому значению K_i , легко определяются

из соотношений $p = \frac{K_p}{K_i}$ и $\theta = K_\theta - \delta_i$.

Здесь K_p равно произведению $K_i p$, которому соответствует данная окружность графика, а K_θ сумме $\delta_i + \theta$, которой соответствует данная дуга.

Численные значения постоянных K_p и K_θ выбраны такими, чтобы построенные для них окружности и дуги образовали достаточно густую сетку, обеспечивающую необходимую точность приближенного определения величин θ и p . В необходимых случаях эта точность легко может быть повышена проведением на графике дополнительных окружностей и дуг, соответствующих промежуточным значениям p и θ .

Для правильной ориентировки графика „общей диаграммы“ относительно осей комплексной плоскости точки A графика должна быть совмещена с началом комплексной плоскости, а отрезок AB — с положительным направлением действительной оси. Тогда, отложив на графике „общей диаграммы“ (рис. 3) в соответствующем масштабе радиус-вектор $p^{(1,2)}$ (6) и построив с центром на его конце окружность радиуса $R^{(1,2)}$ (5), легко найти область работы реле и определить совокупность значений p и θ , попадающих внутрь этой области и приводящих реле в действие. Сопоставление этих значений с реальными значениями p и θ данной электропередачи дает полное представление о поведении реле при неполнофазном режиме работы защищаемой линии.

При выборе масштаба, в котором следует откладывать на графике величины $p^{(1,2)}$ и $R^{(1,2)}$, за единицу принимается отрезок AB графика.

Несимметричные короткие замыкания в полнофазном режиме работы защищаемой линии. Как показано в приложении, для систем с большим током замыкания на землю при всех видах несимметричных коротких замыканий в одной точке действительны следующие выражения:

$$\dot{U}_{M1} - Z_y \dot{I}_{M1} = \left[\Delta Z \frac{Z_{II} + Z_y}{Z_{II}} - \frac{\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}} (Z_y - Z_{MK1})}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} pe^{j\theta}} \right] I_{K1}; \quad (7)$$

$$\dot{U}_{M2} - Z_y \dot{I}_{M2} = -Z_{2\Sigma} \frac{Z_{12} + Z_y}{Z_{12}} \dot{I}_{K2}. \quad (8)$$

В соответствии с обозначениями, принятыми при расчетах токов короткого замыкания, в выражениях (7) и (8)

$$Z_\Sigma = Z_{1\Sigma} + \Delta Z,$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

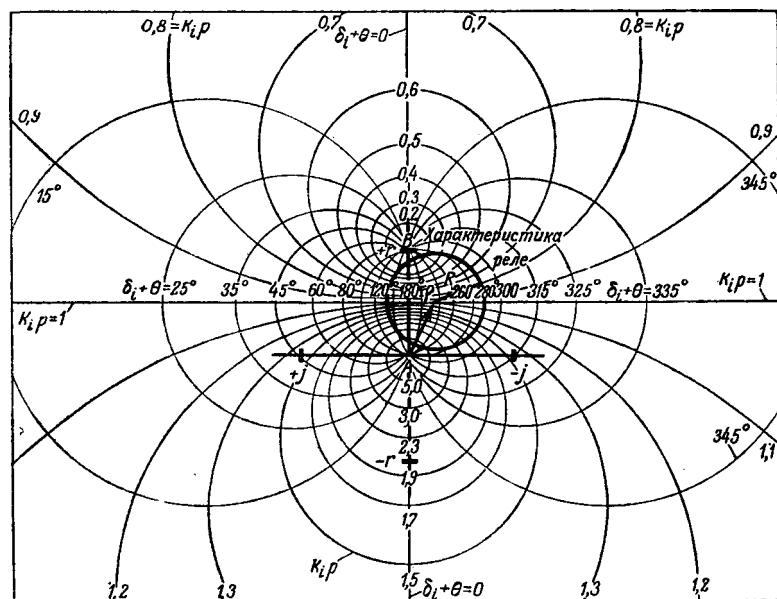


Рис. 3. График „общей диаграммы“ и круговые диаграммы, характеризующие действие реле в неполнофазном режиме работы линии.

где ΔZ — добавочное сопротивление, зависящее от вида повреждения h ;

$Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}$ — суммарные сопротивления прямой и обратной последовательностей схемы рис. 4 относительно точки короткого замыкания;

Z_1 и Z_{II} — сопротивления, определяющие место короткого замыкания;

Z_{MK1} — сопротивление прямой последовательности поврежденного участка защищаемой линии.

При двухфазном коротком замыкании добавочное сопротивление $\Delta Z^{(2)} = Z_{2\Sigma} + R_n$, при однофазном замыкании на землю $\Delta Z^{(1)} = Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_n$, при двухфазном замыкании на землю

$$\Delta Z^{(1,1)} = \frac{\left(Z_{2\Sigma} + \frac{R_n}{2} \right) \left(Z_{0\Sigma} + \frac{R_n}{2} + 3R'_n \right)}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + R_n + 3R'_n} + \frac{R_n}{2},$$

где $Z_{0\Sigma}$ — суммарное сопротивление нулевой последовательности;

R_n и R'_n — переходные сопротивления в месте повреждения в соответствии со схемой замещения для данного вида короткого замыкания.

Согласно выражениям (1), (7) и (8) условие срабатывания реле сопротивления запишется следующим образом:

$$\left| \frac{I_{K2}}{I_{K1}} \right| Z_{2\Sigma} \frac{Z_{12} + Z_y}{Z_{12}} > \left| \Delta Z \frac{Z_{II} + Z_y}{Z_{II}} - \frac{\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}} (Z_y - Z_{MK1})}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} pe^{j\theta}} \right|. \quad (9)$$

Неравенство (9) определяет условие работы реле для любого вида несимметричного короткого замыкания в одной точке, если величины сопротивлений Z_Σ и ΔZ , а также отношение токов $\frac{I_{K2}}{I_{K1}}$ в месте повреждения определены применительно к данному виду короткого замыкания.

При двухфазных коротких замыканиях и однофазных замыканиях на землю отношение $\frac{I_{K2}}{I_{K1}} = 1$, а при двухфазных замыканиях на землю

$$\frac{I_{K2}}{I_{K1}} = \frac{Z_{0\Sigma} + \frac{R_n}{2} + 3R'_n}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + R_n + 3R'_n}.$$

Неравенство (9) показывает, что при $Z_{MK1} = Z_y$, т. е. при повреждении на границе зоны, работа реле не зависит от режима работы электропередачи, от величин p и θ . Нетрудно видеть, однако, что при повреждении в этом месте действительная предельная зона работы реле определяется лишь при двухфазных коротких замыканиях и двухфазных замыканиях на землю и отсутствии переходных сопротивлений в месте повреждения. При наличии же переходных сопротивлений в месте повреждения, а также в любом случае однофазного замыкания на землю действительная предельная зона работы реле оказывается короче, так как при этом $\Delta Z > Z_{2\Sigma}$.

При $Z_y - Z_{MK1} \neq 0$ неравенство (9) целесообразно несколько преобразовать, разделив обе его части на $\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}}(Z_y - Z_{MK1})$. Тогда оно будет иметь следующий вид:

$$\frac{I_{K2}}{I_{K1}} \cdot \left| \frac{Z_{2\Sigma} \frac{Z_{12} + Z_y}{Z_{12}}}{\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}}(Z_y - Z_{MK1})} \right| > \left| \frac{\Delta Z \frac{Z_{11} + Z_y}{Z_{11}}}{\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}}(Z_y - Z_{MK1})} - \frac{1}{1 + \frac{Z'_{11}}{Z'_{III}} pe^{j\theta}} \right|. \quad (10)$$

Неравенство (10), подобно неравенству (4), определяет в комплексной плоскости область, ограниченную окружностью. Радиус этой окружности

$$R^{(K)} = \frac{I_{K2}}{I_{K1}} \cdot \left| \frac{Z_{2\Sigma} \frac{Z_{12} + Z_y}{Z_{12}}}{\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}}(Z_y - Z_{MK1})} \right|, \quad (11)$$

а радиус-вектор ее центра

$$\rho^{(K)} = \frac{\Delta Z \frac{Z_{11} + Z_y}{Z_{11}}}{\frac{Z_\Sigma}{Z_{1\Sigma}}(Z_y - Z_{MK1})}. \quad (12)$$

Сопоставление выражений (5) и (6), (11) и (12) показывает, что имеется полная аналогия

в подходе к анализу работы реле в обоих случаях. Поэтому все сказанное относительно определения области работы реле и его характеристики при неполнофазном режиме работы защищаемой линии полностью относится к определению области работы и характеристики при несимметричных коротких замыканиях на линии.

Следует лишь иметь в виду, что область реальных значений p и θ на графике «общей диаграммы» при коротких замыканиях должна определяться с учетом их места. Неравенство (10) показывает (знаменатель второго члена его правой части), что для этого при определении окружностей и дуг, ограничивающих область срабатывания реле, нужно учитывать модуль и аргумент отношения $\frac{Z'_{11}}{Z'_{III}}$ и угол в 180° . И то и другое может быть произведено автоматически, если комплексную величину K_i , которой соответствуют окружности и дуги графика «общей диаграммы», принять равной $-\frac{Z'_{11}}{Z'_{III}}$.

Очевидно, анализ работы реле может быть проведен с учетом активных сопротивлений элементов электропередачи, а также с учетом того, что угол уставки реле Z_y отличается от угла полного сопротивления защищаемой линии.

Можно показать, что аналогичным образом может исследоваться работа рассматриваемых реле при коротких замыканиях, возникающих на линиях, работающих в неполнофазном режиме, а также других дистанционных реле, использующих для своего действия более чем один ток и одно напряжение.

Приложение. Определение величин $U_{M1} - Z_y I_{M1}$ и $\dot{U}_{M2} - Z_y I_{M2}$ для несимметричных коротких замыканий в полнофазном режиме работы защищаемой линии. Свертывая схему рис. 4 относительно точки короткого замыкания, легко определить, что действующая в ней эквивалентная э. д. с.

$$\dot{E}_s = \frac{\dot{E}_1 Z'_{III} + \dot{E}_{II} Z'_{II}}{\Sigma Z_1} = \frac{Z'_{III}}{\Sigma Z_1} \left(1 + \frac{Z'_{11}}{Z'_{III}} \cdot pe^{j\theta} \right) \dot{E}_1,$$

где $pe^{j\theta} = \frac{\dot{E}_{II}}{\dot{E}_1}$.

Соответственно суммарное сопротивление схемы рис. 4 для тока прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$Z_\Sigma = Z_{1\Sigma} + \Delta Z.$$

Здесь $Z_{1\Sigma}$ — суммарное сопротивление прямой последовательности схемы относительно точки короткого замыкания, а ΔZ — добавочное сопротивление, представляющее зависящую от вида повреждения комбинацию ее суммарных сопротивлений обратной и нулевой последовательностей $Z_{2\Sigma}$ и $Z_{0\Sigma}$ и переходных сопротивлений в месте повреждения.

На основании соотношений для \dot{E}_s и Z_Σ

$$I_{K1} = \frac{Z'_{III}}{Z_\Sigma \Sigma Z_1} \left(1 + \frac{Z'_{11}}{Z'_{III}} \cdot pe^{j\theta} \right) \dot{E}_1.$$

Из схемы рис. 4 непосредственно следуют уравнения

$$\dot{E}_1 - Z'_{II} i_{M1} = \dot{E}_{II} - Z'_{III} i_{N1} \quad \text{и} \quad i_{N1} = i_{K1} - i_{M1},$$

решение которых определяет:

$$i_{M1} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{II}}{\Sigma Z_1} + \frac{Z'_{II}}{\Sigma Z_1} i_{K1}.$$

Аналогично, имея в виду, что в схеме обратной последовательности э. д. с. \dot{E}_I и \dot{E}_{II} равны нулю:

$$i_{M2} = \frac{Z'_{II}}{\Sigma Z_2} i_{K2}.$$

С учетом выведенных соотношений для токов i_{M1} , i_{M2} и i_{K1} , а также обозначений, принятых на рис. 4, получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{M2} - Z_y i_{M2} &= -(Z_{12} + Z_y) i_{M2} = \\ &= -(Z_{12} + Z_y) \frac{Z'_{II}}{\Sigma Z_2} i_{K2} = -Z_{22} \frac{Z_{12} + Z_y}{Z_{12}} i_{K2}; \end{aligned}$$

Можно показать [Л. 4], что

$$\frac{1 + K_u p e^{j\theta}}{1 - K_i p e^{j\theta}} = -\frac{K_u}{K_i} + \frac{1 + \frac{K_u}{K_i}}{1 - K_i p e^{j\theta}}.$$

Положив

$$K_u = \frac{\dot{Z}_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y}, \quad \text{а} \quad K_i = -\frac{Z'_{II}}{Z'_{III}},$$

нетрудно убедиться, что

$$\begin{aligned} \frac{1 + \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y} p e^{j\theta}}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} \cdot p e^{j\theta}} &= \frac{Z'_{III}}{Z'_{II}} \cdot \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y} + \\ &+ \frac{1 - \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} \cdot \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y}}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} p e^{j\theta}}. \end{aligned}$$

С учетом этого соотношения

$$\begin{aligned} \dot{U}_{M1} - Z_y i_{M1} &= \left[\frac{Z_\Sigma (Z_{II} + Z_y)}{Z'_{II}} + \frac{\frac{Z_\Sigma}{Z'_{III}} (\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y) - \frac{Z_\Sigma}{Z_{II}} (Z_{II} + Z_y)}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} p e^{j\theta}} - \frac{Z'_{III} (Z_{II} + Z_y)}{\Sigma Z_1} \right] i_{K1} = \\ &= \left[\left(\frac{Z_\Sigma}{Z'_{II}} - \frac{Z'_{III}}{\Sigma Z_1} \right) (Z_{II} + Z_y) + \frac{\frac{Z_\Sigma \Sigma Z_1}{Z'_{III}} - Z_\Sigma (Z_{II} + Z_y) \left(\frac{1}{Z'_{III}} + \frac{1}{Z_{II}} \right)}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} \cdot p e^{j\theta}} \right] i_{K1} = \\ &= \left[(Z_\Sigma - Z_{12}) \frac{Z_{II} + Z_y}{Z'_{II}} + \frac{\frac{Z_\Sigma Z'_{II}}{Z_{12}} - \frac{Z_\Sigma}{Z_{12}} (Z_{II} + Z_y)}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} \cdot p e^{j\theta}} \right] i_{K1} = \left[(Z_\Sigma - Z_{12}) \frac{Z_{II} + Z_y}{Z'_{II}} + \frac{\frac{Z_\Sigma}{Z_{12}} (Z'_{II} - Z_{II} - Z_y)}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} \cdot p e^{j\theta}} \right] i_{K1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{M1} - Z_y i_{M1} &= \dot{E}_1 - (Z_{II} + Z_y) i_{M1} = \\ &= \dot{E}_1 - (Z_{II} + Z_y) \left(\frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_{II}}{\Sigma Z_1} + \frac{Z'_{III}}{\Sigma Z_1} i_{K1} \right) = \\ &= \left(1 - \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1} \right) \dot{E}_1 + \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1} \dot{E}_{II} - \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1} Z'_{III} i_{K1} = \end{aligned}$$

$$= \left[\frac{(\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y) \dot{E}_1 + (Z_{II} + Z_y) \dot{E}_{II} - Z'_{III} (Z_{II} + Z_y)}{\Sigma Z_1 i_{K1}} \right] i_{K1} =$$

$$\begin{aligned} &= \left[\frac{Z_\Sigma}{Z'_{III}} (\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y) \frac{1 + \frac{Z_{II} + Z_y}{\Sigma Z_1 - Z_{II} - Z_y} \cdot p e^{j\theta}}{1 + \frac{Z'_{II}}{Z'_{III}} \cdot p e^{j\theta}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{Z'_{III} (Z_{II} + Z_y)}{\Sigma Z_1} \right] i_{K1}. \end{aligned}$$

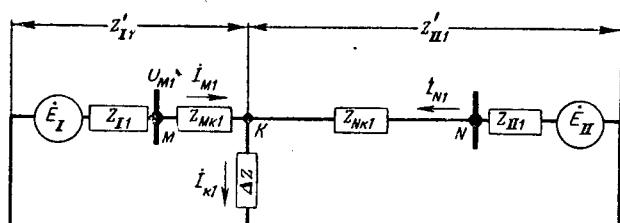


Рис. 4. Расчетная схема замещения электропередачи при коротких замыканиях.

Так как $Z_\Sigma - Z_{12} = \Delta Z$ и $Z'_{II} - Z_{II} = Z_{MK1}$, где Z_{MK1} — сопротивление поврежденного участка защищаемой линии, то окончательно получим выражение (7).

Литература

1. А. М. Федосеев. Релейная защита электрических сетей. Госэнергоиздат, 1952.
2. Г. И. Атабеков. Общие принципы выполнения дистанционных омметров. Электричество, № 1, 1950.
3. E. Clarke, Impedances Seen by Relay during Power Swings with and without Fault. Tr. AIEE, т. 64, 1953.
4. П. К. Фейст. Исследование работы дистанционных реле методом круговых диаграмм в комплексной плоскости полных сопротивлений. Труды ЦНИЭЛ, вып. 1. Госэнергоиздат, 1953.

Эффект близости в прямоугольных шинах

Кандидат техн. наук Ю. Л. Мукосеев

Горький, Электропроект

В прямоугольных шинах уже при промышленной частоте 50 ... 60 Гц имеет место значительная неравномерность распределения плотности тока по сечению, т. е. амплитуды токов для различных нитей тока различны. В однофазных цепях эта неравномерность обусловливается поверхностным эффектом и эффектом близости, а в трехфазных цепях — дополнительно еще эффектом переноса мощности.

Следует отметить, что отличаются между собой не только амплитуды, но и фазы токов различных нитей. Такое несовпадение фаз является основной причиной увеличения активного сопротивления проводников по сравнению с сопротивлением при постоянном токе, что с этой точки зрения имеет более существенное значение, чем неравномерное распределение плотности тока по сечению [Л. 1].

В общем случае величина активного сопротивления проводника определяется из следующей зависимости [Л. 2]:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{\int_{F} \delta^2 dF}{\left(\int_{F} \delta \cos \varphi dF \right)^2 + \left(\int_{F} \delta \sin \varphi dF \right)^2} F,$$

где r — активное сопротивление проводника;
 r_0 — сопротивление проводника при постоянном токе;
 δ — плотность тока в нити;
 φ — фаза тока в нити;
 F — сечение проводника.

Аналитическое решение этого уравнения соединено с большими затруднениями. Наиболее строгое его решение применительно к прямоугольным шинам дано В. М. Алехиным [Л. 3] в виде достаточно сложной комбинации бесселевых функций нулевого и первого порядка. В. М. Алехин показал, что максимум плотности тока находится в углах шины, а не на середине ее узкой стороны, как утверждал Швенкхаген [Л. 4], не учитывавший сдвига фаз в отдельных нитях тока. Из положений В. М. Алехина следует существенный вывод: при любых комбинациях взаимного расположения шин как широкой, так и узкой стороной друг к другу максимум плотности тока всегда будет в углах шин.

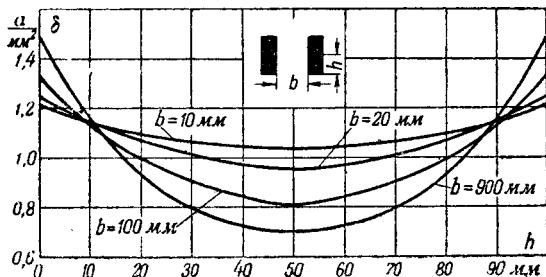


Рис. 1.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

В настоящей статье даются результаты экспериментального исследования эффекта близости в прямоугольных шинах. Эти исследования производились на алюминиевых шинах размером $100 \times 10 \text{ mm}^2$ при частоте 50 Гц и при изменении тока вшине в пределах 600 ... 1 600 а. Измерения производились при помощи компенсатора Л. Р. Неймана. Основной целью измерений являлось получение комплексного значения максимальной плотности тока вшине, по которой можно определить величину полного внутреннего сопротивления [Л. 5].

Опыт показал, что для получения надежных расчетных данных недостаточно измерять максимальную плотность тока в углах шин, так как такие измерения технически затруднительны и могут дать значительную ошибку. Путем измерения плотности тока в других точках поверхности шин (через каждые 10 мм) и построения эпюры изменения плотности тока по высоте шины эта ошибка может быть устранена. Эти эпюры, кроме того, позволяют дать качественную оценку эффекта близости при изменении расстояния между шинами и при различном их расположении.

В результате проведенных измерений было установлено, что при сохранении неизменности расположения шин плотность тока в каждой точке поверхности шины пропорциональна току, а фазы токов отдельных нитей остаются постоянными. Это обстоятельство позволило строить эпюры только для одного значения тока, который был принят равным 1 000 а, что соответствует средней плотности тока вшине $1 \text{ а}/\text{мм}^2$. Такие эпюры строились при различных расстояниях между шинами и для различного расположения шин (рис. 1 и 2). Было установлено, что при расстояниях между шинами, больших чем 0,9 м (шины широкой стороной друг к другу) и 1,38 м (шины узкой стороной друг к другу), взаимное влияние шин становилось малым. Условно можно считать, что при любом расположении шины являются уединенными, если расстояние между ними более 3 м.

Назовем коэффициентом неравномерности распределения плотности тока по сечению шины отношение активного сопротивления шины к ее сопротивлению при постоянном токе:

$$k_H = \frac{r}{r_0}.$$

Для уединенной шины этот коэффициент равен коэффициенту поверхностного эффекта:

$$k_H = k_P.$$

По величине максимальной плотности тока вшине, определенной экспериментально, было найдено, что $k_H = 1,175$.

Для однофазных систем при двух и более шинах неравномерность распределения плотности тока по сечению шины определяется не только

поверхностным эффектом, но и эффектом близости:

$$k_H = k_B k_B,$$

где k_B — коэффициент эффекта близости.

Поверхностный эффект и эффект близости существенно влияют также на величину обеих составляющих индуктивного сопротивления шин: сопротивления x_1 , обусловленного полем внутри шины, и сопротивления x_2 , определяющееся полем вне шины [Л. 6].

Влияние эффекта близости на величину внутреннего индуктивного сопротивления шины может быть оценено коэффициентом k_{Bi} — отношением внутреннего индуктивного сопротивления шины, подверженной влиянию соседних шин, к внутреннему индуктивному сопротивлению уединенной шины.

Для различных расстояний между шинами были определены значения максимальной плотности тока, по которым вычислялись значения r и x_1 .

По этим значениям и величине полного сопротивления $z = U/I$ легко определить общие и внешние индуктивные сопротивления, а также найти значения k_H , k_B и k_{Bi} . Зависимости этих величин от расстояния между шинами при различном направлении токов в шинах приведены на рис. 3 и 4. Там же для сравнения пунктиром указаны значения индуктивных сопротивлений, определенные по формулам Шурига и Л. А. Цейтлина.

Анализируя полученные результаты, приходим к следующим выводам. Эффект близости оказывается весьма заметно на распределении плотности тока при изменении расстояния между шинами. При расположении шин широкой стороной друг к другу плотность тока распределяется по высоте шины тем ровнее, чем ближе шина с током обратного направления. Коэффициент эффекта близости получается меньше единицы и вследствие этого коэффициент k_H стремится к единице, хотя плотность тока при этом получается не одинаковая с разных сторон шины: по мере сближения шин нити тока перетягиваются на их внутренние стороны.

Картина перетягивания нитей тока при сближении шин очень ярко получается при расположении шин узкой стороной друг к другу, однако в этом случае при сближении шин резко возрастает неравномерность распределения плотности тока по высоте шины, поскольку коэффициент эффекта близости оказывается больше единицы.

Существующие методы расчета индуктивностей шин основаны на определении среднеквадратичных расстояний между ними в предположении постоянства плотности тока по сечению шин или по периметру их поперечного сечения [Л. 7 и 8]. Из рис. 3 видно, что кривые общего индуктивного сопротивления, полученные в результате расчета и эксперимента, пересекаются в двух точках, что позволяет считать возможным пользование расчетными формулами для случая расположения

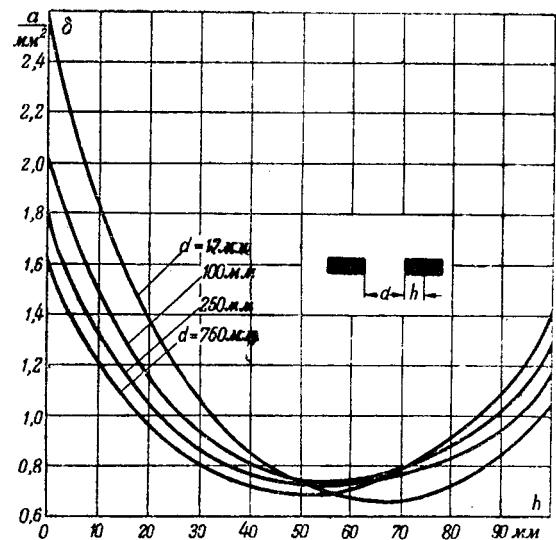


Рис. 2.

шин широкой стороной друг к другу при расстояниях между шинами, равными 10 ... 40 мм и 400 ... 600 мм. При расположении шин узкой стороной друг к другу расчетные значения общих индуктивных сопротивлений оказываются на 20 ... 25% меньше экспериментальных (рис. 4).

Из рис. 4 и 5 также видно, что величина внутреннего реактивного сопротивления при расстояниях между шинами в пределах 10 ... 40 мм составляет около 40% от общего индуктивного сопротивления, а с увеличением расстояния уменьшается до 10% и менее.

Известно, что неравномерность распределения плотности тока по сечению шины уменьшается с увеличением ее нагрева. Результаты эксперимента показали, что при увеличении температуры шины от 20 до 70°C коэффициент k_H уменьшился всего на 4%, в то время как сопротивление x_1 увеличилось на 15%.

Наиболее рациональным расположением шин в однофазном шинопроводе следует считать такое расположение, когда распределение плотности тока по высоте шины является наиболее равномерным, что имеет место в тех случаях, когда

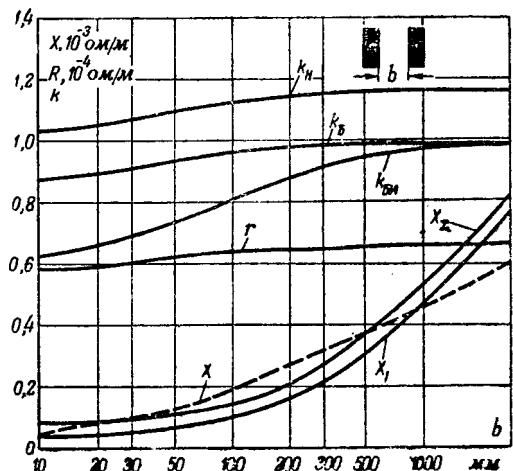


Рис. 3.

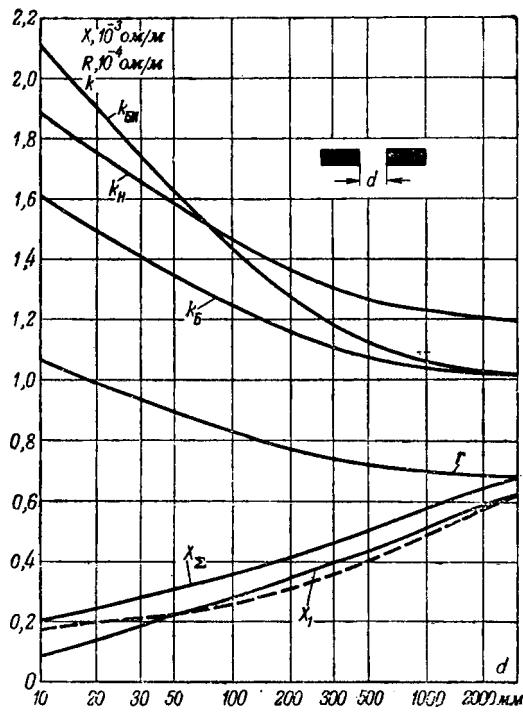


Рис. 4.

$k_H < 1$. В соответствии с этим располагать шины узкой стороной друг к другу нелесообразно.

Если при различном направлении тока в шинах необходимо брать несколько шин на фазу, то следует применять шихтованное расположение шин, т. е. чередовать шины с прямыми и обратными токами по схеме рис. 5, а. Учитывая, что при расположении шин узкой стороной друг к другу $k_F > 1$, следует считать неприемлемой схему, приведенную на рис. 5, б. Более целесообразно шины с током одинакового направления поставить друг над другом (рис. 5, в), в результате чего распределение плотности тока по высоте шин будет более равномерным.

Были также произведены измерения для случая, когда направления тока в шинах одинаковые. Для двух шин, расположенных широкой стороной друг к другу при расстоянии между ними, равном 18 мм, оказалось, что

$$k_H = 1,34 \text{ и } k_B = \frac{1,34}{1,175} = 1,14.$$

Если же шины расположены узкой стороной друг к другу, то $k_B < 1$ и неравномерность распределения тока по сечению шины оказывается меньше, чем для такого же расположения шин, но при разном направлении тока в них.

Эффект близости для трех шин размером $100 \times 10 \text{ мм}^2$, несущих ток одного направления, был исследован Швенкхагеном [Л. 3], который показал, что векторы токов в шинах имеют направление, указанное на рис. 6, а, а ток в среднейшине получается значительно меньше, чем в крайних, в результате чего общий коэффициент неравномерности при расстоянии между двумя

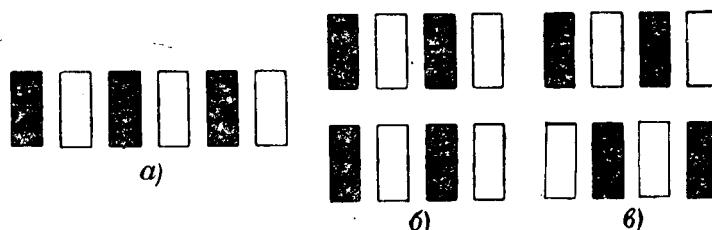


Рис. 5.

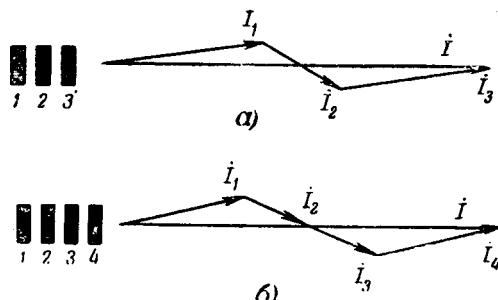


Рис. 6.

соседними шинами 10 мм оказывается равным 1,6.

Направление векторов тока для четырех алюминиевых шин размером $110 \times 10 \text{ мм}^2$ при том же расстоянии между шинами указано на рис. 6, б. В этом случае общий коэффициент неравномерности получился равным 2,03 [Л. 9].

Из рассмотрения векторных диаграмм токов для трех и четырех шин в пакете видно, что увеличение числа шин в пакете свыше трех является нерациональным, так как ток во внутренних шинах значительно меньше тока в наружных шинах. Четыре шины следует располагать по сторонам квадрата, как было предложено еще Швенкхагеном, и тогда общий коэффициент неравномерности снижается до 1,25.

Литература

1. В. Ю. Ломоносов. Электромагнитное поле двухпроводной линии. Сборник трудов Ивановского энергетического института им. В. И. Ленина, вып. IV, Госэнергоиздат, 1951.
2. F. Wenz. Oberflächenverdrängung und Stromverteilung in Leitern bei Hochfrequenz. E. u. M., № 12, 1950.
3. В. М. Алехин. Поверхностный эффект в проводе прямоугольного сечения. Труды Новочеркасского политехнического института, т. 26, стр. 316—320, 1955.
4. H. Schwenkhagen. Untersuchung über Stromverdrängung in rechteckigen Querschnitten, A. f. E., т. 6, ч. 17, 1927.
5. Л. Р. Нейман. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. Госэнергоиздат, 1950.
6. Физические основы электротехники. Под. ред. К. М. Поливанова. Госэнергоиздат, 1950.
7. Г. Л. Калантаров и Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Госэнергоиздат, 1955.
8. C. R. Schuring. Engineering Calculation of Inductance and Reactance for Rectangular Bar Conductors, CER, № 5, 1933.
9. Ю. Л. Мукосеев. Многоамперные шинопроводы трехфазного тока. Труды научно-технического совещания по электроснабжению промышленных предприятий. Госэнергоиздат, 1956.

[1. 2.1956]

Расчет гашения обратного напряжения в импульсной схеме

Инж. И. П. ЧУЧАЛИН, доц., В. М. РАЗИН

Томский политехнический институт

В схемах питания генераторов импульсных магнитных полей для создания импульса тока в обмотках электромагнита обычно используется разряд предварительно заряженной батареи конденсаторов. В качестве коммутирующих элементов применяются газоразрядные приборы: игнитроны и тиатроны. Отрицательное напряжение, появляющееся на батарее конденсаторов к концу ее разряда, скачком прикладывается к электродам коммутирующего прибора в момент его запирания и может вызвать обратное зажигание.

При импульсном режиме работы с достаточно большой скважностью обратное напряжение, появляющееся на коммутирующем приборе, можно уменьшить или полностью предотвратить при помощи дополнительного коммутирующего прибора или вентиля. Дополнительный коммутирующий прибор или вентиль, соединенный последовательно с активным сопротивлением, включается параллельно конденсаторной батарее (рис. 1).

Если дополнительный коммутирующий прибор 2 поджигать в момент, когда ток i_L проходит через максимальное значение или несколько позже, то в зависимости от величины сопротивления R обратное напряжение на коммутирующем приборе 1 будет полностью или частично погашено.

Конденсатор емкостью C предварительно заряжен до напряжения U_{m0} . В момент времени $t=0$ включается коммутирующий прибор 1, и конденсатор начинает разряжаться через r и L , при этом изменения тока i_L и напряжения U_C определяются выражениями

$$i_L = i_C = \frac{U_{m0}}{\omega' L} \sin \omega' t e^{-\delta t}; \quad (1)$$

$$U_C = \frac{U_{m0}}{\omega' V LC} \sin \left(\omega' t - \frac{\pi}{2} - \xi \right) e^{-\delta t}, \quad (2)$$

где $\delta = \frac{r}{2L}$;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — угловая частота собственных затухающих колебаний разрядного контура;

$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — угловая частота собственных затухающих колебаний разрядного контура;

$$\xi = \arctg \frac{\delta}{\omega'}.$$

В момент времени, когда напряжение U_C равно нулю, включается коммутирующий прибор 2. Найдем величину тока I'_L в этот момент времени. Для этого приравняем нулю выражение (2), найдем время t , по прошествии которого U_C уменьшится до нуля:

$$t = \frac{\xi + \frac{\pi}{2}}{\omega'}. \quad (3)$$

Подставим полученное выражение в (1) и найдем значение тока I'_L в момент включения коммутирующего прибора 2:

$$I'_L + \frac{U_{m0}}{\omega' L} \sin \left(\xi + \frac{\pi}{2} \right) e^{-\frac{\delta}{\omega'} \left(\xi + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (4)$$

Далее нас будут интересовать процессы, происходящие в цепи после включения коммутирующего прибора 2.

Исходные уравнения в этом случае будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{C} \int i_C dt + L \frac{di_L}{dt} + ri_L &= 0; \\ i_R + L \frac{di_L}{dt} + ri_L &= 0; \\ i_L &= i_R + i_C. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из уравнений системы (5) после некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right) \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right) i_L = 0. \quad (6)$$

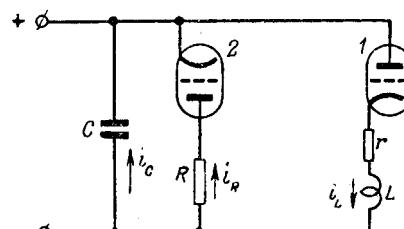


Рис. 1.

Характер происходящих в цепи процессов зависит от соотношения параметров r , R , L и C и в конечном счете определяется тем, будут ли корни характеристического уравнения вещественными или комплексными. Условие апериодического разряда

$$\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2 \geq \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right).$$

В этом случае появление обратного напряжения после импульса тока полностью предотвращается.

Перейдем к рассмотрению процессов, происходящих в разрядном контуре при

$$\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2 < \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right).$$

В этом случае корни характеристического уравнения будут комплексные:

$$p_1 = \alpha + \beta i;$$

$$p_2 = \alpha - \beta i,$$

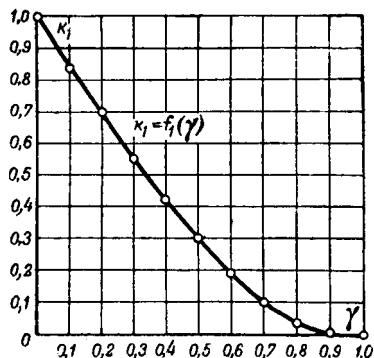


Рис. 2.

где

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right);$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2}.$$

Решение дифференциального уравнения (6) будет иметь вид:

$$i_L = (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t) e^{\alpha t}. \quad (7)$$

Определяя из начальных условий $i_L(t=0) = C_1 + C_2 = I'_L$, $U_C(t=0) = 0$ постоянные C_1 и C_2 , получим:

$$i_L = I'_L \left[\cos \beta t - \left(\frac{r+\alpha L}{\beta L} \right) \sin \beta t \right] e^{\alpha t}. \quad (8)$$

Напряжение на обкладках конденсатора

$$U_C = I'_L L \beta \left[1 + \left(\frac{r+\alpha L}{\beta L} \right)^2 \right] \sin \beta t \cdot e^{\alpha t}. \quad (9)$$

К моменту прохождения током нулевого значения конденсатор не успевает полностью разрядиться и оставшееся на нем отрицательное напряжение прикладывается к коммутирующему прибору 1.

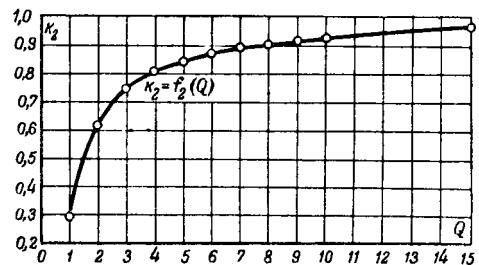
Найдем величину обратного напряжения. Для этого приравняем нулю выражение (8) и найдем момент времени t , когда ток i_L проходит через нулевое значение:

$$t = \frac{1}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r+\alpha L} \right| \right)^*.$$

Подставим найденное значение t в выражение (9) и, учитывая (4), найдем отношение обратного напряжения к начальному напряжению на электродах коммутирующего прибора 1:

$$\frac{U_{обp}}{U_{m0}} = e^{\frac{\alpha}{\beta} \left(\pi - \operatorname{arctg} \left| \frac{\beta L}{r+\alpha L} \right| \right)} - \frac{\delta}{\omega'} \left(\operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega'} + \frac{\pi}{2} \right). \quad (10)$$

Учитывая, что $\delta = \frac{r}{2L}$, $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$, добродетельность разрядного контура $Q = \frac{\omega_0 L}{r}$, $\frac{\beta L}{r+\alpha L} \approx \frac{\beta}{\alpha}$,

Рис. 3. Зависимость коэффициента k .

так как в практических схемах $r \ll \alpha L$, и вводя обозначение

$$\gamma = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{RC} + \frac{r}{L} \right)^2}{\frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r}{R} \right)}} = \sqrt{\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2}}, \quad (11)$$

приведем формулу (10) к виду:

$$\frac{U_{обp}}{U_{m0}} = k_1 k_2, \quad (12)$$

где

$$k_1 = e^{-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} (\pi - \arccos \gamma)}; \quad (13)$$

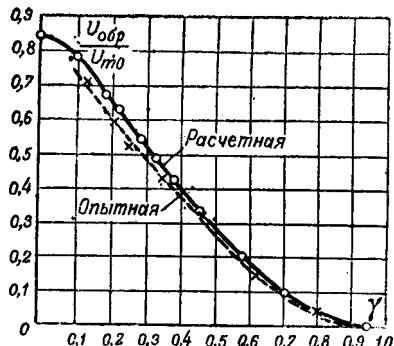
$$k_2 = e^{-\frac{1}{\sqrt{4Q^2-1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{4Q^2-1}} + \frac{\pi}{2} \right)}. \quad (14)$$

Зависимость $k_1 = f_1(\gamma)$ для некоторых практически возможных значений γ приведена на рис. 2. На рис. 3 представлена зависимость $k_2 = f_2(Q)$.

Расчет сопротивления R на заданную величину отношения $\frac{U_{обp}}{U_{m0}}$ можно произвести следующим образом:

1. Зная добродетельность разрядного контура, определяем коэффициент k_2 по графику $k_2 = f_2(Q)$ (рис. 3).

2. Выбрав отношение $\frac{U_{обp}}{U_{m0}}$, определяем коэффициент k_1 по формуле $k_1 = \frac{U_{обp}}{U_{m0}} \cdot \frac{1}{k_2}$.

Рис. 4. Расчетная и опытная кривые зависимости при $Q = 11$.

* Прямые скобки означают абсолютное значение дроби.

Определение потерь в конденсаторах при импульсном режиме

Кандидат техн. наук Л. З. ГОГОЛИЦЫН

Ленинградский электротехнический институт
им. Ульянова (Ленина)

Принцип работы импульсных генераторов заключается в медленном накоплении энергии в течение длительного интервала времени между импульсами и быстрой отдаче накопленной энергии за весьма короткий промежуток времени. Основным элементом импульсного генератора (с емкостным накопителем энергии) является электрический конденсатор.

Величина потерь энергии, выделяемых в виде тепла в конденсаторе при заданном режиме работы, представляет одну из главных характеристик конденсатора при тепловом расчете и влияет на выбор: диэлектрика; материала, формы и схемы соединения обкладок конденсатора; системы охлаждения; технологии изготовления отдельных элементов конденсатора и т. д. Для готовых конденсаторов расчет потерь будет в большей степени определять пригодность конденсатора для заданного режима работы.

Существующий метод «эквивалентной частоты» для определения потерь в диэлектрике конденсатора на импульсах основан на замене отдельных участков импульса «отрезками» синусоидального напряжения [Л. 1]. Нарастающий и спадающий участки импульса заменяются синусоидальным напряжением с периодом, в 4 раза превышающим длительность нарастания или спада, и с максимальной амплитудой, равной максимальному значению импульса. Плоский участок на вершине импульса заменяется постоянным напряжением, по величине равным максимальному значению импульса. Этот метод является приближенным, дает сравнительно большую погрешность и не предусматривает определение потерь в обкладках конденсатора.

3. Зная k_1 , по графику $k_1 = f_1(\gamma)$ (рис. 2) определяем γ .

4. И окончательно, зная γ , подсчитаем величину сопротивления R по формуле:

$$R = \frac{1}{\frac{C}{4\gamma^2 - r^2} \times \left\{ r(1 - 2\gamma^2) + \gamma \sqrt{2 \left[(2\gamma^2 - 1)r^2 + 2\frac{L}{C} \right]} \right\}}. \quad (15)$$

Формула (15) получена из выражения (11). Рассеиваемая в сопротивлении R мощность может быть подсчитана с некоторым расчетным запасом из приближенного выражения

$$P = f \frac{CU_{m0}^2}{2}, \quad (16)$$

где f — частота повторения импульсов.

Предлагаемый ниже метод определения потерь в диэлектрике основан на применении принципа наложения. Несинусоидальное напряжение, действующее на конденсатор, представляется при помощи ряда Фурье в виде суммы гармонических составляющих, и потери определяются для каждой гармоники по известной формуле для синусоидального напряжения.

Исходя из принципа наложения, можно сделать следующие предположения:

1. Постоянная составляющая A_0 разложения в ряд Фурье не участвует в создании потерь (пренебрегая сквозной проводимостью и влиянием постоянной составляющей на величину угла диэлектрических потерь).

2. С изменением приложенного напряжения потери должны изменяться по квадратичному закону.

3. Последовательности импульсов, отличающиеся по форме, но имеющие одинаковые гармонические составляющие, создают в диэлектрике одинаковые потери.

Экспериментальные данные подтверждают: независимость потерь в диэлектрике от постоянной составляющей разложения в ряд, квадратичную зависимость потерь с изменением напряжения и одинаковые потери для последовательностей импульсов, различных по форме, но имеющих одинаковые гармонические составляющие.

В тех случаях, когда несинусоидальная форма напряжения представляет собой последовательное чередование зарядов и разрядов конденсатора, длительность которых одного порядка, ряд Фурье будет быстросходящимся и суммирование потерь от всех, имеющих практическое значение,

Последнее уравнение написано в предположении, что вся энергия потерь при импульсном процессе рассеивается только в сопротивлении R . В действительности часть энергии рассеивается в других элементах разрядного контура, и фактическая мощность рассеяния в сопротивлении R будет меньше величины, подсчитанной из выражения (16).

Исследования гашения обратного напряжения проводились в схеме с применением в качестве коммутирующих приборов игнитронов И-100/1000. Сравнение расчетных кривых переходного процесса для частных случаев с полученными из опыта указывает на удовлетворительную точность теоретических расчетов.

На рис. 4 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости $\frac{U_{obp}}{U_{m0}} = f(\gamma)$ для частного случая $Q = 11$. Хорошее совпадение кривых подтверждает справедливость полученных выше расчетных соотношений.

гармонических составляющих не вызовет затруднений.

При формировании мощных импульсов используется возможность накопления энергии конденсатором от источника малой мощности за длительный промежуток времени и отдача запасенной энергии в течение малого промежутка времени приемнику этой энергии. В этом случае длительность заряда значительно превышает длительность разряда конденсатора.

При разложении в ряд такой последовательности зарядов и разрядов коэффициенты ряда Фурье имеют плохую сходимость и суммирование потерь от большого числа членов разложения будет сложным и практически трудно выполнимым. Кроме того, нет возможности оценить потери раздельно за время заряда и разряда конденсатора. Раздельное определение потерь может быть выполнено только в том случае, если интересующие нас процессы успевают закончиться в течение длительности данной части импульса и к началу действия следующей части действие предыдущей уже прекратилось.

Какова же длительность процессов, связанных с потерями в диэлектрике, за время одиночного процесса — заряда или разряда конденсатора?

Всякое изменение напряжения, подаваемое на диэлектрик, связано с установлением поляризационных процессов. Время установления поляризации, обусловливающей потери, будет зависеть как от свойств диэлектрика, так и от скорости изменения напряжения. Завершение поляризационных процессов может быть определено по окончанию изменения напряжения. Поэтому длительность одиночного процесса будет измеряться временем между двумя установившимися значениями напряжения. В этом случае действие одинаковых одиночных зарядов и разрядов, разделенных длительными паузами, может рассматриваться как действие непрерывной последовательности таких зарядов и разрядов, исключая из рассмотрения паузы между ними и учитывая скважность между ними.

Если последовательность импульсов состоит из длительных зарядов и кратковременных разрядов конденсатора, то такая последовательность может быть представлена в виде двух самостоятельных последовательностей, составленных из одинаковых по длительности процессов.

Однако исследование последовательности только одних зарядов или разрядов лишено физического смысла и приводит к разрывным функциям. Поэтому, полагая, что потери в диэлектрике от воздействия одиночного заряда равносочлены потерям от действия одиночного разряда конденсатора такой же амплитуды, формы и длительности, как и заряд (как имеющих одинаковые гармонические составляющие), можно каждую последовательность одних только зарядов или разрядов заменить непрерывным чередованием одинаковых зарядов и разрядов. Составленные таким образом последовательности представляются быстротходящимся рядом и определение потерь, как уже упоминалось, не вызовет затруднений.

Как правило, форма напряжения при заряде конденсатора представляет собой или экспоненту (заряд через активное сопротивление), или форму, близкую к синусоидальной (резонансный заряд через индуктивность). Простота заряда через активное сопротивление или экономичность в случае заряда через индуктивное сопротивление почти целиком исключают необходимость в каких-либо других формах напряжения длительного заряда конденсатора.

Форма напряжения при кратковременном разряде накопительного конденсатора определяется формой импульса на выходе импульсного генератора и, как правило, представляет собой монотонно убывающую функцию.

Колебательный характер разряда конденсатора также представляется в виде самостоятельной последовательности, для которой определяются коэффициенты ряда Фурье. Большинство имеющихся практическое применение форм изменения напряжения на конденсаторе выражается простыми функциями и для составленных последовательностей коэффициенты ряда Фурье могут быть найдены в математических и электротехнических справочниках.

Ошибка при определении длительности импульса сравнительно мало влияет на погрешность при вычислении потерь мощности в диэлектрике конденсатора.

Действительно,

$$P = U^2 w C \operatorname{tg} \delta \frac{1}{Q},$$

$$\text{где } w = \frac{2\pi}{2\tau_u}; \quad Q = \frac{T_u}{\tau_u};$$

$$P = U^2 2\pi \cdot f_u C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где f_u — частота следования импульсов;

$\operatorname{tg} \delta$ — угол диэлектрических потерь, измеренный на частоте $f = \frac{1}{2\tau_u}$.

Изменение длительности импульса будет отражаться практически только на величине угла диэлектрических потерь. Если выбранную длительность импульса изменить даже в 2 раза, это изменит величину угла потерь не более чем на 15 ... 20 %.

Метод разложения в ряд при определении потерь в диэлектрике дает меньшую погрешность, чем существующий метод «эквивалентной частоты».

Величина активного сопротивления обкладок, которая зависит от материала, размеров и схемы соединения обкладок, определяет величину потерь в обкладках конденсатора. При работе на выпрямленном напряжении и переменном напряжении низкой частоты ток, протекающий через конденсатор, мал и поэтому даже в конденсаторах с большим активным сопротивлением обкладок потери будут незначительны.

В установках высокой частоты через конденсатор протекают большие токи, однако для высокочастотных схем, как правило, требуется конденсаторы сравнительно небольшой емкости, а это облегчает изготовление конденсаторов с малым сопротивлением обкладок.

В высоковольтных импульсных генераторах, формирующих кратковременные импульсы большой мощности, токи, протекающие в цепи разряда конденсатора, особенно большие. Емкость же импульсных конденсаторов, а значит, и сопротивление обкладок во много раз превосходят емкость и соответственно сопротивление обкладок высокочастотных конденсаторов. Поэтому, несмотря на кратковременность импульсных токов при повышенной частоте следования, потери в импульсных конденсаторах могут быть очень большими и даже превосходить потери в диэлектрике конденсатора.

Необходимость определения потерь в обкладках импульсных конденсаторов совершенно очевидна, однако методов определения потерь пока еще нет. Эти потери можно определять по известной величине эквивалентного сопротивления обкладок и форме тока, протекающего по обкладкам конденсатора, которая определяется по параметрам схемы генератора или экспериментально при помощи катодного осциллографа. Несинусоидальная форма тока представляется рядом Фурье как сумма отдельных гармонических составляющих.

В отличие от напряжения импульсы тока при заряде и разряде конденсатора будут обеих полярностей и при разложении в ряд такой последовательности постоянная составляющая разложения в ряд равна нулю.

Учитывая скважность кратковременных импульсов, потери будут равны:

$$P_{обкл} = \frac{R_{обкл}}{Q} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2,$$

где

$$\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots;$$

Q — скважность.

Если нагрузка представляет собой активное сопротивление и можно пренебречь активным сопротивлением элементов схемы разряда конденсатора (формирующий элемент, коммутирующий прибор, соединительные провода), то энергия заряженного конденсатора будет выделена на сопротивлениях нагрузки и обкладок конденсатора пропорционально их величине:

$$P_{обкл} = \frac{U_m^2 C}{2} f_0 \frac{R_{обкл}}{R_{наг} + R_{обкл}},$$

где f_0 — частота следования разрядов.

Эквивалентное сопротивление обкладок может быть определено по формулам [Л. 2] и для наиболее распространенных форм обкладок конденсатора приводится в таблице.

Особенно большую роль играет величина активного сопротивления обкладок конденсатора при формировании мощных кратковременных импульсов с повышенной частотой следования. Активное сопротивление нагрузки импульсных генераторов, формирующих такие импульсы, соизмеримо с сопротивлением обкладок конденсатора, и потери мощности в обкладках могут оказаться очень большими.

Для получения мощных импульсов малой длительности должны применяться главным образом конденсаторы: многопластинчатые и с безиндукционной намоткой обкладок конденсатора.

Окончательный выбор величины сопротивления обкладок при расчете и конструировании импульсных конденсаторов будет определяться, исходя из технических требований, технологии изготовления, конструктивных и экономических сопротивлений.

Приложение. Примерные расчеты. В качестве примерных расчетов рассматриваются наиболее общие случаи работы конденсатора в импульсном режиме.

Пример 1. Бумажный конденсатор с цилиндрической намоткой обкладок (с выводами в средней части) емкостью $C = 0,25 \text{ мкФ}$ включался в схему импульсного генератора в качестве емкостного накопителя энергии. Эквивалентное сопротивление обкладок конденсатора (определенное по формуле 2 в таблице) составляет:

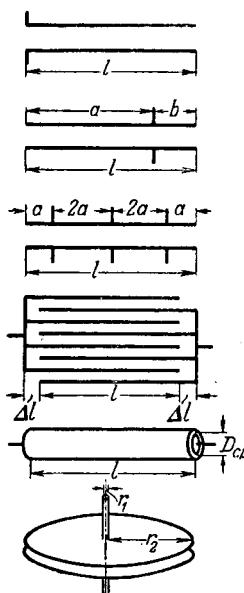
$$R_{обкл} = 0,17 \text{ ом}.$$

Конденсатор заряжался через индуктивное сопротивление $L = 30 \text{ гн}$ (заряд, близкий к резонансному) до $U_m = 4,4 \text{ кВ}$ и разряжался на активное сопротивление $R_{разр} = 100 \text{ ом}$. Частота замыканий коммутирующего прибора $f_0 = 50$.

Напряжение на конденсаторе будет представлять последовательность длительных синусоидальных зарядов и кратковременных экспоненциальных разрядов (рис. 1, а). Для определения потерь в диэлектрике конденсатора такая последовательность зарядов и разрядов представляется в виде двух самостоятельных последовательностей, состоящих из длительных, близких к синусоидальной форме, зарядов и разрядов (рис. 1, б) и кратковременных экспоненциальных зарядов и разрядов конденсатора (рис. 1, в). На рис. 1 масштаб времени заряда и разряда

Схема соединения обкладок конденсатора

Формула эквивалентного сопротивления обкладок конденсатора



$$R = \frac{2}{3} \rho \frac{l}{S}$$

$$R = \frac{2}{3} \rho \frac{l}{S} \frac{a^3 + b^3}{(a + b)^3}$$

$$R = \frac{2}{3} \rho \frac{l}{S} \left(\frac{1}{2k}\right)^2$$

k — количество пар выводов

$$R = \frac{2}{3} \rho \frac{(l + 3\Delta l)}{S} \frac{(2N - 3)}{(N - 1)^2}$$

N — число пластин

$$R = \frac{2}{3} \rho \frac{l}{\pi d D_{cp}}$$

d — толщина; D_{cp} — средний диаметр

$$R = \frac{\rho}{2\pi d} \left[\left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1^2 - 3r_2^2}{4(r_2^2 - r_1^2)^2} \right]$$

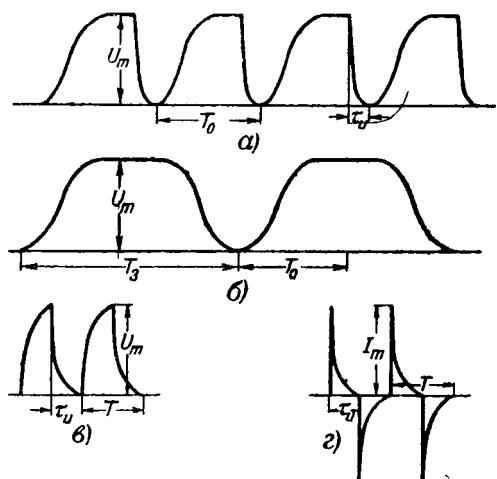


Рис. 1.

для наглядности не соблюден. Длительность заряда в сотни раз превосходит длительность разряда конденсатора.

Потери при заряде конденсатора определяются по формуле для синусоидального напряжения. Постоянная составляющая $A_0 = \frac{U_m}{2}$ не учитывается. Длительность одиночного, близкого к синусоидальной форме, заряда $T_0 = \frac{1}{50}$ сек (длительностью разряда пренебрегаем). Полный период последовательности, составленной из таких зарядов и разрядов, $T_3 = \frac{1}{25}$ сек.

Угол диэлектрических потерь конденсатора, измеренный на частоте $f = 25$, равен $\operatorname{tg} \delta = 0,012$:

$$P_{\text{зар}} = \left(\frac{U_m}{2\sqrt{2}} \right)^2 wC \operatorname{tg} \delta,$$

$$P_{\text{зар}} = \frac{(2,2)^2}{2} 10^6 \cdot 6,28 \cdot 25 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0,012 = 1,14 \text{ вт.}$$

Потери при разряде определяются после вычисления коэффициентов разложения в ряд Фурье:

$$A_n = \frac{2}{T_p} \int_0^{T/2} U \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \sin n\omega t dt +$$

$$+ \frac{2}{T_p} \int_{T/2}^T U_m e^{-\frac{(t-\frac{T}{2})}{RC}} \cdot \sin n\omega t dt;$$

$$B_n = \frac{2}{T_p} \int_0^{T/2} U \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \cos n\omega t dt +$$

$$+ \frac{2}{T_p} \int_{T/2}^T U_m e^{-\frac{(t-\frac{T}{2})}{RC}} \cos n\omega t dt.$$

Принимая $T_p = 6RC$, получим:

$$U_0 = \frac{U_m}{2}; \quad U_1 = 0,44U_m; \quad U_3 = 0,066U_m; \quad U_5 = 0,025U_m.$$

Практически можно ограничиться одной первой гармоникой:

$$P_{\text{разр}} = \frac{U_1^2}{2} 2\pi \frac{1}{6RC} C \operatorname{tg} \delta \frac{3RC}{T_0}.$$

Угол потерь, измеренный на частоте $\frac{1}{6RC}$, составляет $\operatorname{tg} \delta = 0,017$:

$$P_{\text{разр}} = \frac{(0,44 \cdot 4,4)^2}{2} 10^6 \cdot 6,28 \cdot \frac{50}{2} 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0,017 = 1,25 \text{ вт.}$$

Потери в обкладках конденсатора в течение длительного заряда через большое сопротивление малы, и поэтому интерес представляют только потери от кратковременного разряда.

Представим последовательность импульсов тока (рис. 1,2) рядом Фурье:

$$I_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_m e^{-\frac{t}{(R_p+R_0)C}} \sin n\omega t dt;$$

$$I_n = \frac{4I_m}{\left[\left(\frac{1}{(R_p+R_0)C} \right)^2 + (nk)^2 \right]^{1/2}} \times$$

$$\times \left[1 - (-1)^n e^{-\frac{T}{2(R_p+R_0)C}} \right].$$

Принимая $T = 6RC$, получим:

$$I_1 = 0,36I_m; \quad I_2 = 0,28I_m; \quad I_3 = 0,22I_m;$$

$$I_4 = 0,16I_m; \quad I_5 = 0,13I_m; \quad I_6 = 0,11I_m;$$

$$I_m = \frac{U_m}{(R_p + R_0)};$$

$$P_n = I_n^2 R_{\text{обкл}} \frac{1}{Q} = I_n^2 R_{\text{обкл}} \frac{3RC}{T_0};$$

$$P_1 = 0,08; \quad P_2 = 0,05; \quad P_3 = 0,03; \quad P_4 = 0,016;$$

$$P_5 = 0,01; \quad P_6 = 0,006.$$

Общие потери в обкладках конденсатора равны:

$$P_{\text{обкл}} = 0,192 \text{ вт.}$$

Так как нагрузка представляет собой активное сопротивление, то потери можно определить также по формуле

$$P_{\text{обкл}} = \frac{CU_m^2}{2} f_0 \frac{R_0}{R_p + R_0};$$

$$P_{\text{обкл}} = \frac{0,25 \cdot 10^{-6} (4,4)^2 10^6}{2} 50 \frac{0,17}{100 + 0,17} = 0,206 \text{ вт.}$$

Как видно, оба метода дают примерно одинаковый результат. Суммарные потери в диэлектрике и обкладках конденсатора равны:

$$P = 2,5 \text{ вт.}$$

Потери, определенные для данного примера калориметрическим методом, составляют: $P_{\text{кал}} = 2,0 \text{ вт}$, а методом эквивалентной частоты: $P_{\text{экв}} = 8,1 \text{ вт}$.

Потери, вычисленные по предлагаемому методу разложения в ряд, значительно ближе к потерям, определенным калориметрическим методом, чем потери, определенные по методу эквивалентной частоты.

Пример 2. Конденсатор емкостью $C = 0,25 \cdot 10^{-6}$ заряжается до напряжения $U_m = 4 \text{ кв}$ и работает в режиме кратковременного колебательного разряда. Определить потери в диэлектрике конденсатора при разряде. Индуктивность разрядного контура $L = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ гн}$, активное сопротивление разрядного контура $R_p = 1,0 \text{ ом}$, частота следования разрядов $f_0 = 50$. Определяем гармонические

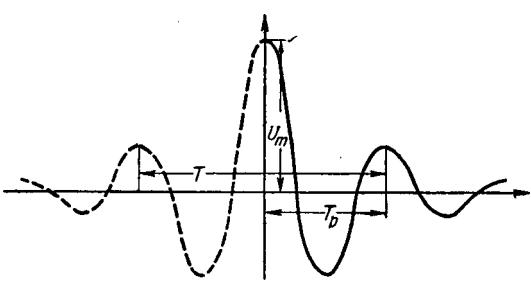


Рис. 2.

составляющие ряда Фурье, представляющего форму напряжения при разряде конденсатора (рис. 2):

$$f(t) = U_m e^{-\alpha t} \cdot \cos \omega_p t.$$

Постоянная составляющая при определении потерь в диэлектрике не учитывается.

Так как функция четная, коэффициенты A_n равны нулю. Примем $T = 2T_p$. При этом за время T_p амплитуда затухающего колебания снижается до $0,3U_m$. Для получения более точного результата T следует выбрать более $2T_p$:

$$B_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt;$$

$$B_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} U_m e^{-\alpha t} \cos \omega p t \cdot \cos n\omega t dt,$$

где

$$\alpha = \frac{R_p}{2L}; \quad \omega_p = \frac{2\pi}{T_p}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{\omega_p}{2}; \\ T_p = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Решая и делая подстановку, получим:

$$B_1 = 0,15U_m; \quad B_2 = 0,57U_m,$$

остальные гармоники ничтожно малы.

$$P_n = \frac{U_n^2}{2} \omega_n C \operatorname{tg} \delta_n \frac{1}{Q}.$$

Угол потерь, измеренный при частоте $\omega_1 = \omega$, $\operatorname{tg} \delta_1 = 0,028$, а при частоте $\omega_2 = \omega_p$, $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,032$:

$$P_1 = \frac{U_n^2}{2} \frac{2\pi}{T} C \operatorname{tg} \delta \frac{T}{T_0} = 0,2 \text{ вт}; \\ P_2 = 3,3 \text{ вт}.$$

Суммарные потери в диэлектрике конденсатора при колебательном разряде составляют:

$$P_s = 3,5 \text{ вт}.$$

Выводы. 1. Метод разложения в ряд при определении потерь в диэлектрике конденсатора, работающего в импульсном режиме, достаточно прост, а некоторые усложнения расчетов, связанные с разложением в ряд, окупаются получением большей точности, чем по методу эквивалентной частоты.

2. Метод пригоден для определения потерь в конденсаторах с любым диэлектриком, для которого применим принцип наложения и в отношении которого известна зависимость угла диэлектрических потерь от частоты.

3. Для получения мощных кратковременных импульсов должны применяться конденсаторы с малым активным сопротивлением обкладок.

Литература

1. Pulse Generators. Radiation Laboratory Series Massachusetts Institute of Technology.
2. В. Т. Ренне. Электрические конденсаторы. Госэнергоиздат, 1955.

[30. 5. 1956]



Электромашинный метод уравнивания потенциалов отсасывающих пунктов¹

Инж. Д. А. ЯСТРЖЕМБСКИЙ

г. Одесса

Блуждающие токи трамваев привносятся в почву улиц городов с рельсов электрифицированного транспорта везде, где эти рельсы не изолированы от земли и уложены на уровне уличного покрытия.

Для снижения величин этих токов существующие Правила защиты от электрокоррозии обязывают устраивать в районах каждой тяговой подстанции равнопотенциальные отсасывающие пункты и прокладывать отсасывающие кабели. Для уравнивания потенциалов этих пунктов с точностью $\pm 0,5$ в Правилами рекомендуется применять одно из трех устройств: реостатное, электромашинное понизительное и электромашинное повышительное. В основе этого требования Правил заложена идея принудительного создания в рельсовых сетях и в земле некоторого, наивыгоднейшего по форме, коррозийно безопасного потенциального поля с равнопотенциальными пунктами отсасывания.

Однако обычная практика уравнивания потенциалов при помощи только реостатного устрой-

ства всегда сталкивалась с затруднениями, кажущимися настолько непреодолимыми, что среди специалистов появилось ошибочное мнение о необходимости точного уравнивания потенциалов отсасывающих пунктов.

Задача настоящей статьи — показать и обосновать техническую реальность строгого выполнения такого важнейшего требования Правил, как создание наивыгоднейшего потенциального поля рельсовой сети при помощи электромашинного повышительного устройства.

Покажем, что устойчивое и контролируемое со щита подстанции уравнивание потенциалов на всех отсасывающих пунктах при достаточном числе таких пунктов является сильнейшим средством и обязательным условием для создания устойчивого потенциального поля рельсовой сети, в котором только и может быть обеспечена нормированная Правилами разность потенциалов между любыми двумя точками рельсов — не более 2,5 в.

На рис. 1, а и б показана рельсовая консоль, отходящая от отрицательной шины подстанции. Для упрощения токовая нагрузка принята равно-

¹ Печатается в порядке обсуждения.

мерно распределенной, а утечка ближайших токов в землю не учитывается.

Положим, что удалось установить одинаковые потенциалы на всех отсасывающих пунктах (рис. 1,б). Тогда в промежутках между двумя соседними пунктами сохранятся более высокие, чем на отсасывающих пунктах, потенциалы. При отсутствии уравнительных токов между пунктами в этих промежутках должны образоваться точки токораздела. По мере увеличения числа отсасывающих пунктов длины полуучастков рельсов, по которым стекают токи к отсасывающим пунктам, сокращаются, а токи в них уменьшаются.

Сравнение рис. 1,*a* и 1,*b* позволяет написать следующее выражение для наибольшего падения напряжения вдоль полуучастков рельсов:

$$\Delta U_K = \frac{\Delta U_{p1}}{(2K-1)^2},$$

где ΔU_{p1} — наибольшее падение напряжения в рельсах консоли при одном отсасывающем пункте;

K — произвольное число отсасывающих пунктов.

Полагая K равным 1, 2, 3 ..., получим:

$$\Delta U_{p1} = \frac{I_1 R_{p1}}{2} ; \quad \Delta U_2 = \frac{\Delta U_{p1}}{9} ; \quad \Delta U_3 = \frac{\Delta U_{p1}}{25} \dots ,$$

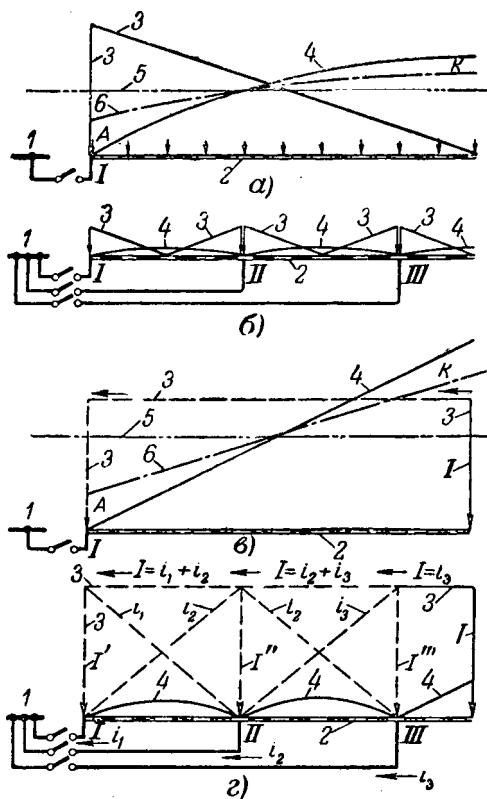


Рис. 1. Графики нагрузки и потенциалов консольной рельсовой линии.

a — с равномерно распределенной нагрузкой и одним отсасывающим пунктом; *b* — то же с тремя отсасывающими пунктами; *в* — с подвижной сосредоточенной нагрузкой и одним отсасывающим пунктом; *г* — то же с тремя отсасывающими пунктами.

1 — отрицательная шина; 2 — рельс; 3 — график нагрузки; 4 — график потенциалов рельсов; 5 — уровень потенциалов удаленной земли; 6 — линия потенциалов подземных сооружений.

где R_{p1} — сопротивление рельсовой консоли при $K=1$.

Эти результаты свидетельствуют о высокой эффективности устойчивого уравнивания потенциалов на всех отсасывающих пунктах, требуемого Правилами для снижения рельсовых потенциалов между двумя любыми точками рельсов. Таким образом, не должно быть места для сомнений относительно обязательности выполнения требования Правил.

Рассмотрим предельно тяжелый случай сосредоточенной нагрузки, движущейся от конца консоли к подстанции при $K=1$ (рис. 1,в) и при $K=3$ (рис. 1,г).

На рис. 1,2 построены графики подвижной нагрузки и распределения ее по отсасывающим пунктам по мере прохождения участков III-II и II-I. Для построения использован метод линий влияния, принятый в строительной механике для подвижных нагрузок. Построение выполнено при условии равенства потенциалов отсасывающих пунктов.

При $K=1$ наибольшая расчетная величина падения напряжения в рельсах

$$\Delta U_1 = I_1 R_{n1}.$$

При $K > 1$ наибольшая величина падения напряжения на полуучастках рельсов между каждой парой отсасывающих пунктов выразится следующим образом:

на удаленном полуучастке

$$\Delta U'_K = \frac{\Delta U_1}{2K-1} ;$$

на прочих полуучастках

$$\Delta U_K'' = \frac{\Delta U_1}{2(2K-1)}.$$

Полагая $K = 1, 2, 3, \dots$, получим:

$$\Delta U_1 = I_1 R_{p1}; \quad \Delta U_2' = \frac{\Delta U_1}{3}; \quad \Delta U_2'' = \frac{\Delta U_1}{6};$$

$$\Delta U_3' = \frac{\Delta U_1}{5}; \quad \Delta U_3'' = \frac{\Delta U_1}{10} \dots$$

Очевидно, в случае единственной сосредоточенной движущейся нагрузки число потребных отсасывающих пунктов должно быть больше, чем при равномерно распределенной нагрузке. Для действительных нагрузок могут приниматься средние расчетные условия из двух рассмотренных предельных.

Выводы, сделанные на примере консольной схемы, могут быть обобщены на случай любой сложной замкнутой рельсовой сети путем условного разрезания ее на элементарные независимые консоли в точках токораздела.

На рис. 1 построения ориентированы около горизонтальной линии 2, изображающей конструктивный элемент — рельсы. В дальнейшем за начало отсчета потенциалов будет приниматься горизонтальная линия уровня потенциалов отрицательной шины. Таким образом построены графики на рис. 2, а и 2, б, первый из которых относится к случаю, представленному на рис. 1, б, а второй — на рис. 1, г.

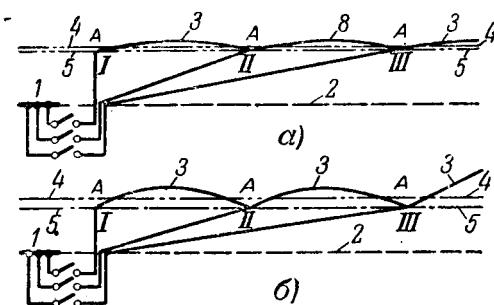


Рис. 2. Графики потенциалов консольной рельсовой линии с тремя отсасывающими пунктами.
а — нагрузка равномерно распределенная (рис. 1, б); б — нагрузка со средоточенной подвижной (рис. 1, г).

1 — отрицательная шина; 2 — уровень потенциала отрицательной шины; 3 — график потенциалов рельсов; 4 — уровень потенциала удаленной земли; 5 — уровень потенциала отсасывающих пунктов; А — анодные зоны.

Указанная система отсчета и построения графиков дает возможность комплексно представлять исследуемые явления как результат действия устройств управления и регулирования обратных токов с подстанций.

Принципиальное различие между тремя регулирующими и уравнивающими устройствами иллюстрируются на рис. 3 потенциальными графиками, построенными для условий идеального уравнивания, т. е. в согласии с указаниями Правил защиты. На рис. 3 нанесены линии потенциалов отрицательных шин, рельсов, удаленной земли и отсасывающих пунктов, а также расчетные величины: $\Delta U_{1\text{об}} = I_1 R_{1\text{об}}$, $-\Delta E_{1\text{об}}$ и $+\Delta E_{1\text{об}}$, определяемые на основе ранее известных расчетных величин I_1 , I_2 , R_1 , R_2 .

Линии потенциалов подземных сооружений не наносятся, чтобы не затенять чертежа.

Очевидное из рис. 3 отличие положений уровней потенциалов отсасывающих пунктов относительно отрицательной шины и относительно полного напряжения подстанции при реостатном и понизительном электромашинном способах регулирования и от положения при повысительном электромашинном способе послужило основанием для того, чтобы считать первые два метода понизительными, а третий повысительным.

Из сравнения графиков рис. 3 можно видеть, что положения, которые занимают линии потенциалов отсасывающих пунктов относительно линий потенциалов отрицательных шин при понизительных способах регулирования, отличаются от положения, которое занимает та же линия при повысительном способе регулирования. В первом случае она находится на большой высоте $\Delta U_2 = I_2 R_2$, а во втором — на малой высоте $\Delta U_1 = I_1 R_1$, причем $\Delta U_1 \ll \Delta U_2$. Это свидетельствует о решительном преимуществе повысительного регулирования.

Как показано на рис. 3, созданные взаимные положения линий 1, 2, 3 и 4 закономерно фиксируют в потенциальном поле точно определенные места анодных и катодных зон на подземных сооружениях, дальнейшая устойчивость ко-

торых определяется устойчивостью средств, применяемых для уравнивания потенциалов. Узкие, многократно слабленные в отношении своей агрессивности анодные зоны, образующиеся только вблизи отсасывающих пунктов, могут непрерывно контролироваться с подстанции по приборам.

При проектировании повысительного регулирующего устройства, кроме выбора места отсасывающих пунктов, токов отсасывания $I_{\text{об}}$, сечений, длин кабелей и их сопротивлений $R_{\text{об}}$, приходится определять величины напряжений генераторов с последовательным возбуждением U_2 , которые находятся из уравнения

$$U_2 - I_{\text{об}} R_{\text{об}} + I_1 R_1 = 0. \quad (1)$$

Величиной $I_1 R_1$ в большинстве случаев можно пренебречь, так как она обычно весьма мала. Внешняя характеристика машин должна быть максимально прямолинейной, а их напряжение должно регулироваться реостатами настройки возбуждения в пределах $\pm 10\%$.

Заметим, что существующие Правила считают потенциалы уравненными, если средняя величина их разности в продолжение 3 ч пика нагрузки не превышает $\pm 0,5$ в.

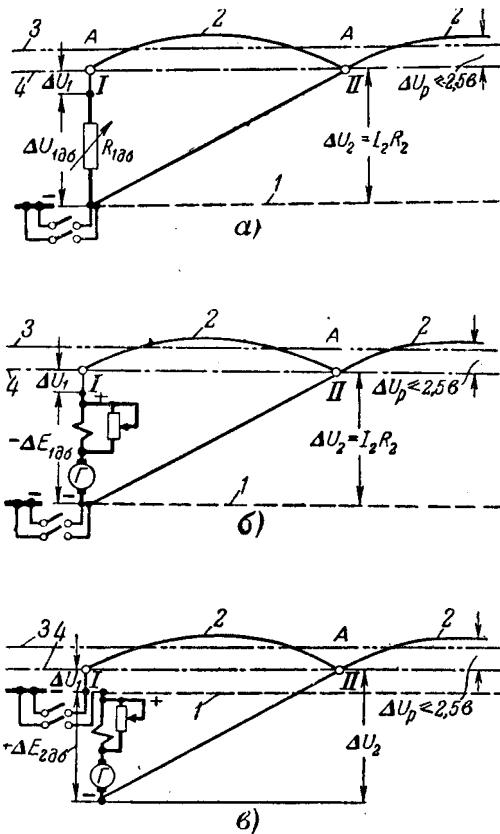


Рис. 3. Графики потенциалов.
а — при реостатном регулировании; б — при электромашинном понизительном регулировании; в — при электромашинном повысительном регулировании.
1 — линии уровней потенциалов отрицательных шин; 2 — линии потенциалов рельсов; 3 — линии уровней потенциалов удаленной земли; 4 — линии уровней потенциалов отсасывающих пунктов.

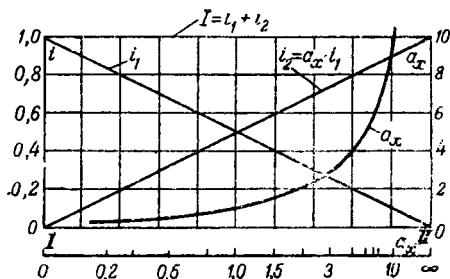


Рис. 4. Линия влияния подвижной нагрузки на токи i_1 и i_2 отсасывающих пунктов I и II.

Расчетные характеристики точности и чувствительности сравниваемых регулирующих устройств, настроенных на полное уравнивание потенциалов при некотором определенном отношении отсасываемых токов, должны давать указания на возможные мгновенные значения отклонения разности потенциалов от нуля при произвольных мгновенных синхронных, но асинфазных отклонениях отношений действительных отсасываемых токов от отношений, принятых в результате настройки.

Положим, что рельсовая линия с двумя отсасывающими пунктами I и II несет постоянную нагрузку $i_1 + i_2$, причем $i_{20} = a_0 i_{10}$, где a_0 — постоянный коэффициент оптимальной относительной токовой настройки средств уравнивания потенциалов двух сравниваемых отсасывающих пунктов. При асинфазных колебаниях токов, когда $i_2 = a_x i_1$, где $a_x > a_0$, степень уравнения потенциалов, которая должна иметь место согласно настройке, может нарушаться. Принятые нами условия нагрузки линии и отдельных отсасывающих кабелей показаны графически на рис. 4.

Из контурных уравнений э. д. с. и напряжений выводятся формулы точности уравнивания

$$\delta U_{12} = f(i_1, a_x) \text{ или } \delta U_{12} = f(i_2, a_x),$$

где δU_{12} , δU_{21} — искомые переменные величины отклонений от нуля разностей потенциалов сравниваемых отсасывающих пунктов при произвольных синхронных, но асинфазных колебаниях нагрузок и постоянной их суммарной величине.

Формулы точности уравнивания имеют следующий вид:

для реостатного и понизительного электромашинного регулирования

$$-\delta U'_{12} = i_1 R_2 (a'_0 - a_x) \quad (2a)$$

или

$$-\delta U'_{12} = i_2 R_2 \left(\frac{a'_0}{a_x} - 1 \right); \quad (2b)$$

для повысительного электромашинного регулирования

$$-\delta U''_{12} = i_1 R_1 \left(1 - \frac{a_x}{a''_0} \right) \quad (3a)$$

или

$$-\delta U''_{12} = i_2 R_1 \left(\frac{1}{a_x} - \frac{1}{a''_0} \right), \quad (3b)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления отсасывающих кабелей, причем всегда $R_1 \ll R_2$.

В этих уравнениях

$$a'_0 = \frac{R_1 + R_{1\theta\delta}}{R_2}; \quad (4a)$$

$$a''_0 = \frac{R_1}{R_2 - C_m}, \quad (4b)$$

где C_m — постоянный конструктивный коэффициент машины.

Для повысительного электромашинного устройства формула (4b) имеет только теоретическое значение, так как практически точная настройка режимов этого устройства на автоматическое соответствие любым действующим значениям a'_0 производится 1 раз на длительное время при помощи реостата возбуждения и вольтметра. Для реостатного устройства формула (4a) может иметь практическое значение при настройках реостатов и установлении соответствия настройки действующим средним нагрузкам.

Пример. Рельсовая консоль длиной 3,5 км имеет два отсасывающих пункта. Кабель № 1 имеет $s_1 = 800 \text{ мм}^2$, $L_1 = 0,07 \text{ км}$, $R_1 = 0,00155 \text{ ом}$, а кабель № 2: $s_2 = 600 \text{ мм}^2$, $L_2 = 3,2 \text{ км}$, $R_2 = 0,1 \text{ ом}$. Нагрузка $i_{10} = 400 \text{ а}$, $i_{20} = 600 \text{ а}$, $a_0 = 1,5$. Данные вольтодобавочной машины: $P_2 = 36 \text{ квт}$, $U_2 = 60 \text{ в}$, $I_2 = 600 \text{ а}$.

В случае реостатного регулирования в уравнение (2a) подставляем $i_1 = 1000 \text{ а}$, $R_2 = 0,1 \text{ ом}$, $a_0 = 1,5$, $a_x = 0$, а в уравнение (2b) $i_2 = 1000 \text{ а}$, $R_2 = 0,1 \text{ ом}$, $a_0 = 1,5$, $a_x = \infty$. В результате получаем: $\delta U'_{12} = -150 \text{ в}$, $\delta U'_{12} = +100 \text{ в}$. Через две точки, координаты первой из которых $a_x = 0$, $\delta U'_{12} = -150$, а второй $a_x = \infty$, $\delta U'_{12} = +100$, проводим (рис. 5) прямую $\delta U'_{12} = f(a_x)$. (прямая 1).

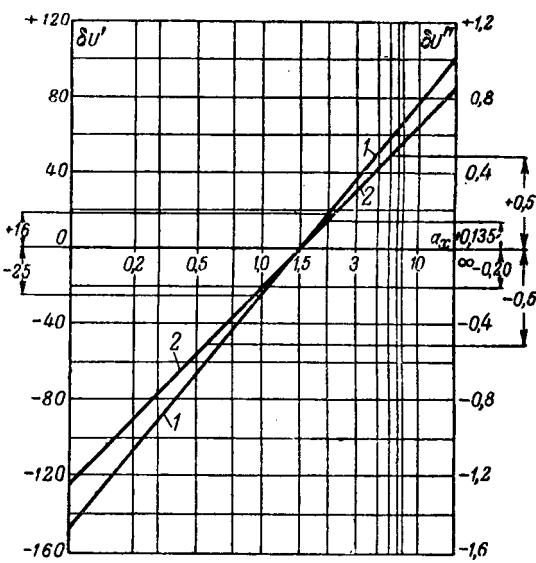


Рис. 5. Характеристики точности реостатного (1) и электромашинного (2) способов регулирования.

Для электромашинного повышительного регулирования в результате аналогичных подстановок в уравнения (За) и (3б) получим координаты двух точек ($a_x = 0$, $\delta U''_{12} = -1,25$ и $a_x = \infty$, $\delta U''_{12} = 0,835$) зависимости $\delta U''_{12} = f(a_x)$ (прямая 2).

Положим, что a_x изменяется в пределах $1 < a_x < 2$. По характеристикам 1 и 2 (рис. 5) находим пределы отклонений от нуля. Для $\delta U''_{12}$ эти отклонения лежат в пределах $-25 \dots +16 \text{ в}$, а для δU_{12} в пределах $-0,20 \dots +0,135 \text{ в}$.

Чтобы отклонения $\delta U''_{12}$ от нуля достигли пределов, нормированных Правилами, т. е. $\pm 0,5 \text{ в}$, изменение a_x по характеристике 2 должно находиться в пределах $-0,55 < a_x < 5,0$ при прочих равных условиях.

Условия для примера заимствованы из практики Одесского трамвая, где до войны имелось 16 вольтодобавочных машин. Данные одной из них, которая сохранилась, взяты для примера.

При подсчетах по формулам (За) и (3б) обнаружилось, что здание подстанции неправильно ориентировано относительно рельсового пути. Если бы оно было повернуто на 180° , а $s_1 = 2 \times 800 \text{ мм}^2$ и $L_1 = 0,035 \text{ км}$, то точность уравнивания потенциалов повысилась бы в 4 раза вследствие уменьшения сопротивления R_1 , входящего множителем в формулы (За) и (3б).

Если бы, далее, потребовалось для снижения падения напряжения в кабеле № 2 принять $s_2 = 800 \text{ мм}^2$, т. е. $R_2 = 0,075 \text{ ом}$ и $\Delta U_2 = 45 \text{ в}$, или, наоборот, для повышения плотности тока принять $s_2 = 500 \text{ мм}^2$, т. е. $R_2 = 0,12 \text{ ом}$ и $\Delta U_2 = 72 \text{ в}$, то мощность вольтодобавочной машины следовало бы принять равной 27 или 43 квт.

Таким образом, применение только повышительных вольтодобавочных машин открывает широкие возможности для выбора сечений кабелей: от самых легких, технически допустимых, до более дорогих, экономически оправданных. Вольтодобавочные машины могут подключаться вместо реостатов к любому существующему кабелю при соблюдении условий формулы (1).

Рассмотренный пример свидетельствует о высокой точности и устойчивости уравнивания потенциалов отсасывающих пунктов, достигаемого при помощи повышительных электромашин, и о большой неточности и неустойчивости уравнивания потенциалов при помощи реостатов. Если к этому добавить, что уравнивание потенциалов при помощи генераторов постоянного тока с последовательным возбуждением обладает высокой чувствительностью и осуществляется автоматически, мгновенно и непрерывно, то станет очевидным, что из числа трех рекомендованных Правилами способов уравнивания потенциалов на отсасывающих пунктах наиболее эффективным является электромашинный повышительный.

Реальное электромашинное повышительное устройство имеет погрешности, связанные с возможным несоответствием характеристик кабеля и вольт-амперных характеристик машины, а также погрешности, обусловленные и колебаниями скорости вращения машины. Первая погрешность не превышает долей погрешностей, определенных выше теоретически, а вторая устраняется приме-

нением синхронных электродвигателей и много- машинных агрегатов.

Установка повышительных электромашин даже на самых коротких отсасывающих фидерах рельсовых сетей трамваев имеет самостоятельное значение для уравнивания потенциалов. Поэтому неправильно рассматривать их как нечто подобное вольтодобавочным электромашинам, которые устанавливаются на длинных питающих положительных фидерах.

Чтобы уменьшить количество типоразмеров повышительных машин, необходимо типизировать отсасывающие устройства как по токам (например, 700, 500, 300 а), так и по сечениям (например, 500, 400, 240 мм^2) и длинам (например, 800, 1 600, 2 400 м) кабелей. По этим данным могут быть установлены типовые напряжения и мощности машин.

При помощи системы реостатов непрерывное уравнивание потенциалов вообще неосуществимо. При реостатном способе возможны только непрерывные колебания разностей между потенциалами всех отсасывающих пунктов. Эти колебания могут достигать значительных величин, средние значения которых согласно Правилам не должны превосходить $\pm 0,5 \text{ в}$.

Затраты на машинное оборудование оправдываются тем, что при одинаковых условиях потери электроэнергии в вольтодобавочных машинах, связанные с регулированием потенциалов отсасывающих пунктов, ниже, чем в реостатах, так как энергия, потребляемая вольтодобавочной машиной, частично возвращается в контактную сеть.

Наименование показателей	Система реостатов 400 а, 0,15 ом	Система вольтодобавочных машин 650 а, 65 в
Капиталовложения, руб.	3 000	16 000
Средняя мощность вольтодобавочных машин, квт	—	36
Средняя мощность кабеля № 2, квт	36	36
Средняя мощность кабеля № 1, квт	24	—
Годовое число рабочих часов . .	6 500	6 500
Годовые потери в кабелях, квт·ч	390 000	234 000
Годовые потери в вольтодобавочной машине, квт·ч	—	68 000
Суммарные годовые потери, квт·ч	390 000	302 000
Стоимость потерь (16,5 коп/квт·ч, руб.)	64 200	49 500
Амортизация (6%), ремонт (1%) и обслуживание (3%), руб. . .	300	1 600
Суммарные годовые эксплуатационные расходы, руб.	64 500	51 100



Расчет параметров дренажной защиты

Доктор техн. наук, проф. Г. С. АРОНЗОН

Московский автомобильно-дорожный институт

Одним из наиболее эффективных методов борьбы с коррозией подземных металлических сооружений является дренажная защита. Правильный выбор дренажных токов должен обеспечить ликвидацию анодных зон в защищаемом сооружении. Увеличение дренажного тока сверх минимально необходимого вызывает нежелательное возрастание токов утечки в землю и может оказать вредное влияние на соседние металлические сооружения. Рассмотрим, как по известному потенциалу подземного сооружения определить основные параметры дренажной защиты — ток и сопротивление дренажа.

Пусть дренажный провод сопротивлением R присоединен к рельсу, который, в свою очередь, присоединен к отрицательнойшине тяговой подстанции P (рис. 1)¹. Так как наиболее опасная анодная зона подземного сооружения находится у пункта отсасывания, то дренажный ток должен обеспечить ее ликвидацию.

Потенциал подземного сооружения зависит от распределения тока в рельсовой сети. Общее выражение для тока в рельсах имеет вид:

$$I_1(x) = Ae^{-\beta_1 x} + Be^{\beta_1 x}, \quad (1)$$

где $I_1(x)$ — ток в рельсах на расстоянии x от подстанции;

β_1 — коэффициент затухания для рельсовой сети, равный $\sqrt{R_1 g_1}$;

R_1 — сопротивление рельсов на единицу длины;

g_1 — проводимость утечки на единицу длины.

Постоянные A и B определяются из граничных условий и известны для заданного распределения тяговых нагрузок [Л. 1].

Анодную зону создает первая составляющая тока. Вторая составляющая уменьшает опасное действие первой. Соотношение между A и B за-

¹ При выбранных положительных направлениях все токи, очевидно, отрицательны.

Потери энергии в обратной сети при регулировании реостатами и электромашинами соответственно равны

$$P_{1kb} + P_{1db} + P_{2kb} \text{ и } P_{1kb} + P_{2kb} + P_{2kb} \left(\frac{1 - \eta^2}{\eta} \right),$$

где P_{1kb} и P_{2kb} — потери мощности в кабелях;

P_{1db} — потери в добавочном сопротивлении;

η — к. п. д. машины.

Полагая, что $P_{1db} \approx 0,5P_{2kb}$ и $\eta = 0,88$, получим, что потери во втором случае составляют 58% от потерь в первом случае.

В таблице приведены полученные путем расчета технико-экономические показатели обеих си-

висит от распределения нагрузок. При достаточно большом расстоянии от нагрузки до подстанции действием второй составляющей можно пренебречь.

Определим параметры дренажной защиты для предельного случая весьма удаленной нагрузки. Это позволит нам найти дренажный ток, обеспечивающий ликвидацию анодной зоны на подземном сооружении в самом неблагоприятном случае. При сделанном предположении ток в рельсовой сети

$$\begin{cases} I_1(x) = I_1(0) e^{-\beta_1 x} & \text{при } x > 0; \\ I_1(x) = -I_1(0) e^{\beta_1 x} & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Линейная плотность тока утечки с поверхности рельсов

$$i = -\frac{dI_1(x)}{dx}.$$

Следовательно,

$$\begin{cases} i = \beta_1 I_1(0) e^{-\beta_1 x} & \text{при } x > 0, \\ i = \beta_1 I_1(0) e^{\beta_1 x} & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Пусть подземное сооружение параллельно рельсам и находится от них на расстоянии a . При отсутствии дренажа влиянием токов подземного сооружения на потенциал внешнего поля можно пренебречь, так как величина этих токов незначительна. Поэтому потенциал точки земли, смежной с подземным сооружением:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2\pi\gamma} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{id\xi}{\sqrt{\xi^2 + a^2}} = \frac{\beta_1 I_1(0)}{\pi\gamma} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta_1 \xi} d\xi}{\sqrt{\xi^2 + a^2}}. \quad (4)$$

Входящий в формулу (4) интеграл выразим через цилиндрические функции $H_0(x)$ и $Y_0(x)$ [Л. 2, стр. 357 и Л. 3, стр. 342]. Тогда

$$\varphi_0 = \frac{\beta_1 I_1(0)}{2\gamma} [H_0(\beta_1 a) - Y_0(\beta_1 a)] = I_1(0) R_{10}, \quad (5)$$

систем регулирования (реостатной и электромашинной повышительной) для рассмотренного выше примера. Из этой таблицы следует, что по капиталовложению реостатная система на 13 тыс. руб. дешевле электромашинной, в то время как только обычные годовые эксплуатационные расходы (без учета повышенных расходов, связанных с электрокоррозией) при реостатной системе на 13,4 тыс. руб. больше, чем при электромашинной.

Выводы. Из § 8 существующих Правил защиты следует изъять рекомендацию о пониженных способах уравнивания потенциалов (реостатный и электромашинный) и сохранить только один повышительный электромашинный способ.



где

$$R_{10} = \frac{\beta_1}{2\gamma} [H_0(\beta_1 a) - Y_0(\beta_1 a)]. \quad (6)$$

При $\beta_1 a < 0,02$

$$H_0(\beta_1 a) - Y_0(\beta_1 a) \approx \frac{2}{\pi} \ln \frac{1,12}{\beta_1 a}. \quad (7)$$

При $\beta_1 a \geq 0,02$ следует пользоваться таблицами функций $H_0(\beta_1 a)$ и $Y_0(\beta_1 a)$ [Л. 3].

Пусть коэффициент затухания для подземного сооружения

$$\beta_2 = \sqrt{R_2 g_2},$$

где R_2 — сопротивление подземного сооружения на единицу длины;

g_2 — проводимость утечки на единицу длины.

Потенциал подземного сооружения в точке дренирования можно выразить через те же цилиндрические функции $H_0(x)$ и $Y_0(x)$ (см. приложение):

$$\varphi_2 = \frac{\beta_1 \beta_2 I_1(0)}{2\gamma (\beta_2^2 - \beta_1^2)} \{ \beta_2 [H_0(\beta_1 a) - Y_0(\beta_1 a)] - \beta_1 [H_0(\beta_2 a) - Y_0(\beta_2 a)] \} = I_1(0) R_{12}, \quad (8)$$

где

$$R_{12} = \frac{\beta_1 \beta_2}{2\gamma (\beta_2^2 - \beta_1^2)} \{ \beta_2 [H_0(\beta_1 a) - Y_0(\beta_1 a)] - \beta_1 [H_0(\beta_2 a) - Y_0(\beta_2 a)] \}. \quad (9)$$

При $\beta_1 a$ и $\beta_2 a < 0,02$

$$R_{12} = \frac{\beta_1 \beta_2}{\pi \gamma (\beta_2^2 - \beta_1^2)} \left(\beta_2 \ln \frac{1,12}{\beta_1 a} - \beta_1 \ln \frac{1,12}{\beta_2 a} \right). \quad (10)$$

Если коэффициенты затухания β_1 и β_2 равны между собой, то формулы (9) и (10) теряют смысл. Чтобы получить выражение R_{12} для этого случая, воспользуемся правилом Лопитала. Дифференцируя числитель и знаменатель выражения (9) и учитывая, что

$$H'_0(x) = -H_1(x) + \frac{2}{\pi}, \quad \text{а} \quad Y'_0(x) = -Y_1(x),$$

найдем:

$$R_{12} = \frac{\beta_1}{4\gamma} \left\{ H_0(\beta_1 a) - Y_0(\beta_1 a) - \beta_1 a \times \left[\frac{2}{\pi} - H_1(\beta_1 a) + Y_1(\beta_1 a) \right] \right\}. \quad (11)$$

При $\beta_1 a < 0,02$

$$R_{12} = \frac{\beta_1}{2\pi\gamma} \left(\ln \frac{1,12}{\beta_1 a} + 1 \right). \quad (12)$$

Включение дренажа приводит к изменению потенциалов рельсов, земли и подземного сооружения. Обозначим значения потенциалов подземного сооружения и точек земли, смежных с ним, при включенном дренаже соответственно через φ_2 и φ'_2 .

Для ликвидации анодной зоны и защиты от почвенной коррозии необходимо и достаточно вы-

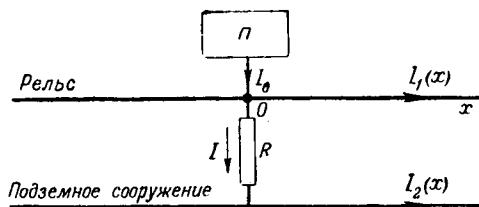


Рис. 1

брать параметры дренажа так, чтобы в точке дренирования ($x = 0$) выполнялось равенство

$$\varphi_2' = \varphi_0' + \varphi_{заш}, \quad (13)$$

где $\varphi_{заш}$ — так называемый защитный потенциал, который обычно принимают равным $-0,3$ в.

Обозначим через $R_{\lambda 1}$ и $R_{\lambda 2}$ характеристические сопротивления соответственно рельсов и подземного сооружения.

Если I — ток дренажа, а R — его сопротивление, то, применив законы Кирхгофа, получим:

$$\left. \begin{aligned} 2I_1(0) + I &= I_0; \\ I_1(0) R_{\lambda 1} &= IR + \frac{1}{2} R_{\lambda 2}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Решив систему уравнений (14), найдем новое значение тока в рельсах (при $x = 0$)

$$I_1(0) = I_0 \frac{R + \frac{R_{\lambda 2}}{2}}{2R + R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}} \quad (15)$$

и тока дренажа

$$I = I_0 \frac{R_{\lambda 1}}{2R + R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2}}. \quad (16)$$

Появление дренажного тока изменит потенциал φ_2 на величину $\frac{I}{2} R_{\lambda 2}$. Следовательно,

$$\varphi_2' = \varphi_2 + \frac{I}{2} R_{\lambda 2}. \quad (17)$$

Токи утечки с подземного сооружения, вызванные дренажным током, изменят и потенциалы земли. Так как дренажный ток распределяется вдоль подземного сооружения по закону показательной функции, то аналогично предыдущему [выражения (4) и (5)] получим:

$$\varphi_0' = \varphi_0 - \frac{I}{2} R_{20}; \quad (18)$$

$$R_{20} = \frac{\beta_2}{2\gamma} [H_0(\beta_2 r) - Y_0(\beta_2 r)] = \frac{\beta_2}{\pi \gamma} \ln \frac{1,12}{\beta_2 r}, \quad (19)$$

где r — радиус подземного сооружения.

Подставляя значения φ_0' и φ_2' в формулу (13) и используя выражения (15) и (16), найдем выражение для сопротивления дренажа:

$$R = \frac{I_0 [R_{\lambda 1}(R_{\lambda 2} + R_{20}) - R_{\lambda 2}(R_{10} - R_{12})] - 2\varphi_{заш}(R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2})}{2I_0(R_{10} - R_{12}) + 4\varphi_{заш}}. \quad (20)$$

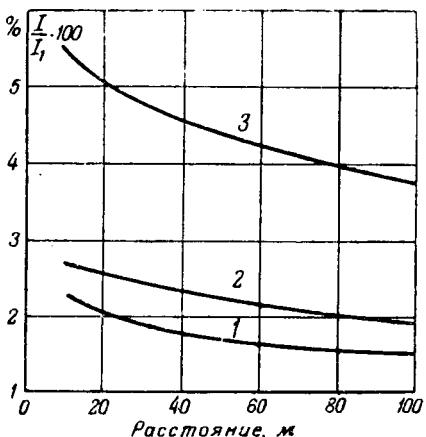


Рис. 2.

На рис. 2 и 3 изображены кривые зависимости тока и сопротивления дренажа от расстояния между подземным сооружением и рельсами, построенные по полученным формулам для следующих параметров: ток нагрузки $I = -1000 \text{ а}$; $\varphi_{заш} = 0,3 \text{ в}$; $R_1 = 0,01 \text{ ом/км}$; $R_2 = 0,01 \text{ ом/км}$; $r = 0,05 \text{ м}$; проводимости утечки: $g_1 = 0,25 \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{км}}$ и $g_2 = 3,1 \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{км}}$ (кривая 1); $g_1 = 0,25 \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{км}}$ и $g_2 = 1 \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{км}}$ (кривая 2); $g_1 = 1 \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{км}}$ и $g_2 = 3,1 \frac{1}{\text{ом}\cdot\text{км}}$ (кривая 3).

Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что даже значительное уменьшение проводимости изоляции подземного сооружения мало влияет на ток и сопротивление дренажа, хотя плотность тока утечки равна

$$i_2 = (\varphi_2 - \varphi_0) g_2. \quad (21)$$

Зато существенное влияние на ток и сопротивление дренажа оказывает состояние изоляции рельсовой сети, как это видно из сравнения кривых 1 и 3.

Приложение. Потенциал произвольной точки подземного сооружения, находящегося во внешнем поле, как известно, удовлетворяет уравнению

$$\frac{d^2\varphi_2(x)}{dx^2} - i_2^2 \varphi_2(x) = -\beta_2^2 \varphi_0(x), \quad (I,1)$$

которое для бесконечно длинного проводника ($I = 0$ при $x = \pm\infty$) имеет следующее общее решение:

$$\varphi_2(x) = \frac{\beta_2}{2} \left[e^{-\beta_2 x} \int_{-\infty}^x \varphi_0(\xi) e^{-\beta_2 \xi} d\xi + e^{\beta_2 x} \int_x^{\infty} \varphi_0(\xi) e^{-\beta_2 \xi} d\xi \right]. \quad (I,2)$$

В рассматриваемом случае одной подстанции и бесконечно длинной рельсовой сети

$$\varphi_0(\xi) = \frac{\beta_1 I_1(0)}{\pi \gamma} \Omega(\beta_1 \xi, \beta_1 a), \quad (I,3)$$

где функция

$$\Omega(x, y) = \frac{1}{2} \left(e^{-x} \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t} dt}{\sqrt{t^2 + y^2}} + e^x \int_x^{\infty} \frac{e^{-t} dt}{\sqrt{t^2 + y^2}} \right) \quad (I,4)$$

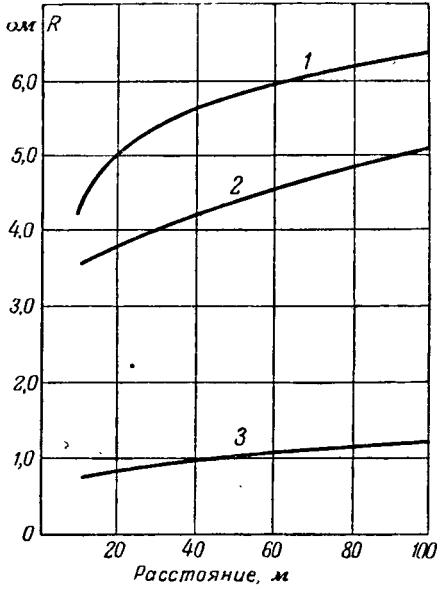


Рис. 3.

После подстановки выражения (I,3) в уравнение (I,1) получим интегралы, которые путем двукратного интегрирования по частям и использования выражений (I,5) примут вид:

$$\int_{-x}^{\infty} \Omega(\beta_1 \xi, \beta_1 a) e^{-\beta_2 \xi} d\xi = \frac{1}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \left[\beta_2 e^{\beta_2 x} \Omega(\beta_1 x, \beta_1 a) + \beta_1 e^{\beta_2 x} \Psi(\beta_1 x, \beta_1 a) - \beta_1^2 \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-\beta_2 \xi} d\xi}{\sqrt{(\beta_1 \xi)^2 + (\beta_1 a)^2}} \right]; \quad (I,6)$$

$$\int_x^{\infty} \Omega(\beta_1 \xi, \beta_1 a) e^{-\beta_2 \xi} d\xi = \frac{1}{\beta_2^2 - \beta_1^2} \left[\beta_2 e^{-\beta_2 x} \Omega(\beta_1 x, \beta_1 a) - \beta_1 e^{-\beta_2 x} \Psi(\beta_1 x, \beta_1 a) - \beta_1^2 \int_x^{\infty} \frac{e^{-\beta_2 \xi} d\xi}{\sqrt{(\beta_1 \xi)^2 + (\beta_1 a)^2}} \right]. \quad (I,7)$$

После подстановки выражений (I,6) и (I,7) в выражение для $\varphi_2(x)$ и упрощений получим:

$$\varphi_2(x) = \frac{\beta_1 \beta_2 I_1(0)}{\pi \gamma (\beta_2^2 - \beta_1^2)} [\beta_2 \Omega(\beta_1 x, \beta_1 a) - \beta_1 \Omega(\beta_2 x, \beta_2 a)]. \quad (I,8)$$

Для точки дренирования $x = 0$. Но, как отмечалось раньше [см. выражение (4)],

$$\Omega(0, y) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-t} dt}{\sqrt{t^2 + y^2}} = \frac{\pi}{2} [H_0(y) - Y_0(y)]. \quad (I,9)$$

После подстановки выражения (I,9) в выражение (I,8) получим формулу (8).

Литература

1. К. Г. Марквардт. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. Трансжелдориздат, 1948.
2. Sunde. Earth conduction effects in transmission systems. New York, 1949.
3. Ватсон. Теория бесселевых функций. Издательство иностранной литературы, 1949.
4. М. И. Михайлов, Р. И. Акуленок и А. Ф. Марченко. Защита междугородных кабелей связи от коррозии. Связьиздат, 1953.
5. Г. Г. Марквардт. Расчет блуждающих токов в подземных сооружениях. Электричество, № 6, 1955.

Релейный эффект в схемах регулирования температуры

Кандидат техн. наук Г. К. НЕЧАЕВ

Институт электротехники АН УССР,

кандидат техн. наук Д. В. ДОРОФЕЕВ

Минский институт электрификации и механизации сельского хозяйства

В схемах двухпозиционного регулирования температуры может быть использован релейный эффект в цепи с термосопротивлением. Типичная релейная зависимость тока в цепи от температуры среды, окружающей термосопротивление, представлена на рис. 1. При некоторой температуре θ_1 в цепи получается возрастание тока, а при θ_2 — спадание. При возрастании тока состояние цепи характеризуется неравенством $U_m < U - Ir$, а при убывании $U_m > U - Ir$ [Л. 1], где U_m — падение напряжения на термосопротивлении; U — напряжение питания цепи; I — ток цепи; r — добавочное сопротивление.

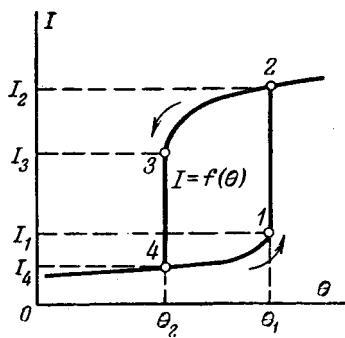


Рис. 1. Зависимость тока в цепи с релейной характеристикой от температуры окружающей среды.

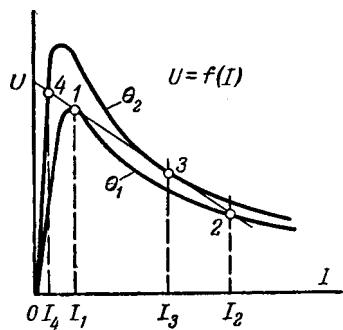


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики термосопротивления, соответствующие зависимостям $I = f(\theta)$ на рис. 1.

В устройствах температурной сигнализации и тепловой защиты [Л. 2 и 3] используется только прямой скачок тока, но представляется возможным для цели регулирования температуры применить весь цикл, т. е. прямой и обратный скачки тока. Если последовательно с термосопротивлением включить реле, то при соответствующем выборе параметров схемы мы можем получить срабатывание реле θ_1 и отключение при θ_2 . При помощи указанного реле можно включать более мощные реле или контакторы, включающие исполнительные устройства, управляющие поступлением энергии к регулируемому объекту.

На рис. 2 показаны вольт-амперные характеристики термосопротивления для двух значений температур среды θ_1 и θ_2 . Токи 1, 2, 3 и 4 на характеристиках соответствуют тем же точкам на кривой $I\theta$ (рис. 1). Исследования показывают, что ширина петли зависит в основном от напряжения питания цепи, параметров термосопротивления и в меньшей степени от параметров других элементов схемы.

Температура прямого срабатывания θ_1 устанавливается соответствующим выбором напряжения питания цепи и величины добавочного сопротивления [Л. 4]. Но требуемая температура обратного срабатывания θ_2 , в общем случае может быть отлична от θ_1 , и необходимы специ-

альные меры, чтобы получить срабатывание схемы при заданном значении θ_2' . Подобно тому, как мы получаем необходимое значение θ_1 , требуемая величина θ_2' может быть установлена соответствующим изменением U и r , выполняемым после прямого срабатывания цепи. Такие изменения могут быть получены при помощи ряда схем, одна из которых показана на рис. 3; графическая иллюстрация работы этой схемы дана на рис. 4.

При заданной температуре возникает релейный эффект, вследствие чего срабатывает реле p и цепь с термосопротивлением переключается на напряжение $U_2 > U_1$. Одновременно с этим в цепь вводится сопротивление $r_2 > r_1$ и в ней устанавливается ток, соответствующий точке 3,

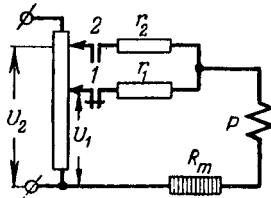


Рис. 3. Схема регулирования температуры с использованием релейного эффекта.

больший, чем ток отпускания реле $I_{o.p}$. Величина напряжения U_2 выбирается таким образом, что бы графики функций $U_2 - I_2 = f_1(I)$ и $U_1 - I_1 = f_2(I)$ для температуры θ_2' касались в точке 4. После этого температура среды начинает понижаться и когда достигнет значения θ_2' , в цепи произойдет резкое уменьшение тока. При снижении тока до $I_{o.p}$ реле отпускается, и цепь переключается на напряжение U_1 . Так как $U_1 < U_2$, то при определенных значениях U_1, U_2, r_1 и r_2 возможно в момент переключения некоторое уменьшение тока на ΔI , которое можно определить графически. Если точка b окажется над кривой, то будет возрастание тока и схема перейдет в режим автоколебаний, нарушающих нормальную работу схемы. Уменьшение же тока при обратном переключении благоприятно влияет на работу схемы и предупреждает возникновение автоколебаний. Хотя данная схема несколько сложнее других возможных схем, она позволяет выполнять регулирование температуры в более узком диапазоне.

Уставка температуры определяется в основном величиной напряжения питания цепи, поэтому в таких схемах должна быть предусмотрена его стабилизация. Для регулирования напряже-

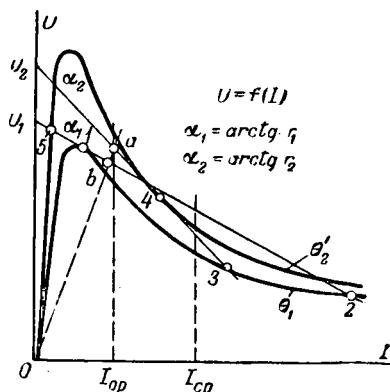


Рис. 4. График работы схемы рис. 3.

ния может быть использован потенциометр, как это показано на рис. 3.

Исследование схемы показало, что температура прямого скачка при неизменном напряжении U достаточно стабильна и разброс ее не превышает $0,2 \dots 0,4^\circ\text{C}$, но разброс температуры обратного срабатывания схемы несколько больше и достигает $1,0 \dots 1,5^\circ\text{C}$. Это можно объяснить тем, что вольт-амперная характеристика имеет кривизну правее точки максимума значительно меньше, чем в точке максимума. Но кривизна этого участка может быть увеличена путем параллельного соединения термосопротивления с линейным сопротивлением r_w , как это показано на рис. 5. Величина r_w может быть выбрана приближенно из допущения, что ток отпускания реле равен току, соответствующему максимуму характеристики $U_m = f_2(I)$. Тогда из

графического построения $r_w \geq \frac{U_1}{I_{o,p} - I_1}$. Расчет других элементов схемы и напряжений U_1 и U_2 можно выполнить графическим или графоаналитическим методом [Л. 4]. Для этой цели используются вольт-амперные характеристики термосопротивления, снятые при температурах среды θ_1 и θ_2' , определяющих зону регулирования. Термосопротивления при снятии характеристик следует помещать в арматуру, в которой они должны работать, так как арматура вносит определенную особенность в процесс теплообмена термодатчика со средой и, таким образом, влияет на форму вольт-амперной характеристики. Если мы снимаем характеристику, постепенно увеличивая ток, а затем пойдем в обратном направлении, то совпадения кривых может не получиться, так как температура воздуха внутри корпуса датчика будет выше температуры среды и только увеличивая размеры корпуса, мы можем добиться совпадения при прямом и обратном ходе. По нашим исследованиям для термосопротивления КМТ-11 [Л. 5] такое совпадение получилось при диаметре корпуса закрытого датчика $d = 53 \text{ мм}$. Для регулирования температуры воздуха защитная оболочка может быть не герметизирована, что приближает условия работы термосопротивления к условиям неограниченного пространства.

Для предложенных схем регулирования температуры следует применять термосопротивления

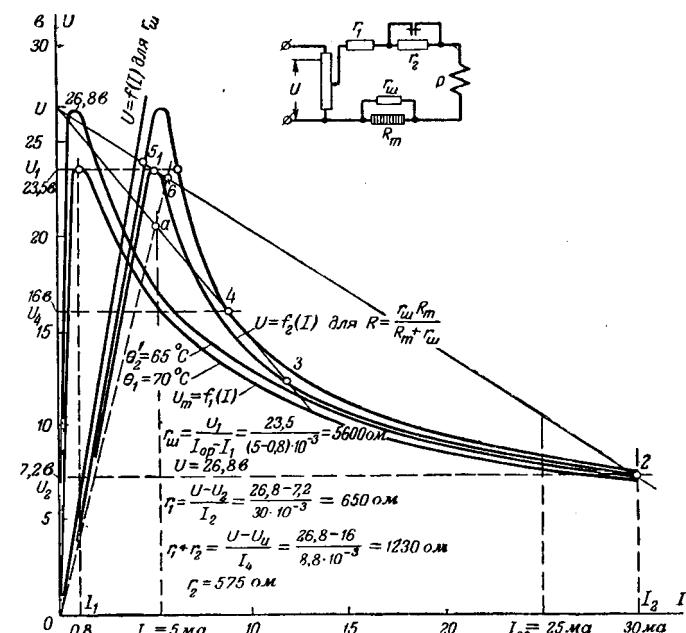


Рис. 5. Пример расчета элементов схемы регулирования графическим методом.

типа КМТ-11, предназначенные для работы в устройствах, использующих релейный эффект. В качестве реле нами были использованы телефонные реле типа РКМ с некоторой индивидуальной регулировкой, при которой достигался ток срабатывания $I_{cp} = 25 \dots 30 \text{ мА}$ и ток отпускания $I_{o,p} = 5 \dots 6 \text{ мА}$. Описанные схемы были экспериментально проверены в диапазоне температур $10 \dots 100^\circ\text{C}$ [Л. 5]. Схема (рис. 3) показала лучшие результаты и позволила регулировать температуру в пределах $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2' = 2^\circ\text{C}$.

Следует указать, что двухпозиционная схема регулирования температуры может быть выполнена с применением термосопротивления, включенного в одно из плеч моста. Но при этом мощность в нагрузке будет на несколько порядков ниже, чем в схеме с релейной характеристикой, и потребуется применение весьма чувствительного реле.

На рис. 5 дан пример графического расчета схемы.

Литература

- Г. К. Нечаев, Релейный эффект в цепи с термосопротивлением. Электричество, № 3, 1951.
- Г. К. Нечаев, Тепловая защита электродвигателя переменного тока с применением термосопротивлений. Промышленная энергетика, № 9, 1952.
- Г. К. Нечаев и М. М. Пиневич, Система температурной сигнализации на термосопротивлениях. Электричество, № 9, 1953.
- Г. К. Нечаев, Расчет цепи с термосопротивлением, работающей в релейном режиме. Автоматика и телемеханика, № 3, 1955.
- Д. В. Дорофеев, Разработка и исследование автоматических устройств на термосопротивлениях. Диссертация. Минск, 1955.

[18.3.1957]



Выбор параметров резонансного измерительного элемента частоты

Кандидат техн. наук В. Г. ВАСИЛЬЕВ

Харьковский политехнический институт

Резонансные контуры, применяемые в схемах для измерения отклонений частоты, состоят из последовательно включенных дросселя, конденсатора, двухполупериодного выпрямителя и нагрузки (рис. 1, а).

Поскольку в качестве нагрузки обычно применяется измерительная катушка, желательно, чтобы крутизна амперчастотной характеристики резонансного контура (т. е. его чувствительность α) была наибольшей в рабочей точке, соответствующей номинальному значению измеряемой частоты.

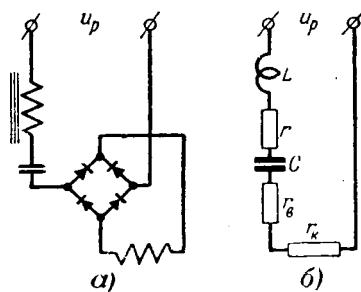


Рис. 1. Реальная (а) и расчетная (б) схемы резонансного контура.

В ряде работ [Л. 1 ... 3] приводится методика расчета для определения оптимальных параметров резонансного контура, обеспечивающих максимальную чувствительность схемы к изменениям частоты. Несмотря, однако, на идентичность расчетной схемы, принятой в указанных работах (рис. 1, б), выводы трех авторов различны. Так, исходя из этих работ, максимальная чувствительность измерительного элемента должна иметь место при

$$\frac{R}{\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}} = \pm 1 \quad [\text{Л. 1}];$$

$$\frac{R}{\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}} = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \quad [\text{Л. 2}];$$

$$\frac{R}{\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \quad [\text{Л. 3}].$$

С целью сравнения здесь приняты обозначения:

L — индуктивность дросселя;

C — емкость конденсатора;

r — эквивалентное сопротивление, обусловленное активными потерями в обмотке и сердечнике дросселя;

r_s — эквивалентное сопротивление выпрямителя;

r_k — сопротивление нагрузки;

$R = r + r_s + r_k$ — активное сопротивление всей цепи;

ω_n — номинальная круговая частота (рабочий режим);

ω_0 — резонансная частота.

Ни одно из приведенных условий, однако, не является оптимальным, если полностью используются возможности составных элементов резонансного контура. Причины неточности выводов [Л. 1, 2 и 3] указаны в приложении 1.

Исходные условия. При определении оптимальных параметров резонансного контура необходимо учитывать ограниченность возможностей отдельных его элементов, обусловленную свойствами применяемых материалов. Поэтому необходимо соблюдение следующих условий:

а) магнитная индукция B в сердечнике дросселя не должна превышать максимально допускаемого (вследствие насыщения стали) значения B_m ;

б) напряжение на конденсаторе U не должно превышать допускаемого (по соображениям электрической прочности) значения U_m ;

в) плотность тока j в обмотке дросселя и измерительной катушки следует ограничить предельно допускаемым (по условию нагрева) значением j_m ;

г) при выборе выпрямителя в соответствии с его нагрузкой можно считать, что эквивалентное сопротивление выпрямителя r_s пропорционально сопротивлению нагрузки r_k , т. е.

$$r_s = k_s r_k.$$

Для упрощения формы записи основных соотношений, характеризующих резонансный контур, введем условные обозначения:

$$k_1 = \pm \frac{R}{\frac{\omega_n L}{\omega_n C} - 1}; \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{r_k + r_s}{r}. \quad (2)$$

Для решения вопроса об оптимальном выборе параметров резонансного контура необходимо найти значения k_1 и k_2 , при которых чувствительность резонансного контура максимальна. Для однозначного решения этой задачи считаем, что габариты дросселя и измерительной катушки неизменны. Исходя из известных формул для определения сопротивления r_d и количества витков дросселя w_d , получим:

$$r_d = \frac{\rho l_{cd} w_d}{q_d}; \quad (3)$$

$$w_d = \frac{s_d k_{zd}}{q_d}, \quad (4)$$

где ρ — удельное сопротивление проволоки;
 q_d — сечение проволоки;

k_{zd} — коэффициент заполнения окна намотки;

s_d — сечение окна намотки;

l_{cd} — средняя длина витка обмотки.

Из (3) и (4)

$$r_{\partial} = r_{n\partial} \omega_{\partial}^2, \quad (5)$$

где

$$r_{n\partial} = \frac{\rho l_{c\partial}}{s_{\partial} k_{3\partial}}. \quad (6)$$

С учетом потерь в стали эквивалентное сопротивление дросселя

$$r = r_{n\partial} \omega_{\partial}^2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\partial}} \right), \quad (7)$$

где P_c — потери в стали дросселя при $\omega = \omega_{\kappa}$;

P_{∂} — потери в меди (обмотке) дросселя при $\omega = \omega_{\kappa}$.

Если нагрузкой является измерительная катушка, то ее сопротивление определяется зависимостью, аналогичной (5):

$$r_{\kappa} = r_{n\kappa} \omega_{\kappa}^2, \quad (8)$$

где

$$r_{n\kappa} = \frac{\rho l_{ck}}{s_{\kappa} k_{3\kappa}}; \quad (9)$$

l_{ck} , s_{κ} , $k_{3\kappa}$, w_{κ} — соответственно средняя длина витка, сечение окна намотки, коэффициент заполнения и количество витков измерительной катушки.

Для того чтобы индукция в сердечнике дросселя не превышала допускаемого значения, следует ограничить величину тока I (эффективное значение) контура. Так как ток I достигает максимума при резонансе ($I = I_0$), то необходимо, чтобы в пределе

$$I_0 \omega_{\partial} = \frac{B_{\mu} s}{G \sqrt{2}}, \quad (10)$$

где G — магнитная проводимость магнитопровода дросселя;

s — сечение сердечника дросселя.

Магнитная проводимость G в основном обычно определяется толщиной немагнитной прокладки δ , разделяющей магнитопровод, точнее

$$G = \mu_0 \frac{s}{\delta + l_{\mu} \frac{\mu_0}{\mu_c}}, \quad (11)$$

где μ_0 и μ_c — соответственно магнитная проницаемость немагнитной прокладки и стали сердечника;

l_{μ} — средняя длина силовой линии в стали сердечника.

Принимая индуктивность дросселя равной

$$L = G \omega_{\partial}^2,$$

получим из (4) и (10):

$$L = \frac{s B_{\mu} \omega_{\partial}^2}{V^2 s_{\partial} k_{3\partial} j_{o\partial}}, \quad (12)$$

где $j_{o\partial} = \frac{I_0}{q_{\partial}}$ — плотность тока в обмотке дросселя при резонансе ($I = I_0$).

Так как применяемые резонансные контуры обладают малым затуханием, то можно считать, что напряжение на конденсаторе достигает максимума U_0 при резонансе

$$U_0 = \frac{I_0}{\omega_{\kappa} C} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (13)$$

Из (4), (12) и (13)

$$C = \frac{s B_{\mu} s_{\partial} k_{3\partial}}{U_0^2 V^2} j_{o\partial}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что при заданных параметрах дросселя габариты конденсатора, определяемые произведением $C U^2$, при $U_0 = \frac{U_{\mu}}{\sqrt{2}}$ зависят лишь от выбранной плотности тока $j_{o\partial}$ в обмотке дросселя.

Определение оптимальных значение k_1 и k_2 . Среднее значение ампервитков измерительной катушки Aw_{κ}

$$Aw_{\kappa} = \frac{I \omega_{\kappa}}{k_{\phi}}, \quad (15)$$

где k_{ϕ} — коэффициент формы кривой тока.

При активной нагрузке $k_{\phi} = 1,11$. Если нагрузка имеет индуктивный характер, значения k_{ϕ} могут быть определены по данным, приведенным в [Л. 4].

Из (15) и (8)

$$Aw_{\kappa} = \frac{U_p \sqrt{\frac{r_{\kappa}}{r_{n\kappa}}}}{k_{\phi} \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}, \quad (16)$$

где U_p — напряжение, подводимое к резонансному контуру.

Чувствительность α контура к изменению частоты при $\omega = \omega_{\kappa}$ определяется из выражения

$$\alpha = \left(\frac{\partial Aw_{\kappa}}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_{\kappa}} = \frac{U_p \left(\frac{1}{\omega_{\kappa}^2 C^2} - \omega_{\kappa}^2 L^2 \right) \sqrt{\frac{r_{\kappa}}{r_{n\kappa}}}}{k_{\phi} \left[R^2 + \left(\omega_{\kappa} L - \frac{1}{\omega_{\kappa} C} \right)^2 \right]^{3/2} \omega_{\kappa}}. \quad (17)$$

Подставляя (1) в (17), получим:

$$|\alpha| = \frac{U_p \left(2\omega_{\kappa} L \pm \frac{R}{k_1} \right) k_1^2 \sqrt{\frac{r_{\kappa}}{r_{n\kappa}}}}{k_{\phi} \omega_{\kappa} R^2 (1 + k_1^2)^{3/2}}. \quad (18)$$

Так как реальные резонансные контуры имеют большую добротность, то $2\omega_{\kappa} L \gg \frac{R}{k_1}$, поэтому

$2\omega_{\kappa} L \pm \frac{R}{k_1} \approx 2\omega_{\kappa} L$. Подставляя при этом условии в (18) выражение (2), (7) и (12), получим:

$$|\alpha| \approx \frac{V k_2}{1 + k_2} \frac{k_1^2}{(1 + k_1^2)^{1/2}} \times \\ \times \frac{\sqrt{2sB_m}}{k_\phi \sqrt{(1 + k_\phi) \left(1 + \frac{P_c}{P_\partial}\right) r_{nd} r_{nk}}} \quad (19)$$

Из (19) видно, что $|\alpha|$ достигает максимума при $k_1 = \pm \sqrt{2}$ и $k_2 = 1$, если габариты дросселя и измерительной катушки фиксированы.

При оптимальном выборе параметров

$$\alpha \approx \pm 0,244 \frac{sB_m}{k_\phi \sqrt{(1 + k_\phi) \left(1 + \frac{P_c}{P_\partial}\right) r_{nd} r_{nk}}} \quad (20)$$

Вопрос о выборе оптимальных размеров измерительной катушки рассмотрен в [Л. 5].

Для характеристики резонансного контура существенное значение имеет разность $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = |\omega_0 - \omega_n|, \quad (21)$$

характеризующая предел измерения отклонений частоты от значения $\omega = \omega_n$.

При оптимально выбранных параметрах ($k_1 = \pm \sqrt{2}$, $k_2 = 1$). Из (1) (7) и (12)

$$\frac{\omega_n^2 - \omega_0^2}{\omega_n} = \frac{2r_{nd} \left(1 + \frac{P_c}{P_\partial}\right) s_\partial k_{3d} j_{od}}{sB_m} \quad (22)$$

При высокой добротности резонансного контура

$$\frac{\omega_n + \omega_0}{\omega_n} \approx 2, \quad (23)$$

поэтому из (21) (22), и (23) получим:

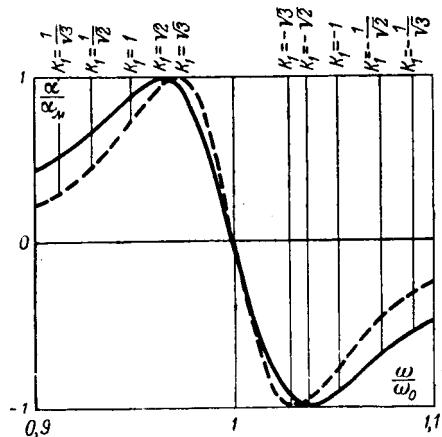
$$\Delta\omega \approx \frac{r_{nd} \left(1 + \frac{P_c}{P_\partial}\right) s_\partial k_{3d} j_{od}}{sB_m} \quad (24)$$

Выводы. Из (20) видно, что максимальная чувствительность при заданных габаритах дросселя и измерительной катушки может быть достигнута, если $j_{od} = j_m$, так как в этом случае P_∂ имеет максимальное значение.

При малых потерях в стали дросселя $P_c \rightarrow 0$ чувствительность α мало зависит от значения плотности тока в обмотке дросселя j_{od} . Если уменьшить j_{od} , то при этом уменьшается габариты необходимого конденсатора (14), однако уменьшится также предел измерения $\Delta\omega$ (24). Необходимо также учитывать, что при уменьшении j_{od} следует увеличивать магнитную проводимость G , т. е. уменьшать воздушный зазор дросселя; последнее снижает его термостабильность [Л. 3].

Из (20) следует также что чувствительность контура при правильно подобранных параметрах не зависит от напряжения U_p .

Приложение I. Неточность выводов [Л. 1...3] вызвана некоторыми ошибочными исходными положениями. Например, в [Л. 1 и 3] при определении производной полагается, что резонансная частота неизменна, тогда как в действительности ω_0 зависит от параметров резо-



Опыты над электретами

Доцент Ф. И. ПОЛОВИКОВ

Ошский государственный педагогический институт

Электреты — диэлектрики, сохраняющие продолжительное время поляризованное состояние, принято характеризовать: направлением поляризации, ее временной устойчивостью и величиной поляризационного заряда. Установлено [Л. 1 ... 5], что перечисленные параметры зависят от химического состава исходного материала и некоторых других факторов, сопровождающих процесс формирования электретов.

Методика изготовления электретов в принципе одинакова и сводится к охлаждению с затвердеванием или только к охлаждению предварительно нагретого диэлектрика до температуры окружающей среды в постоянном электрическом поле. В связи с этим первоначальные свойства электретов чаще всего исследовались в зависимости от температуры предварительного нагрева, от скорости охлаждения и от величины приложенного формирующего поля.

Мы несколько изменили методику приготовления электретов, дополнив ее обработкой диэлектрика в переменном электрическом поле. Каждый из приготовленных образцов сначала подвергался воздействию переменного поля и только после этого проходил стадию поляризации в постоянном электрическом поле. В большей части опытов применялось переменное поле с частотой 6×10^8 Гц и постоянное поле с напряженностью 3,5; 6,5; 13 кВ/см. Образцы приготавливались с подогревом и без подогрева диэлектрика и имели форму плоских дисков диаметром 40 мм и толщиной 1 и 2 мм. Электроды изготавливались из латуни и железа. При приготовлении образцов из расплавленного диэлектрика электроды покрывались белой жестью, это обеспечивало более легкое отделение электрода от затвердевшего образца. Во всех случаях электроды шлифовались.

Величина k_s зависит от типа выпрямителя ($k_s = 0,1 \dots 0,5$).

Обычно измерительная катушка имеет меньшие габариты, чем катушка дросселя, вследствие чего приходится выбирать $j_{ok} = j_m$, $j_{od} < j_m$, т. е. максимальная плотность тока j_{od} определяется допустимой плотностью тока j_m в измерительной катушке. В противном случае принимаем $j_{od} = j_m$.

Во-вторых, определяем количество витков w_d обмотки дросселя. Из (12) и (14) можно получить:

$$w_d = \frac{U_0 V}{s B_m (\omega_m \pm \Delta\omega)} . \quad (II,2)$$

Значение $\Delta\omega$ находится из (24) при выбранном j_{od} и $P_d = \rho V_d j_{od}^2$. Напряжение U_0 берется равным допустимому рабочему напряжению конденсатора C . Выбор знака \pm в (II,2) определяет положение рабочей точки на восходящей или нисходящей ветви амперчастотной характеристики резонансного контура.

Дальнейший расчет производится на основании приведенных выше формул. Учитывая, что

$$I_0 = j_{od} q_d ; \quad (II,3)$$

Образцы приготавлялись из парафина, нафтилина, серы, плексигласа и технического листового эбонита. Поляризованные образцы сохранялись завернутыми в станиолевую фольгу.

Определение знака и величины поляризованного заряда производилось по способу зарядки конденсатора зарядом, индуцированным с поверхности электрета. По величине заряда определялась поверхностная плотность заряда σ .

При определении характера влияния переменного поля на процесс поляризации приготавливались контрольные образцы, сформированные только в постоянном поле.

Основные результаты опытов приведены в таблице.

Из таблицы видно, что образцы электретов, приготовленные с участием переменного поля, имеют более устойчивый, а в ряде случаев и больший поляризационный заряд.

Эффективность переменного поля проявляется уже на образцах, приготовленных при температуре 20 ... 35°C. С повышением температуры диэлектрика во время его поляризации влияние переменного поля возрастает. Это хорошо заметно на образцах из плексигласа.

Характерной особенностью влияния переменного поля на процесс образования поляризованного состояния является то, что оно может вызывать обращение поляризационного заряда. В четырех отмеченных в таблице случаях имело место обращение от гомозаряда (заряда на поверхности электрета, одноименного с зарядом электрода, прилегающего к этой поверхности) к гетерозаряду (заряду, разноименному с зарядом электрода). Следует заметить, что подобного направления обращения заряда у данных электретов не

$$q_k = \frac{I_0}{j_{ok}} ; \quad (II,4)$$

$$U_p = I_0 (r + r_k + r_s) , \quad (II,5)$$

находим q_d из (4), r_θ из (3), r_k из (2), w_k из (8), q_k из (II,4), U_p из (II,5), C из (14), G из (10) и (II,3), δ из (11).

В процессе расчета следует вводить корректировки с целью получения стандартных значений сечений провода q_d и q_k , а также емкости C .

Литература

1. А. Г. Ивахненко и Н. В. Хрушева. Методика расчета оптимальных значений постоянных резонансного измерительного элемента частоты. Сборник научно-технических статей Института электротехники АН УССР, вып. 3, 1949.

2. А. Г. Москалев. Автоматическое регулирование частоты в энергосистемах. Госэнергоиздат, 1952.

3. Ю. М. Элькинд. Частотомеры и установки для их поверки. Госэнергоиздат, 1950.

4. В. Г. Комар. Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления. Госэнергоиздат, 1952.

5. В. Г. Васильев и Н. Д. Лаврова. Расчет резонансного измерительного элемента частоты. Сборник трудов ХИИ, вып. 2, 1956.

[1.8. 1956]



Материал	$t, \text{макс., } ^\circ\text{C}$	Время воздействия поля, мин			Первоначальный поляризационный заряд			Обращенный поляризационный заряд			Примечание
		переменного $6 \cdot 10^6 \text{ Гц}$	постоянного	$E, \text{kV/cm}$	знак заряда	$\sigma_{\max} \times 10^9 \frac{\text{к}}{\text{см}^3}$	устойчивость заряда	знак заряда	$\sigma_{\max} \times 10^9 \frac{\text{к}}{\text{см}}$	устойчивость заряда	
Парафин	20	10	10	6,5	Гомо	0,07	5 мин	Гетеро	0,5	20 ч	
Парафин	20	Нет	10	6,5	Гомо	1,94	60 мин	Нет			
Парафин	40				Гетеро	0,14	10 ч	Нет			
Парафин	35	20	60	6,5	Гомо	0,14	7 мин	Гетеро	0,07	60 мин	
Парафин	Нет				Гомо	0,31	100 мин	Нет			
Нафталин	20	15	25			1,5	15 суток	Нет			
Нафталин	100	50	90	6,5	Гомо	0,35	15 мин	Гетеро	0,20	20 суток	Из расплава
Нафталин	Нет				Гомо	0,30	5 суток	Нет			
Сера	20	25	25		Гомо	1,27	5 суток	Нет			
Сера	110	50	90	6,5	Гомо	1,60	35 ч	Гетеро	0,09	>4 мес.*	Из расплава
Сера	Нет				Гетеро	0,76	4 мес.*	Нет			
Эбонит	60				Гомо	3,74	5 мес.*				
Эбонит	90	10	45	13	Гомо	2,15	5 мес.*	Нет			
Эбонит	Нет					1,48	5 мес.				
Плексиглас	30	10	45	3,5	Гомо	0,8	30 мин				
Плексиглас	Нет				Гомо	1,10	60 мин				
Плексиглас	100	10	45	3,5	Гомо	2,60	>3 мес.*	Нет			
Плексиглас	Нет					1,50	2 мес.				

* Окончательных данных пока не имеется.

наблюдается, если они сформированы только в постоянном поле.

Образцы из эбонита, кроме того, обрабатывались и в поле промышленной частоты. При этом замечалось незначительное увеличение поляризационного заряда по сравнению с тем, который наблюдается у образцов, приготовленных только в постоянном поле. Можно предполагать, что для каждого диэлектрика имеется некоторая эффективная частота, при которой влияние поля на процесс формирования электрета будет наибольшим. Последнее безусловно требует дополнитель-

ной экспериментальной проверки в более широком диапазоне частот.

Литература

1. A. Gemant. Phil. Mag., т. XX, стр. 929, 1935.
2. F. Gutmann. Rev. Mod. Phys., т. XX, стр. 457, 1948.
3. G. Wiseman, E. Linden, El. Eng., т. LXXII, стр. 869, 1953.
4. А. И. Губкин и Г. И. Сканави. ЖТЭФ, т. XXXII, стр. 140, 1957.
5. Ф. И. Половиков. Ученые записки Ошского государственного педагогического института, вып. 1, 1957.

[6, 4, 1957]



Об одном термоэлектрическом явлении

М. С. МОРГУЛИС
г. Ростов Ярославской обл.

Более 100 лет известны термоэлектрические явления (эффекты) Эпинуса—Зеебека и Пельтье. Первое из них заключается в возникновении термоэлектродвижущей силы (термо-э. д. с.) в цепи из разнородных проводников при наличии в ней градиента температуры. Второе состоит в том, что при прохождении тока через контакт двух различных проводников на границе их соприкосновения происходит либо выделение, либо поглощение тепла, количество которого пропорционально току.

Первую термодинамическую теорию этих явлений разработал в 1856 г. В. Томсон (Кельвин), открывший при этом третий термоэлектрический эффект, названный впоследствии его именем. Томсон теоретически и экспериментально показал, что если в химически однородном проводнике создать температурный градиент, то при прохождении электрического тока через такой

термически неоднородный проводник имеет место выделение или поглощение добавочного тепла, названного теплом Томсона.

Автору этих строк удалось наблюдать новое термоэлектрическое явление, заключающееся в возникновении термо-э. д. с. в химически однородном проводнике при перемещении температурного градиента в нем.

Присоединим металлический проводник, например отрезок железной проволоки, к гальванометру чувствительностью 10^{-6} а на деление шкалы. Если проволоку нагревать в каком-либо месте пламенем свечи, то возникающий в цепи термоэлектрический ток оказывается столь слабым, что стрелка гальванометра не отклоняется. Если же, передвигая свечу вдоль проволоки, перемещать область температурного градиента, то в цепи появляется ток, который отмечает гальванометр. При увеличении скорости перемещения

Из опыта работы

Опыт борьбы с потерями в городской электрической сети

Инж. М. М. ЗАРХИН

Ленинградская кабельная сеть

В Директивах XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг.¹ сказано, что «Все отрасли социалистической промышленности и сельского хозяйства располагают огромными внутренними возможностями. Выявить и по-хозяйски использовать эти возможности — значит обеспечить не только выполнение, но и перевыполнение заданий шестой пятилетки».

В большинстве городских сетей нашей страны теряется значительная доля поступающей в них электрической энергии. Так, например, в сети г. Казани эта доля составляет 11%, Калининграда 23%, а в некоторых городах она достигает 29%. Вместе с тем опыт работы таких городских сетей, как Московская и Ленинградская, показывает, что потери электроэнергии могут быть резко снижены. Только за последние 10 лет потери в сети г. Ленинграда снизились с 7 до 3%.

При правильном построении и эксплуатации потери в городских сетях в среднем составляют 7% поступающей в них энергии. Если считать, что через электрические сети наших городов проходит только 30% всей выработанной в стране энергии, то в 1960 г. каждый процент энергии, поступающей в городские сети, будет равен почти 1 млрд. квт·ч в год.

Сложность борьбы за снижение потерь в первую очередь определяется особенностями построения (схема, напряжения, способ выполнения) и развития городской сети, которые, в свою очередь, связаны с развитием и территориальным расположением города, т. е. с разнообразными местными условиями.

¹ Резолюции XX съезда Коммунистической партии Советского Союза. Госполитиздат, стр. 103, 1956.

области температурного градиента величина тока возрастает. При перемене направления движения свечи направление тока меняется на обратное.

Более тонкая проволока, которая быстрее нагревается в пламени свечи и быстрее остывает позади нее, дает больший ток. Если проволоку позади движущейся свечи искусственно охлаждать, то ток также возрастает. Если вдоль проволоки перемещать несколько свечей, создав тем самым несколько перемещающихся областей температурного градиента, то гальванометр отмечает во столько раз большую величину тока, чем в случае одной свечи, сколько свечей перемещается.

Описанное явление наблюдалось автором в различных металлических проводниках; наиболее сильно оно выражено в железной проволоке.

Предварительные опыты позволяют предположить, что величина термо-э. д. с., возникающей

Для успешной работы по снижению потерь в любой городской электрической сети прежде всего необходим систематический учет технических характеристик сети: протяженности, сечения проводов линий разных напряжений, количества сетевых трансформаторных подстанций (ТП), числа установленных в них трансформаторов, их типов и мощностей, а также данных о потерях в трансформаторах. Кроме того, необходимо иметь принципиальную схему сети с нанесенными на ней параметрами линий и подстанций, с указанием мест, в которых при нормальном режиме сеть расключена. Далее необходимо, чтобы в сети производились систематически измерения нагрузки всех линий и трансформаторов, а также систематически производились расчеты и анализ технических потерь в сети.

Опыт Ленинградской кабельной сети, а также ряда городских сетей Министерства коммунального хозяйства РСФСР, показывает, что потери в сети высокого напряжения составляют 35% всех потерь, в трансформаторах 15 ... 25% и в сети низкого напряжения 40 ... 50%.

Как отмечалось выше, городские электрические сети по своим схемам и характеристикам установленного оборудования весьма разнообразны. Однако внимательное изучение их структуры дает возможность сформулировать ряд положений, руководствуясь которыми, можно оценить, насколько экономично построена любая сеть, и выявить те места в ней, которые вызывают увеличение потерь.

Наименьшие потери электрической энергии в любой сети будут в том случае, когда соотношения токов и сопротивлений отдельных линий соответствуют их соотношениям при естественном токораспределении, т. е. когда токи между ли-

в проводнике при перемещении вдоль него области температурного градиента, пропорциональна градиенту температуры и скорости его перемещения.

В упомянутом явлении Томсона электрический ток, пропускаемый по термически неоднородной цепи, осуществляет перенос (перемещение) тепла, что ведет к нагреванию одних участков цепи и охлаждению других. В рассмотренном же случае искусственно организуемое перемещение области температурного градиента (перемещение нагреваемого участка) создает термо-э. д. с., под действием которой в замкнутой цепи возникает и поддерживается ток. На этом основании наблюдавшееся явление можно, по-видимому, рассматривать как обратное явлению В. Томсона.



ниями, питающимися из одного узла, распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих линий. Отклонение от этих соотношений вызывает значительное увеличение потерь.

Если к линии присоединены нагрузки, то нагрузки отдельных ее участков между пунктами присоединений возрастают по направлению к источнику питания. В этом случае решающим для получения минимума потерь является условие, чтобы сопротивления отдельных участков линии уменьшались по направлению к источнику питания. Численный показатель, отражающий выполнение этого условия, можно определить при помощи следующей формулы, показывающей распределение сопротивлений:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n I^2 R}{\sum_{i=1}^n I^2 R_{cp}}.$$

Величина показателя ρ практически колеблется в пределах 0,7...1,5. Если значения его меньше единицы, то соотношение между токами и сопротивлениями удовлетворительно. Если же величина его превышает единицу, то это указывает на наличие сопротивлений, не соответствующих указанному условию.

Основным признаком экономичности построения распределительной городской сети является равномерная загрузка и примерно одинаковая протяженность всех ее линий. Легко показать, что в противном случае потери в сети значительно увеличиваются.

Экономичность работы сети зависит от того, насколько велик в ней удельный вес параллельно работающих линий, так как токораспределение в параллельно включенных линиях приближается к естественному. Экономичность городской сети повышается с увеличением числа двусторонне питаемых магистральных линий, а также выравниванием нагрузки между отдельными фазами сети низкого напряжения. Перевод сети на повышенное напряжение также приводит к снижению потерь. Следует добиваться того, чтобы плотность тока в линиях высокого напряжения приближалась к экономической.

Что касается сетевых трансформаторов, то их экономичная эксплуатация определяется известным правилом равенства потерь энергии при холостом ходе и нагрузочных потерь.

Экономичность эксплуатации сетей тесно связана с их построением, степенью надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей, качеством электроэнергии и не может рассматриваться отдельно от этих вопросов.

Изложенные принципы положены в основу систематической работы по снижению потерь энергии, которая ведется в Ленинградской кабельной сети.

В свое время были проведены мероприятия, давшие значительный эффект и резко повысившие технический уровень эксплуатации всей городской сети. К этим мероприятиям относятся:

ликвидация устаревшей однофазной сети 2 и 3 кв, а также трехфазной сети 2 кв, перевод сети низкого напряжения со 127 в на 220 в. Экономичное и сравнительно быстрое осуществление последнего мероприятия оказалось возможным благодаря использованию свинцовой оболочки кабелей в качестве нулевого провода.

Для упорядочения схемы сети высокого напряжения были проведены следующие мероприятия: ликвидация тупикового питания, районирование сетей, замена головных участков распределительных линий, включение на параллельную работу по два — четыре питающих кабеля.

Основным мероприятием по снижению потерь в кабельной сети низкого напряжения является перевод магистралей на двустороннее питание и связанное с ним включение сетевых трансформаторов в параллельную работу группами по четырем — восемь трансформаторов. В настоящее время в сети г. Ленинграда около 70% сетевых трансформаторов работают параллельно. Наряду с уменьшением потерь это мероприятие значительно повысило бесперебойность электроснабжения и улучшило режим напряжения в сети низкого напряжения. Значительное внимание уделяется выравниванию нагрузки фаз в сети низкого напряжения.

За последние 10 лет эффективность работ по снижению потерь в Ленинградской кабельной сети увеличилась более чем в 4 раза и в год составляет около 5 млн. квт·ч.

Работы по снижению потерь включаются в годовые планы наряду со всеми эксплуатационными работами. Вместе с номенклатурой и физическими показателями работы планируется и эффективность ее.

Эффективность проведенной работы по снижению потерь определяется на основе первичной технической документации, отражающей все необходимые данные для ее расчета. Для определения эффективности той или иной работы составляется электрическая схема с указанием сопротивлений и распределения нагрузок до и после проведения мероприятий. Условная годовая эффективность определяется по формуле

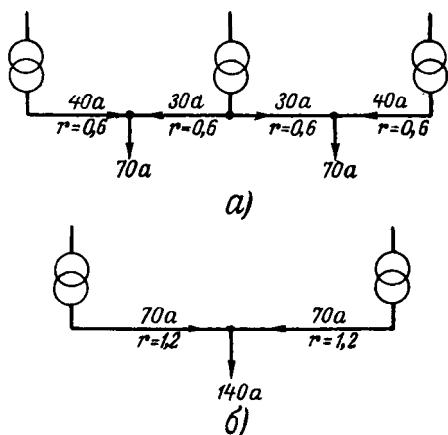
$$\Delta A = (\Delta P_1 - \Delta P_2) \tau,$$

где ΔP_1 и ΔP_2 — потери мощности соответственно до и после проведения работы;

τ — продолжительность потерь при максимальной нагрузке.

Значения τ принимаются равными: для бытовой нагрузки жилых домов и коммунальной нагрузки — 1 700 ч; для нагрузки промышленных предприятий — от 3 500 до 5 000 ч.

Для определения эффективности таких массовых мероприятий, как перевод сети низкого напряжения на более высокое напряжение или выравнивание нагрузки фаз на вводах в жилые дома, разработаны специальные расчетные формулы. Например, формула для расчета эффективности перевода на более высокое напряжение получена на основании следующих соображений.



Опыт эксплуатации показал, что потери до перевода сети на повышенное напряжение составляли 10% энергии, поступавшей в сеть. При повышении напряжения в $\sqrt{3}$ раз потери теоретически уменьшаются в 3 раза и составят уже не 10, а 3,3%. Учитывая, что при переходе на четырехпроводную сеть невозможно добиться идеальной равномерности загрузки фаз, эффективность этого мероприятия можно выразить следующей формулой:

$$\Delta A = 0,035P\tau,$$

где P — суммарная мощность потребителей, присоединенных к сети, переведенной на повышенное напряжение.

Что касается величины потерь при неравномерной загрузке фаз, то она зависит от степени неравномерности, которая определяется коэффициентом

$$k_n = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{cp} + I_{\min}},$$

где I_{\max} , I_{\min} , I_{cp} — токи соответственно максимально и минимально загруженной фазы и третьей фазы.

Каждому значению коэффициента неравномерности соответствует определенное отношение потерь при данной степени неравномерности к потерям при равномерной загрузке фаз. Это отношение называется кратностью потерь m , зависит от местных условий и должно быть определено расчетным путем для каждой сети.

Эффективность работы по выравниванию загрузки фаз выражается следующей формулой:

$$\Delta A = (m_1 - m_2) \Delta A' P\tau,$$

где m_1 , m_2 — кратности потерь до и после проведения работ по выравниванию загрузки фаз;

$\Delta A'$ — потери в сети низкого напряжения, %;

P — суммарная мощность потребителей, присоединенных к сети, в которой производилось выравнивание загрузки фаз.

Для примера рассмотрим результаты расчета эффективности, полученной от отключения одного из трех работающих параллельно сетевых трансформаторов мощностью по 100 ква. Схема, значения сопротивлений линий и токораспределение до и после отключения показаны на рисунке, а результаты расчета — в таблице. Продолжительность потерь холостого хода трансформаторов принята равной 8 760 ч, а потеря нагрузочных — 1 700 ч.

Наименование элемента сети	До отключения трансформатора	После отключения трансформатора
Трансформаторы		
Потери мощности, квт:		
холостого хода	1,80	1,20
нагрузочные	1,63	2,35
Итого . . .	3,43	3,55
Потери энергии, квт·ч:		
холостого хода	15 700	10 500
нагрузочные	2 800	4 000
Итого . . .	18 500	14 500
Кабельные линии		
Потери мощности, квт	3,0	11,8
Потери энергии, квт·ч	5 100	20 000
Все потери энергии в сети, квт·ч	23 600	34 500

Из таблицы видно, что об эффективности отключения трансформаторов можно судить только по потерям энергии. Сопоставление потерь мощности может дать неправильную оценку. При отключениях сетевых трансформаторов необходимо учитывать изменение потерь электрической энергии не только в трансформаторах, но и в линиях, соединяющих трансформаторы, так как это существенно влияет на общую эффективность.

[30.10.1956]



Из истории электротехники

Луиджи Гальвани

(9. 9. 1737—4. 12. 1798)

В этом году исполняется 220 лет со дня рождения Луиджи Гальвани, итальянского врача, работы которого положили начало созданию отдела науки об электричестве, названного его именем (гальванизм).

Гальвани родился 9 сентября 1737 г. в Болонье. О его жизни сохранились лишь очень скучные сведения. Поступив на медицинский факультет Болонского университета он скоро обратил на себя внимание профессора анатомии Галеацци. Дочь Галеацци Лючия стала впоследствии женой Гальвани. Окончив университет, Гальвани занял в нем должность преподавателя, а после смерти Галеацци получил кафедру анатомии. Здесь он читал лекции студентам, занимался исследованиями в области анатомии, не оставлял и врачебной практики.

В 1762 г. двадцатипятилетний Гальвани защищил докторскую диссертацию на тему «Кости, их природа и образование». Следующие две его работы относились также к области анатомии. Однако Гальвани отказался от их опубликования, так как аналогичные исследования были выполнены независимо от него итальянским естествоиспытателем А. Скарпа. В 1782 г., Гальвани получил кафедру гинекологии и акушерства.

В 1780 г. в научной деятельности Гальвани начался период, который принес ему широкую известность. За 10 лет им были сделаны открытия, обессмертившие имя скромного врача из Болоньи. Его работы по животному электричеству завершились опубликованием в 1791 г. знаменитого «Трактата о силах электричества при мышечном движении», вызвавшего по всей Европе широкую волну работ по воздействию электричества на организм животных.

Начало работам Гальвани в этом направлении положил случай, который сам ученый описывает так:

«Я разрезал и препарировал лягушку и, имея в виду совершенно другое, поместил ее на стол, на котором находилась электрическая машина, при полном разобщении с кондуктором последней и на довольно большом расстоянии от него. Когда один из моих помощников острием скальпеля случайно очень легко коснулся внутренних бедренных нервов этой лягушки, то немедленно все мышцы конечностей начали так сокращаться, что казались впавшими в сильнейшие тонические судороги. Другой же из них¹, который помогал нам



в опытах по электричеству, заметил, как ему казалось, что это удается тогда, когда из кондуктора машины извлекается искра. Удивленный новым явлением, он тотчас же обратил на него мое внимание, хотя я замышлял совсем другое и был поглощен своими мыслями. Тогда я зажегся невероятным усердием и страстным желанием исследовать это явление и вынести на свет то, что было в нем скрытого».

Так начинается глава 1 трактата Гальвани. Пытливый исследователь немедленно начал повторять этот опыт, постоянно изменяя его условия. Позднее он

заменил электрическую машину лейденской банкой, изобретенной незадолго до этого. Сокращения мышц наблюдались и тогда, когда препарат был погружен в воду, которая играла здесь роль проводника. Гальвани помещал машину или лейденскую банку на расстоянии свыше 100 м от препарата, присоединенного к ней длинной проволокой, результаты получались те же.

Таким образом, Гальвани испробовал все известные ему виды искусственного электричества. Закончив этот начальный этап своей работы, он перешел к опытам с атмосферным, или, как тогда говорили, «естественным» электричеством. Природа молний, представляющей собой сильный электрический разряд, была раскрыта еще за 40 лет до работ Гальвани Франклином и Ломоносовым.

Методика эксперимента Гальвани описана во второй части его «Трактата». Длинной проволокой, привязанной к самой высокой точке дома, Гальвани касался нервов препарированной лягушки, в то время как мышцы последней были соединены с другим проводником, опущенным в колодец до самой воды. Как и ожидал исследователь, каждый раз при вспышке молний мышцы «впадали в сильнейшие и многократные сокращения». Такой же эффект ученый наблюдал и в отсутствие молний, если близко проходили тяжелые грозовые облака. Это побудило его испробовать «могущество дневного и спокойного электричества», т. е. электрических зарядов, присутствующих в атмосфере при ясной погоде. Здесь-то и произошел второй счастливый случай², который стал поворотным пунктом в работах Гальвани и толкнул его на постановку новых опытов, составивших основу его открытия.

¹ Полагают, что это была Лючия Галеацци — жена Гальвани.

² В сентябре 1786 г., судя по надписи на мемориальной доске, установленной на доме, где жил Гальвани.

«Замечая иногда, что препарированные лягушки, которые были подвешены на железной решетке, окружавшей балкон нашего дома, при помощи медных крючков, воткнутых в спинной мозг, впадали в обычные сокращения не только в грозу, но иногда также при спокойном и ясном небе, я решил, что эти сокращения вызываются изменениями, происходящими днем в атмосферном электричестве.

В различные часы и в течение многих дней я наблюдал за животными, подготовленными для этого соответствующим образом, но в их мышцах почти не наблюдалось движений. Утомленный, наконец, тщетным ожиданием, я начал прижимать медные крючки, воткнутые в спинной мозг, к железной решетке. Хотя я нередко наблюдал сокращения, но ни одно не соответствовало перемене в состоянии атмосферы и электричества». Эти сокращения мышц Гальвани объяснил опять-таки влиянием атмосферного электричества, накапливающегося в мышце и разряжающегося при соприкосновении последней с решеткой. Но он вынужден был изменить свою точку зрения после того, как воспроизвел этот опыт в закрытом помещении, где влияние атмосферного электричества, как он считал, было исключено.

«Когда же я перенес животное в закрытую комнату, поместил на железной пластинке и стал прижимать к ней проведенный через спинной мозг крючок, то появились такие же сокращения, такие же движения. То же самое я постоянно наблюдал при употреблении других металлов...».

Казалось, вывод из этих экспериментов напрашивался сам собой: здесь, как и в прежних опытах, мышца сокращалась под воздействием электричества, порождаемого внешним источником, в данном случае соединением двух различных металлов. Но Гальвани сделал противоположный вывод: он решил, что открыл новый вид электричества, источником которого является сама лягушка, и назвал его «животным электричеством». И хотя мысль об электричестве, присущем живым организмам, была правильной и подтверждалась дальнейшими опытами Гальвани и его последователей, все же объяснения, которые он дал с этой точки зрения своим экспериментам, не выдержали критики его современников, и это в значительной мере уменьшило научную славу Гальвани, может быть, не вполне заслуженно.

Но так или иначе Гальвани бесспорно доказал одно очень важное положение: чтобы сокращения мышц имели место, необходимо соединить мышцы и нервы проводящей металлической дугой, образовав замкнутую цепь. Животное электричество, по мнению ученого, как и всякий другой вид электричества, имеет двойственную природу, причем как положительное, так и отрицательное электричество сосредоточено в тканях животного. Мыщцу Гальвани рассматривал как некое подобие лейденской банки или «магического квадрата» (как называли тогда плоский конденсатор), где мышечное и нервное волокна играют роль двух обкладок, заряженных разноименным электричеством. Прикладывание к обкладкам этого своеобразного живого конденсатора проводящей

металлической дуги вызывает его разряд; течение животного электричества, этого «тончайшего нервного флюида» по цели и вызывает, считал Гальвани, сокращение мышц лягушки. Рассматривая металлы в этих явлениях лишь как проводники, ученый применял серебро и медь наряду с железом только вследствие их хорошей проводимости.

Таким образом, Гальвани высказал с полной отчетливостью мысль об электрическом токе, как о течении электрических зарядов по замкнутой цепи, составленной из проводников. Но источника этого тока в своих опытах он так и не смог правильно определить.

И все же мысль о животном электричестве не была неверной. Опыты удавались и с применением одного металла в качестве проводящей дуги; только сокращения были гораздо слабее, чем в опытах с двумя металлами. А впоследствии Гальваниставил свои эксперименты, полностью исключив из них участие металлов, и даже препарировал лягушек стеклянными ножами. Составив цепь из одних только животных тканей, он получил слабые сокращения мышц. Это было настоящим доказательством существования физиологического электричества, но оно помешало исследователю заметить, что большинство описанных им явлений вызывалось не этим, а значительно более сильным «металлическим» электричеством, возникающим на границе двух металлов.

Опыты Гальвани сразу привлекли внимание физиков и физиологов. Концепция «животного электричества» привлекла много сторонников; среди них был и Александр Вольта, в то время уже известный ученый. Приступая к воспроизведению экспериментов Гальвани, Вольта полностью разделял его теоретические представления. Однако уже через год он сумел выделить главное в открытом Гальвани явлении: самые сильные сокращения мышц наблюдаются в том случае, если дуга, соединяющая нерв и мышцу, составлена из разнородных металлов. Вольта разделил металлы по этому признаку на несколько классов; наиболее сильный эффект производила пара цинк—серебро.

Наконец, в 1794 г. Вольта окончательно оставил теорию животного электричества. В письме к доктору Базалли он пишет: «Что вы думаете о так называемом животном электричестве? Что касается меня, то я давно убедился, что все действие возникает первоначально вследствие прикосновения металлов к какому-нибудь влажному телу или к самой воде. В силу такого соприкосновения электрический флюид гонится в это влажное тело или в воду от самих металлов, от одного больше, от другого меньше (больше всего от цинка, меньше всего от серебра)».

Эти слова Вольты означали полный разрыв с взглядами Гальвани. То, что опыты последнего удавались и с применением дуги из одного металла, объяснялось, по мнению Вольта, тем, что однородность металла только кажущаяся: концы дуги отличаются друг от друга механической обработкой, состоянием поверхности, степенью окисленности и т. п. А через некоторое время Вольта совершенно исключил из своих экспериментов

животные ткани, зарядив при помощи металлической пары конденсатор. От этих опытов вела прямая дорога к созданию электрохимического источника тока. Таким образом, опыты Гальвани стали в конечном счете исходным пунктом работ по созданию науки о гальванических элементах, сыгравших важную роль в развитии теоретической и экспериментальной электротехники и получивших в наше время широкое практическое применение.

Сообщение об опытах Вольты потрясло до самого основания стройное на первый взгляд здание, воздвигнутое Гальвани. Даже самые горячие его сторонники вынуждены были признать существование металлического электричества, по крайней мере, наряду с животным. Но Гальвани, по образованию физиолог, не признавал металлического электричества, так же как физик Вольта не принял теорию животного электричества. Между «гальванианцами» и сторонниками Вольты разгорелась страстная дискуссия, продолжавшаяся и после смерти Гальвани, и результаты ее были чрезвычайно плодотворны для обеих теорий.

Возражения Вольты толкнули Гальвани на постановку упомянутых уже экспериментов, доказавших существование физиологического электричества. Тем не менее, теория животного электричества были забыта, а теория металлического электричества Вольты бурно развивалась. Подлинным ее триумфом было изобретение в 1800 г. вольтова столба, которое сразу сделало Вольту знаменитым и его взгляды общепризнанными.

Гальвани не дожил до этого: он умер 4 декабря 1798 г. в возрасте 61 года. Но у него нашлись последователи. 30 лет спустя итальянский физик Нобили построил чувствительный гальванометр и установил наличие токов в теле лягушки от мышц к нервам, которые он назвал «собственными токами лягушки». Маттеуччи наблюдал токи между мышцами различных частей тела лягушки. Наконец, в работах германского ученого дю-Буа-Реймона, изучавшего в середине прошлого века природу возбуждения в мышцах и нервах в связи с протекающими в них электрическими процессами, теория животного электричества нашла свое второе рождение.

В наши дни электрофизиология получила широкое развитие. В этой области работал акад. П. П. Лазарев, создавший ионную теорию возбуждения, и другие советские ученыe. В числе разработанных электрофизиологических методов научного исследования и диагностики — электрокардиография и энцефалография, изучающие электрические токи в сердечной мышце и мозге.

В честь Гальвани в 1804 г. была выбита медаль, а в 1814 г. в Болонье воздвигнут памятник с надписью: «Алоизию Гальвани, врачу-хирургу, доктору анатомии и акушерства, обогатившему физику названным его именем открытием, с необычайным усердием создавшему замечательное учение, товарищи и друзья всесветно славного мужа».

Ю. В. ПЛЕСКОВ

Институт физической химии Академии наук СССР



Деятельность Э. Арнольда в России

В 1956 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Энгельберта Арнольда — выдающегося электротехника, имя которого неразрывно связано с возникновением и стремительным развитием электромашиностроения в конце XIX и начале XX столетия. Э. Арнольд принял непосредственное участие в создании электротехнической научной дисциплины в Рижском политехническом институте, а в 1888 г. в Риге под техническим руководством Арнольда был основан «Русско-балтийский электротехнический завод (по постройке динамомашин)». Этот начальный период был очень важным для творчества Арнольда в целом.

Энгельберт Ксаверьевич¹ Арнольд в сентябре 1880 г. занял в Рижском политехническом институте вакантную должность ассистента по машиностроению [Л. 1]. До этого



он обучался (1874—1878 гг.) на механическом отделении Цюрихского политехнического института; а затем практиковал как инженер в Лейпциге и в Оффенбахе-на-Майне.

В понятие «машиностроение» в Рижском политехническом институте в тот период входило практическое изучение машин всех видов и их элементов, а именно: подъемных машин, котельных установок, паровых машин, водяных колес, турбин, насосов, машин-орудий [Л. 2]. В обязанности Арнольда входило руководство наряду с проф. Молем конструкторскими упражнениями. Одновременно Арнольд ассистировал проф. Пфулю в преподавании машинного черчения.

С самого начала своей педагогической деятельности Арнольд разносторонне и глубоко изучал машинную технику, знакомясь по выставкам и на предприятиях с ее развитием и новыми применениями.

¹ Так его именовали в послужных списках, представляемых попечителю учебного округа.

22 сентября 1883 г. Арнольд выступил с «пробной лекцией» (*Venia legendi*) «Передача электрической энергии», а 9 октября 1883 г. попечитель Дерптского учебного округа (в чьем ведении до 1893 г. находился Рижский политехнический институт) по представлению директора и совета Института утвердил Арнольда в звании приватдоцента и разрешил ему читать лекции по машиностроению по программе, включающей также электротехнические знания.

В качестве самостоятельного обязательного предмета электротехника вошла в учебную программу Института в 1886 г. когда произошла коренная перестройка механического отделения. В связи с чтением курса по новой специальности² Арнольду в этом году было присвоено звание доцента. В 1887 г. по инициативе Арнольда были собраны специальные средства (10 000 руб.) на устройство электротехнической лаборатории, а в 1889 г. устройство лаборатории было закончено и Арнольд докладывал об ее оборудовании на заседании Рижского технического общества [Л. 3, 4]. Устройство лаборатории привело к соответствующему изменению в программе по электротехнике: были введены занятия в лаборатории, в том числе работы с электрическими машинами; был расширен теоретический курс и включено составление проектов осветительных установок и конструирование электрических машин и аппаратов.

Рижский политехнический институт был одним из первых в мире и первым в России институтом, в котором началась подготовка инженеров-электриков.

Со времени своего приезда в Ригу Арнольд активно участвует в работе Рижского технического общества, которое образовалось еще в 1858 г. Общество с 1876 г. издавало двухнедельный журнал «*Rigasche Industrie Zeitung*», в котором Арнольд помещал свои статьи. С 1882 г. в течение 10 лет он входил в состав редакции журнала.

В Рижском техническом обществе Арнольд систематически выступал с докладами. В октябре 1887 г. он сделал доклад об электрических аккумуляторах [Л. 3]. В ту пору он подобно другим электротехникам придавал большое значение этим вторичным источникам электрической энергии. В марте 1891 г. при обсуждении в Техническом обществе доклада Н. М. Озмидова «Трансформаторы и аккумуляторы на центральных электрических станциях» Арнольд так изложил свою точку зрения: «Большим недостатком переменного тока является невозможность непосредственно запасать электрическую энергию в аккумуляторах. Аккумуляторы крайне необходимы, почти незаменимы на городских центральных электростанциях ... они (аккумуляторы) всегда готовы к действию... Аккумуляторы можно больше нагружать, чем электрические машины, и они обеспечивают лучший, чем электрические машины, привод машин, независимый от колебаний тока.

² Одновременно ему было поручено чтение лекций по деталям машин и простым машинам, а также руководство упражнениями по их проектированию [Л. 1].

Кроме того, надо указать, что этот привод рациональней, так как котел, паровая и динамо-машины всегда должны работать под полной нагрузкой, чтобы был хороший к. п. д.» [Л. 5]. При этом, однако, Арнольд подчеркнул, что он не причисляет себя к противникам переменного тока и что переменному току принадлежит большое будущее в передаче энергии на далекие расстояния благодаря применению высоких напряжений.

Арнольд очень разносторонне знакомился со всевозможными применениями техники, особенно в области электротехники. На заседании Технического общества, обсуждавшем в марте 1888 г. доклад Шпора о химических действиях электричества и его применении в металлургии и гальванопластике, Арнольд отмечал, что в Италии медь получается непосредственно из руды электролитическим путем и что очень важное значение имеет применение электричества для получения алюминия [Л. 6].

В марте 1891 г. Арнольд выступил в Техническом обществе с большим докладом «Магнитная индукция, динамо-машины и трансформаторы», в котором осветил развитие и достижения электротехники и продемонстрировал, в частности, динамо-машину собственной конструкции. Рассматривая в связи с открытием Герца вопрос о существе электричества, Арнольд отмечал возможность передачи электрической энергии как по проводам, так и без проводов [Л. 7].

Динамо-машина была изготовлена Русско-балтийским электротехническим заводом и демонстрировалась на заседании Рижского технического общества в марте 1891 г.

Э. Арнольд занимался также механическим и электротехническим оборудованием промышленных предприятий; он участвовал, в частности, в устройстве воздушной проволочной дороги на цементном заводе «Пахра» в Подольске [Л. 8].

В Риге Арнольд написал два фундаментальных научных труда. Арнольд шел к электротехнике не от физики, как большинство ученых того времени, а от машиностроения; книга «Детали машин» [Л. 9] была началом этого пути. Она включала 129 таблиц (in folio), содержащих чертежи, текстовой материал (расчетные формулы, таблицы), графостатические расчеты и графические построения. В книге были не только рассмотрены всевозможнейшие детали машин, в прямом смысле слова, но также их применение в сложном сочетании. Журнал Общества германских инженеров, поместивший подробную рецензию об этой книге, писал о ней, как об основах новой науки машиностроительного конструирования [Л. 10].

О большой степени личного участия Арнольда в составлении этого труда можно судить по таким фактам. Под его непосредственным руководством в Институте выполнялась подавляющая часть машиностроительных конструкций: 468 листов в 1888/1889 и 758 и в 1889/1890 учебных годах [Л. 1]. Именно эти чертежи и были положены в основание таблиц книги «Детали машин».

В том же 1889 г. Арнольд поместил в RIZ большую статью (с 30 чертежами) «Расчет и кон-

структуря насосных вентиляй» [Л. 11], в которой он комментировал книгу и показывал, как ею пользоваться.

Другая, написанная в Риге спустя 2 года, книга Арнольда «Якорные обмотки динамо-машин постоянного тока» [Л. 12] систематизировала один из коренных вопросов электромашиностроения. Она имела подзаголовок: «проявление и применение всеобщего правила включения». В этой книге вначале выяснялась роль проводников в магнитном поле и основные типы их соединений в обмотки в целях генерирования электрического (постоянного) тока, а затем рассматривались различные разновидности обмоток и их свойства. На этих свойствах Арнольд остановился в предисловии к книге: «Отличительные и общие свойства различных обмоток могут быть точно установлены при помощи правила включения. Родство колышевых, барабанных и дисковых обмоток при этом становится отчетливым и переход от одной обмотки к другой выполняется без трудностей. Правило включения³ охватывает, однако, не только известные обмотки, но позволяет многое больше — оно дает общее решение обмоточной проблемы. При его помощи и посредством изложенных в первом разделе способов соединения индуктированных проводников возможно проектировать новые обмотки. В последующих разделах представлены многие обмотки, до этого мне неизвестные».

Как видно из сказанного, Арнольд в самой начальной стадии проектирования и выполнения обмоток электрических машин сумел построить стройную их систему, в которой размещались также еще неизвестные их разновидности. Заслуга Арнольда была сразу оценена современниками. В 1892 г. журнал Общества германских инженеров поместил на эту книгу Арнольда рецензию Зейфера, в которой отмечалось: «Якорные обмотки, т. е. соединение отдельных якорных частей машин постоянного тока определяется большей частью эмпирически... Первые соединения катушек двухполюсных колышевых и барабанных машин выполнялись в строгом заводском секрете... однако постепенно число предложенных и, частично, выполненных соединений заметно выросло, и поэтому появилась насущная необходимость их упорядочить и установить закон, с помощью которого можно было бы выполнить новые соединения. Автор дал такой закон... Изложение сжато и кратко, так что читается не легко. Но труд, затраченный на штудирование книги, богато вознаграждается чрезвычайно поучительным проникновением в, неожиданную часто, тесную зависимость, в которой находятся друг к другу почти все разнообразные обмотки» [Л. 13].

Этот фундаментальный труд о системе обмоток стал как бы путеводной линией в творчестве Арнольда и трижды переиздавался в XIX в. В 1902 г., когда Арнольд приступил к обширной (трехтомной) монографии по электрическим машинам постоянного тока, «Якорные обмотки» были включены в нее. Затем в пятитомном труде

Арнольда по машинам переменного тока работа об обмотках заняла отдельный том, в который входили и обмотки машин постоянного тока. Существенно отметить, что при полной переработке «Техники переменного тока» для 2-го издания, Арнольд перерабатывал III том («Обмотки») лично сам, тогда как в переработке других томов участвовали также Лякур, Брагстад и Френкель. Лякур, осуществлявший после смерти Арнольда выпуск 2-го издания, в предисловии к третьему тому «(Обмотки)» писал: «Это область, которой составитель посвятил большую часть своих жизненных сил и в которой он навсегда связал свое имя с электротехникой».

Почему же Арнольд с таким пристальным вниманием относился к обмоткам машин?

Проф. Ф. Штир [Л. 14] указывает, что в начале развития электротехники обмотки были наиболее сложной и беспокойной областью, а потому и наиболее привлекавшей к себе внимание инженеров и ученых. «Эти капризные устройства, которые совсем не подходят для машиностроения, состоят из двух материалов с противоположными свойствами: проводник из меди или алюминия, т. е. из материала с высокой проводимостью, и непроводник (например, хлопчатая бумага или бумага), которым обмотан проводник и который имеет задачу предотвратить преждевременное соединение зарядов противоположной полярности. При этом в противоречии с законом Видемана—Франца электрический изолятор должен обладать возможно лучшей теплопроводностью для отвода тепла, выделяемого в проводнике током».

Несомненно, что противоречивые свойства материалов, из которых состоит обмотка, привлекали внимание Арнольда. Но интерес Арнольда к обмоткам имел, как нам кажется, и более глубокие корни. В замкнутых проводниках, перемещающихся в магнитном поле, преобразуется электрическая энергия подобно тому, как паровая энергия образуется в обтекаемых пламенем водяных трубах паровых котлов; здесь происходит основной технологический процесс, и поэтому наиболее рациональное выполнение обмоток прежде всего обеспечивает наиболее экономическое и технически совершенное решение конструкции электрической машины.

На протяжении рижского периода своей жизни Арнольд несколько раз выезжал за границу: летом 1885 г. на шахты и машиностроительные заводы Вестфалии (Германия) и на Всемирную выставку в Антверпене; зимой 1887 г. в Швейцарию; летом 1890 г. в Дессау; летом 1891 г. в разные места. Он жадно изучал развитие электротехники во всей Европе и не мог не стремиться к деятельности более широкой, чем это можно было осуществить в Риге. В 1891 г. Арнольд принял предложение возглавить электротехнический отдел крупного машиностроительного завода «Эрликон» в Цюрихе.

Расставание с основанной им электротехнической кафедрой в Риге, где он проработал 11 лет, было для него, как это видно из архивных материалов, не легким [Л. 1].

На заводе «Эрликон» Арнольд проработал

³ Разрядка наша. — М. К.

с 1891 по 1894 г. За этот короткий срок он поставил там производство ряда электрических машин.

В 1894 г. Арнольд был приглашен для педагогической деятельности в Высшее техническое училище в Карлсруэ (Германия), где и работал до своей смерти в 1911 г. Под его руководством при училище в 1896—1898 гг. был сооружен Электротехнический институт, долгое время являвшийся образцом для германских технических институтов. Институт был оборудован многими лабораториями и собственной электростанцией, что обеспечило широкое проведение исследований для электропромышленности. Арнольдом, который был не только профессором, но и директором этого Института, была организована крупнейшая электротехническая школа и был создан в короткий срок упомянутый выше монументальный труд по электромашиностроению, который, по выражению Лякура, «мог возникнуть только потому, что создание предпринял человек со столь редкой трудоспособностью и нестигаемой энергией». Три тома «Машин постоянного тока» и пять томов «Техники переменного тока» являются не только учебными книгами, но и творчески обогащенным их автором результатом переработки богатых практических данных, результатом слияния теории и практики, что было особенно важно как для студентов, так и для инженеров-электротехников.

Эти труды были переведены на многие иностранные языки, они многократно переиздавались и стали программной книгой электромашиностроения.

Как инженер и ученый Арнольд многое успел за 55 лет своей жизни. Он провел глубокие исследования по важнейшим вопросам электромашиностроения (по обмоткам машин и по коммутации машин постоянного тока), составил стройную картину учения об электрических машинах, развел преподавание высшей электротехники как самостоятельной дисциплины в Рижском политехническом институте и в Электротехническом институте в Карлсруэ и создал научно-технические основы для развития «Русско-балтийского электротехнического завода» и завода «Эрликон».

Арнольд был человеком широкого кругозора. «Специальное образование, — говорил он студентам, — само по себе недостаточно для формирования человека. В высшей технической школе для воспитания совершенного человека должно изучаться больше, чем до сих пор, предметов. Тогда мы имели бы большую уверенность, что в будущем ваша работа будет посвящена человечеству и величию и пользе Родины. Наука о народном

хозяйстве, история, особенно история культуры, а также философия являются областями знания, которые необходимы для инженерного воспитания. Они должны расширить горизонт над специальными знаниями, учить критике наших знаний и высшему порядку всех вещей» [Л. 14].

В 1906 г. в ректорской речи⁴ Арнольд высказал глубоко оптимистическую мысль: «Иследователю и изобретателю нет границ. Природа остается для людей вечным источником работы и счастья».

Литература

1. Центр. гос. архив Латвийской ССР, Фонд 7175, опись 1, дело 68, Л. 1—7; 8—15; 16—20; 38; 25; 28—33; 40—41; 45.
2. Programm der polytechnischen Schule zu Riga für des Studienjahr, 1881/1882, 1882/1883, 1883/1884, 1885/1886, 1886/1887, 1887/1888, 1891/1892.
3. Протокол № 883 Техн. о-ва с докладом „Электрические аккумуляторы“, Rigasche Industrie Zeitung (RIZ), стр. 223, № 19, 1887.
4. Протокол № 925 Техн. о-ва с докладом „Об устройстве электротехнической лаборатории в Политехникуме“, RIZ, стр. 66, № 6, 1889.
5. Протокол № 971 Техн. о-ва, Дискуссия по докладу Н. М. Озмидова „Трансформаторы и аккумуляторы на центральных электрических станциях“, RIZ, стр. 155, № 14, 1891.
6. Протокол № 902 Техн. о-ва: доклад Шпора „Химические действия электричества и его применения в металлургии и гальванопластике“ RIZ, стр. 134, № 12, 1888.
7. Протокол № 973 Техн. о-ва с докладом „Магнитная индукция, динамомашины и трансформаторы“, RIZ, № 16, стр. 187, 1891.
8. Б. И. Угримов. Памяти профессора Э. Арнольда, „Бюллетени общества электротехников“, № 66, 1911.
9. С. Л. Молл, professor und E. Arnold, docens. Конструкторские таблицы по машиностроению. Детали машин. Riga, bei Aleksander Stieda, 1889.
10. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, B. XXXIII, стр. 1055, № 44, 1889.
11. Расчет и конструкция насосных вентиляций (к пользованию „Конструкторскими таблицами по машиностроению“ Моля и Арнольда), RIZ, стр. 145, 155, № 13 и 14, 1889.
12. E. Arnold, Якорные обмотки динамо-машин постоянного тока. Проявление и применение всеобщего правила включения, 1891.
13. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, B. XXXVI, стр. 1499, № 51, 1892.
14. Friedrich Stier, Энгельберт Арнольд. Elektrotechnische Zeitschrift (Ausgabe A), B. 77, стр. 178, № 6, 1956.

*Кандидат техн. наук М. О. КАМЕНЕЦКИЙ
Ленинград*

⁴ В 1906—1907 гг. Арнольд был ректором Высшего технического училища в Карлсруэ.



ДИСКУССИИ

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

(статья Н. М. Мельгунова, *Электричество*, № 2, 1957)

Доктор техн. наук, проф. Ю. Г. ТОЛСТОВ
Москва

Н. М. Мельгунов поднимает весьма важный вопрос об использовании постоянного тока для дальних электропередач, которые, несомненно потребуются в будущем для передачи больших количеств электрической энергии от мест ее производства в промышленные районы нашей страны.

Вопрос о преимуществах постоянного тока перед переменным при передаче электроэнергии на большие расстояния не является новым. Многочисленные технико-экономические исследования, проведенные в Советском Союзе и за границей, убедительно показывают, что экономической границей дальности электропередачи переменного тока является 500...600 км при передаваемых мощностях выше 700...800 Мвт. Передавать такие мощности на большие расстояния экономически целесообразнее при помощи постоянного тока высокого напряжения. Поэтому не вызывает сомнений утверждение Н. М. Мельгунова о том, что рассматриваемые им конкретные электропередачи при блочном их исполнении более экономичны при постоянном токе, чем при переменном.

Однако автор статьи недооценивает значения промежуточного отбора электрической энергии от рассматриваемых электропередач. Вряд ли в нашей стране возможно, чтобы на протяжении тысячи километров между электростанцией и центром потребления не было или не появилось ни одного существенного потребителя электрической энергии. Чисто магистральные передачи возможны лишь в виде исключения.

Трассы линий электропередач, рассматриваемых в статье Н. М. Мельгунова (Красноярск — Свердловск, Павлодар — Свердловск, Донбасс — Москва), пройдут по местностям, весьма богатым природными ресурсами, около больших городов, и, несомненно, возникает потребность в промежуточном отборе значительной части передаваемой энергии.

Между тем вопрос о промежуточном отборе энергии от линий постоянного тока еще не решен и решение его не является таким простым, как это может показаться после прочтения статьи Н. М. Мельгунова. Отсутствие в настоящее время технического решения этой проблемы является одной из главных причин того, что применение постоянного тока для ряда конкретных передач встречает возражения.

Предлагается ряд способов осуществления промежуточного отбора энергии от линий постоянного тока, а именно: при помощи параллельного или последовательного инвертора, при помощи вставки переменного тока и через конденсаторы. Все эти способы принципиально осуществимы, но разработка проблемы находится в самой начальной стадии. Нам представляется, что один, а может быть и несколько из этих способов дадут вполне приемлемое с технико-экономической точки зрения решение проблемы отбора. Поэтому неправильно ориентироваться только на магистральные передачи, как это делает Н. М. Мельгунов.

В статье, посвященной перспективам электропередач постоянного тока, следовало бы затронуть все главнейшие аспекты применения таких передач. Между тем в рассматриваемой статье совершенно не затронут вопрос об использовании передач постоянного тока для межсистемных связей.

В связи с созданием единой высоковольтной сети связь отдельных энергосистем между собой приобретает исключительно важное значение. Объединение мощных энергосистем при помощи линий переменного тока вызывает значительные затруднения из-за трудности обеспечить устойчивую параллельную работу этих систем. Между тем системы, связанные линией постоянного тока, мо-

гут работать при разных частотах; по связывающей их линии постоянного тока может быть обеспечена передача наперед заданной строго постоянной мощности. Подобную межсистемную связь постоянного тока мощностью около 100 Мвт намечено осуществить между энергосистемами Англии и Франции через Ламанш.

Следует отметить еще один немаловажный аспект применения постоянного тока. Мы имеем в виду увеличение пропускной способности существующих трехфазных линий путем перевода их на постоянный ток более высокого напряжения при сохранении того же уровня линейной изоляции. Этот вопрос только упомянут в статье Н. М. Мельгунова, а между тем он имеет серьезное экономическое значение.

Перевод некоторых существующих трехфазных линий на постоянный ток является наиболее дешевым способом значительного увеличения их пропускной способности, что наиболее быстро экономически оправдывает применение постоянного тока. Например, в Швеции в настоящее время прорабатывается вопрос о переводе некоторых трехфазных линий 220 кв на постоянный ток 500 кв (± 250 кв).

При сравнении стоимости передачи электроэнергии со стоимостью перевозки топлива по железной дороге не следует недооценивать значения развивающейся атомной энергетики, рассмотрение которой Н. М. Мельгуновым оставлено в стороне. Между тем развитие этой отрасли энергетики может совершенно по-иному поставить вопрос о дальних передачах вообще, так как стоимость перевозки атомного топлива ничтожно мала и не оказывает никакого влияния на стоимость энергии.

Вопросу стоимости электроэнергии, получаемой от атомных электростанций, посвящено много работ, и в настоящее время имеется возможность произвести хотя бы ориентировочное технико-экономическое сопоставление ряда конкретных дальних передач с атомными электростанциями в местах потребления электроэнергии. В иностранной литературе такие исследования уже начинают появляться и нам представляется неоправданным при рассмотрении перспектив электрификации и строительства дальних передач не учитывать столь важного фактора.

В заключение заметим, что при технико-экономической оценке передач постоянного тока Н. М. Мельгунов совершенно не затронул вопроса о компенсации реактивной мощности инверторов. Затраты средств на эту компенсацию значительно удороожают преобразовательные подстанции. Нам представляется, что учет этого фактора, как одного из недостатков передач постоянного тока, не очень сильно повлиял бы на окончательные выводы, так как основные капиталовложения приходятся на линии передач, однако объективности ради этим надо следовать бы пренебрегать.

Кандидат техн. наук И. Ф. ПОЛОВОЙ
Ленинград

Возможны две постановки вопроса об использовании постоянного тока: 1) для специальных случаев электропередач; 2) для электропередач напряжением 400 кв и выше, которые должны широко внедряться взамен электропередач переменного тока.

К специальным относятся такие случаи электропередач, в которых необходимость применения кабельных линий обеспечивает постоянному току подавляющие экономические преимущества, например электропередачи между островами. Сюда же относятся случаи, когда электропередача связывает две энергосистемы переменного тока с разной рабочей частотой. Целесообразность применения постоянного тока в таких случаях не вызывает сомнения

и применительно к ним разрабатывается проблема постоянного тока за границей, главным образом в Швеции и Японии.

В статье Н. М. Мельгунова рассматривается вопрос во второй постановке, согласно которой создание ЕВС Европейской части СССР путем строительства линий переменного тока напряжением 400 кв есть временное решение, вынужденное технической недоработанностью некоторого оборудования для передач постоянного тока. Поэтому делается вывод о необходимости форсировать разработку оборудования постоянного тока с тем, чтобы в будущем развитие сетей напряжением выше 220 кв происходило за счет строительства линий постоянного тока. Такая постановка вопроса нуждается в серьезном обосновании.

В настоящее время ясно, что электропередачи переменного тока технически обеспечивают весь возможный в условиях Советского Союза диапазон дальности и мощности. Поэтому широкое внедрение электропередач постоянного тока может быть обосновано только значительными экономическими выгодами этого мероприятия.

Для экономического сопоставления дальних электропередач переменного и постоянного тока нужны следующие исходные данные: соотношение капитальных затрат на 1 км линии электропередачи; соотношение капитальных затрат на концевые устройства в рублях на киловатт; соотношение потерь энергии в линиях и в концевых устройствах; соотношение нормы ежегодных отчислений от капитальных затрат при определении суммы ежегодных расходов.

Приводимые ниже перечисленные соотношения установлены на основании данных технического проекта электропередачи Сталинградская ГЭС — Донбасс и данных Теплоэлектропроекта о стоимостных показателях перспективных электропередач переменного и постоянного тока (на 10...15 лет вперед), а также на основании выдвинутого Н. М. Мельгуновым положения о том, что передачи переменного и постоянного тока одного номинального напряжения являются эквивалентными по техническим требованиям к изоляции. При этом за номинальное напряжение передачи переменного тока принималось линейное напряжение, например 600 кв, а передачи постоянного тока — напряжение относительно земли, например ± 600 кв.

Сопоставление по капитальным затратам. При одинаковой передаваемой мощности для сравнения целесообразно брать линии электропередачи с одинаковой плотностью тока. В этом случае передача переменного тока будет иметь относительно большие потери в проводах, что компенсируется относительно большими потерями в концевых устройствах передачи постоянного тока. В результате обе системы будут иметь одинаковую мощность и приблизительно одинаковый к. п. д., т. е. окажутся технически сопоставимыми.

При одинаковой мощности и плотности тока соотношение сечений проводов в фазах $s'_1:s'_2 = I_1:I_2 = 2:\sqrt{3} = 1,15$, а соотношение суммарных сечений проводов линий электропередачи $s_1:s_2 = 1,72$.

Исследования гирлянд изоляторов, проведенные в 1955—1956 гг. в лаборатории техники высоких напряжений им. А. А. Горева Ленинградского политехнического института и в Научно-исследовательском институте постоянного тока, показали, что мокроразрядные напряжения при переменном и постоянном токе относятся не как амплитудные, а как действующие значения напряжения. Поэтому при расчетной кратности внутренних перенапряжений для электропередачи переменного тока 2,5, а для постоянного тока 2,0 соотношение числа изоляторов на линиях электропередачи:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{3 \cdot 2,5 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}}{2 \cdot 2 \cdot U} = 1,08.$$

Разница между количествами изоляторов в 8% практически не скажется на соотношении стоимостей линий электропередачи. Следовательно, соотношение стоимостей линий электропередачи на 1 км $a_{n1}:a_{n2}$ должно определяться в основном разницей суммарного сечения проводов и в

меньшей степени разницей в габаритах и конфигурации двухполюсных и трехфазных опор.

Если считаться только с разницей между общими сечениями проводов, то соотношение $a_{n1}:a_{n2}=1,29$. Эта величина вытекает из того, что по данным Теплоэлектропроекта для линии переменного тока 600 кв с расщеплением фаз на четыре провода изменение суммарного сечения на 1% вызывает изменение стоимости линии на 0,4%. Проверить это соотношение непосредственным сравнением стоимостей линий электропередачи с одинаковым сечением проводов на полюс и фазу, к сожалению, не предсталось возможным.

Имеются данные Теплоэлектропроекта о стоимости линий с одинаковыми напряжениями 600 и ± 600 кв, но с разными сечениями проводов. При этом 1 км линии 600 кв с проводами в фазе $4 \times \text{ACO}-712$ стоит 526 тыс. руб., а линии ± 600 кв с проводами в полюсе $3 \times \text{ACO}-712$ — 315 тыс. руб. Из данных Теплоэлектропроекта можно получить, что за вычетом постоянной составляющей стоимость линии 600 кв, отнесенная к 1 мм^2 сечения проводов, составляет около 120 руб./км. При этом соотношение стоимостей 1 км линий 600 кв

$$\frac{a_{n1}}{a_{n2}} = \frac{526}{315 + 120 \times 0,712} = 1,31.$$

Эта цифра и была принята для дальнейших сравнительных расчетов.

Соотношение стоимостей подстанций постоянного и переменного тока $\frac{a_{n1}}{a_{n2}}$ может быть установлено только на

основании проектных материалов. По данным технического проекта электропередачи Сталинградская ГЭС — Донбасс это соотношение равно 0,50, а по данным Теплоэлектропроекта, разработанным для сопоставления электропередач переменного и постоянного тока, оно колеблется от 0,557 до 0,580.

Однако в последних данных расход реактивной мощности в преобразователях на выпрямляющем конце совершенно не учитывается, так как считается, что он будет покрываться генераторами электростанций и синхронных компенсаторов для этой цели устанавливать не придется, что представляется спорным. На инверторном конце расход реактивной мощности считался по норме 0,5 квар на 1 квт. Кроме того, неясен вопрос о том, как учитывать экономию реактивной мощности в линиях переменного тока при передаче по ним активной мощности, меньшей натуральной. Поэтому нам кажется более правильным при сопоставлениях исходить из соотношения $a_{n1}:a_{n2}=0,5$.

По данным Теплоэлектропроекта стоимость понижающих и повышающих подстанций передачи постоянного тока ± 600 кв $a_{n2}=250$ руб./квт максимальной рабочей мощности, в том числе стоимость преобразовательных устройств равна 90 руб./квт, или 36% общей стоимости подстанций. Для подстанций ± 400 кв $a_{n2}=175$ руб./квт.

Электропередачи переменного тока требуют дополнительных затрат на повышение пропускной способности (переключательные посты, продольная и поперечная компенсация). Для электропередачи Куйбышевская ГЭС — Москва эти дополнительные затраты составили менее 10% общей стоимости (включая повысительную подстанцию). Если принять, что они составят 10%, то будет иметь место следующее соотношение, определяющее область преимущества электропередачи постоянного тока по капитальным затратам:

$$1,1(1,31a_{n2}l_0 + 0,5a_{n2}P) = a_{n2}l_0 + a_{n1}P,$$

$$l_0 = 1,02 \frac{a_{n2}}{a_{n1}} P \text{ или } l_0 = 2,69 \frac{a_{n1}}{a_{n2}} P; \quad (1)$$

где l_0 — длина электропередачи, км, при которой капитальные затраты одинаковы для переменного и постоянного тока;

P — максимальная рабочая мощность электропередачи на цепь, Мвт;

a_{n2} и a_{n1} — стоимость подстанций постоянного и переменного тока, руб./квт;

a_{n2} и a_{n1} — стоимость линий постоянного и переменного тока, руб./км.

¹ Здесь и ниже индекс 1 относится к переменному, а индекс 2 к постоянному току.

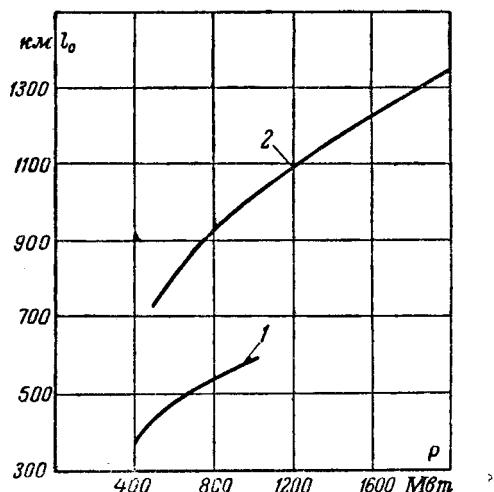


Рис. 1. Зависимость длины l_0 , начиная с которой электропередача постоянного тока требует меньших капитальных затрат, чем электропередача переменного тока, от мощности передачи на цепь.
1 — электропередачи 400 и ± 400 кв; 2 — электропередачи 600 и ± 600 кв.

На рис. 1 приведены кривые $l_0 = \varphi(P)$, построенные по выражению (1) для передачи 400 и 600 кв переменного тока и ± 400 и ± 600 кв постоянного тока. При построении кривых стоимости линий электропередач определялись исходя из плотности тока $j = 0,6 \text{ а/мм}^2$. Значение a_{n2} для подстанций ± 400 кв принято равным 175 руб/квт, а для подстанций ± 600 кв 250 руб/квт. Выражение (1) и кривые рис. 1 позволяют сделать следующие выводы.

Длина l_0 , начиная с которой электропередача постоянного тока становится по капитальным затратам выгоднее, сильно зависит от номинального напряжения. Повышение номинального напряжения снижает эффективность постоянного тока. Это объясняется значительным снижением стоимости линии на 1 квт передаваемой мощности.

При $U_n = \text{const}$ значение l_0 зависит от максимальной рабочей мощности, увеличиваясь вместе с нею. Это объясняется увеличением удельного веса стоимости подстанций в общей сумме капитальных затрат.

При напряжении 400 и ± 400 кв и мощности 500...600 Мвт на цепь электропередача постоянного тока дает экономию капитальных затрат при длине больше 420...470 км. При напряжении 600 и ± 600 кв и мощности 1500...2000 Мвт на цепь экономия капитальных затрат может быть получена при длине электропередачи больше 1200...1300 км.

Основное значение имеет не принципиальная возможность экономии капитальных затрат, а размеры возможной экономии. Соотношение капитальных затрат по передаче в целом

$$\eta = \frac{K_1}{K_2} = \frac{a_{n1}l + a_{n1}P}{0,7a_{n1}l + 1,82a_{n1}P}. \quad (2)$$

Для электропередач 400 и ± 400 кв мощностью 600 Мвт на цепь и дальность 600 км $\eta_1 = 1,045$, а дальностью 850 км $\eta_2 = 1,12$. Для электропередач 600 и ± 600 кв мощностью 1500 Мвт на цепь и дальностью 1500 км $\eta_3 = 1,045$, а дальностью 2000 км $\eta_4 = 1,12$.

Приведенные значения η показывают, что для типичных значений мощности и дальности электропередач 400 кв ЕВС, а также для типичных значений дальности и мощности возможных электропередач 600 кв размеры экономии капитальных затрат от внедрения системы постоянного тока даже в случае магистральных электропередач (т. е. без учета выключателей постоянного тока) будут находиться в пределах 5...10 %.

* Эти цифры получены исходя из стоимости линии 400 кв при $P = 600$ Мвт 295 тыс. руб/км, а линии 600 кв при $P = 1500$ Мвт 425 тыс. руб/км. Значение a_{n1} бралось из соотношения $a_{n1} : a_{n2} = 0,5$.

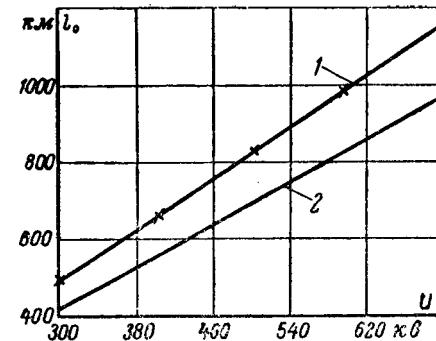


Рис. 2. Зависимость длины l_0 , начиная с которой потери в электропередаче постоянного тока меньше, чем в электропередаче переменного тока одинаковой мощности, от напряжения.

1 — при плотности тока в проводах 0,6 а/мм²; 2 — при плотности тока в проводах 0,5 а/мм².

Сопоставление по потерям энергии. При одинаковой плотности тока в проводах соотношение потерь в линиях переменного и постоянного тока $W_{A1} : W_{A2} = 1,72$. Соотношение потерь на подстанциях по данным проекта электропередачи Сталинградская ГЭС—Донбасс $W_{n1} : W_{n2} = 0,55$, причем потери на подстанциях постоянного тока этой электропередачи $\Delta P_{n2} = 4,1\%$ передаваемой мощности.

На основании этих данных получается следующее выражение для условия равенства потерь в электропередачах переменного и постоянного тока:

$$1,72\Delta P_{A2}l_0P + 0,55\Delta P_{n2}P = \Delta P_{A2}l_0P + \Delta P_{n2}P. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что потери на единицу передаваемой мощности в единице длины линии постоянного тока

$$\Delta P_{A2} = \frac{\rho j}{U} 10^{-3}, \quad (4)$$

из выражения (3) получим:

$$l_0 = 0,625 \frac{\Delta P_{n2}}{\rho j} 10^3 U, \quad (5)$$

где l_0 — длина линии, км, при которой потери в электропередачах постоянного и переменного тока одинаковы;

ΔP_{n2} — относительная величина потерь энергии на подстанциях постоянного тока;

ρ — удельное сопротивление провода на 1 км длины, $\rho = 31 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$;

j — расчетная плотность тока, а/мм²;

U — номинальное напряжение линий, кв.

На рис. 2 приведены кривые $l_0 = \varphi(U)$ при плотности тока $j = 0,5$ и $j = 0,6 \text{ а/мм}^2$.

Размер экономии потерь определяется выражением

$$\xi = \frac{1,72\Delta P_{A2}l + 0,55\Delta P_{n2}}{\Delta P_{A2}l + \Delta P_{n2}}. \quad (6)$$

При напряжении 400 и ± 400 кв и дальности 600 км $\xi = 1,025$; при напряжении 600 и ± 600 кв и дальности 1500 км $\xi = 1,17$. В обоих случаях плотность тока принималась равной 0,6 а/мм².

Сопоставление по ежегодным расходам. Для электропередачи постоянного тока сопоставление по ежегодным расходам менее благоприятно, чем по капитальным затратам и потерям. Это объясняется тем, что норма ежегодных отчислений от стоимости линии значительно ниже, чем от стоимости оборудования подстанций.

В рассматриваемой статье для электропередач постоянного тока принимается та же норма ежегодных отчислений, что и для электропередач переменного тока, т. е. 3,5 % стоимости линии и 7 % стоимости подстанций. Однако норма ежегодных отчислений от стоимости оборудования подстанций электропередачи постоянного тока должна быть значительно выше ввиду большого удельного веса стоимости преобразовательных устройств (36%). Эксплуатация вентиляй гораздо сложнее эксплуатации высоковольтного оборудования переменного тока. В настоящее время вентили требуют полной переборки, т. е. капитального ремонта в среднем не реже 1 раза в год. Вопрос о норме ежегодных отчислений от стоимости подстанций постоянного тока еще не решен.

Вторым вопросом, требующим специального рассмотрения, является вопрос об удельном весе стоимости потери энергии в общей сумме ежегодных расходов. Для дальних электропередач в первом приближении удельный вес стоимости потерь можно принять равным 30 %. Снижение этой цифры, соответствующей к. п. д. около 92 % и стоимости энергии 7...8 коп/квт·ч, благоприятно для электропередачи переменного тока и неблагоприятно для электропередачи постоянного тока.

Соотношение стоимостей потерянной энергии $A_{n1}:A_{n2} = \xi$. Соотношение отчислений от капитальных затрат определяется выражением

$$\frac{A_{k1}}{A_{k2}} = \frac{a_{n1}l \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} + a_{n1}P \cdot 7 \cdot 10^{-2} + 0,1(a_{n1}l + a_{n1}P)7 \cdot 10^{-2}}{0,763a_{n1}l \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} + 2a_{n1}P\Delta K_{n2}}, \quad (7)$$

где ΔK_{n2} — норма ежегодных отчислений от стоимости подстанций постоянного тока.

В таблице даны результаты сопоставления ежегодных затрат на электропередачу переменного тока 400 кв и постоянного тока ± 400 кв; $P=600$ Мвт на цепь, $l=600$ км и ежегодных затрат на электропередачу переменного тока 600 кв и постоянного тока ± 600 кв, $P=1500$ Мвт на цепь, $l=1500$ км.

Относительная экономия ежегодных расходов, которую дают электропередачи переменного тока по сравнению с передачами постоянного тока

ΔK_{n2}	8%	10%	12%
Пример 1: 400 кв, 600 км, 600 Мвт на цепь	8%	16,25%	22,8%
Пример 2: 600 кв, 1500 км, 1500 Мвт на цепь	3,65%	12,8%	18,3%

Выводы. Полученные в настоящей работе результаты не дают оснований ожидать большого экономического эффекта от широкого внедрения в систему передачи и распределения электроэнергии постоянного тока взамен переменного. Возможная экономия капитальных затрат находится в пределах 5...10%. Однако ежегодные расходы и себестоимость передачи энергии при постоянном токе не только не снижаются, но могут увеличиться на 5...10% вследствие необходимости применить более дорогое и сложное оборудование, обслуживание которого является более трудоемким.

Кроме того, необходимо учитывать тенденции развития электропередач сверхвысокого напряжения. Эти тенденции таковы, что чисто магистральные передачи (без промежуточного отбора мощности) длиной более 400...600 км могут иметь место лишь в исключительных случаях, и лет через 15...20 будет сведена на нет и та относительно небольшая экономия капитальных затрат, которая может иметь место в настоящее время при длине линий электропередачи 800...1500 км.

По-видимому, будет правильно ограничить область применения постоянного тока лишь специальными случаями электропередачи.

Следует заметить, что этот вывод основан на методике сопоставления вариантов электропередач равной мощности как наиболее простой и распространенной. Однако возможно сопоставление наиболее оптимальных для каждой системы тока вариантов. Необходимо также уточнить исходные данные, привлекаемые для сопоставления.

Так как рассматриваемый вопрос имеет большое значение, необходима дальнейшая исследовательская работа, которая должна опережать все остальные мероприятия по внедрению электропередачи постоянного тока.



Заметки и письма

К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКИ В ОПОРАХ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТРЕНИЯ

Применение указанной в нашей статье (Электричество, стр. 73, № 9, 1955) схемы измерения представляло недостаток, заключающееся в изменении градуировочной кривой при изменении температуры окружающей среды измерительного и эталонного датчиков. В процессе проведения эксперимента измерительный датчик, поскольку он смонтирован либо в сегмент под пятняка вертикального электродвигателя, либо в корпусе цилиндрического подшипника, принимает температуру, близкую к температуре масла. При различных условиях проведения эксперимента температура может изменяться в довольно широких пределах от $+30^\circ\text{C}$ до $+100^\circ\text{C}$. Поэтому в процессе проведения эксперимента необходимо было измерять температуру измерительного и эталонного датчиков с тем, чтобы при обработке осциллограмм можно было построить градуировочные кривые при температурах, аналогичных температурам при эксперименте.

В дальнейшем нами была разработана методика, свободная от указанного выше недостатка. Изменение калибровки схемы в связи с изменением температуры окружающей среды измерительного и эталонного датчиков

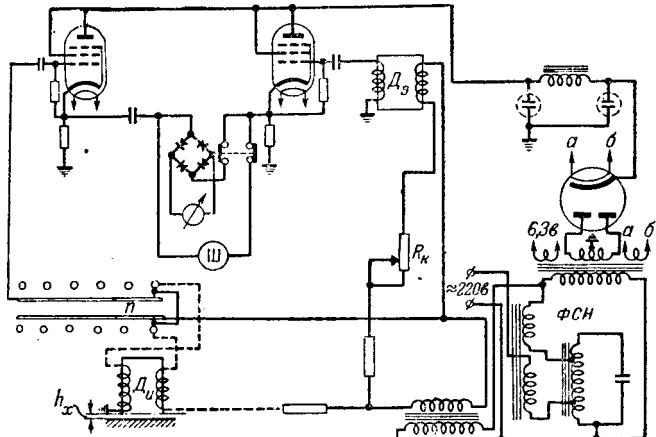
определяется изменением омического сопротивления их вторичных и первичных обмоток.

В цепи первичных обмоток датчиков вводятся добавочные сопротивления, величина которых гораздо больше сопротивления первичных обмоток датчиков. При этом достигается стабилизация тока, протекающего в первичных обмотках. Вторичные обмотки эталонного и измерительного датчиков D_9 и D_u подключаются к мостиковому усилителю, собранному на двух катодных повторителях, в диагональ которого включен вибратор осциллографа $Ш$ (см. рисунок).

Сопротивление «катод — сетка» весьма велико по сравнению с сопротивлением вторичных обмоток датчиков и фактически измеряется э. д. с., индуцированная во вторичных обмотках, не зависящая от сопротивления вторичных обмоток.

При измерении толщины масляной пленки при постоянной скорости вращения вместо вибратора может подключаться через выпрямитель стрелочный прибор магнитоэлектрической системы, шкала которого заранее проградуирована в микронах.

Измерительные датчики могут быть установлены в различных точках исследуемого узла трения и при по-



моши переключателя P могут поочередно подключаться на вход измерительной схемы.

Методика неоднократно применялась авторами в производственных условиях. При этом были получены ценные сведения о параметрах масляной пленки при стационарных и нестационарных режимах работы электродвигателей.

**Инженеры Я. И. Каган и О. И. Богданов
г. Харьков**

ОБ ОШИБОЧНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ПОТЬЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

В учебниках по электрическим машинам излагаются два метода построения векторных диаграмм для электрических машин: метод Блонделя и метод Потье. Векторная диаграмма Блонделя строится для случая различных реактивных сопротивлений по продольной и поперечной осям машины, т. е. эта диаграмма справедлива для явнополюсных машин. Для неявнополюсных машин строится диаграмма Потье, являющаяся частным случаем диаграммы Блонделя при равенстве реактивных сопротивлений по обеим осям машины. Авторы ряда учебников [Л. 1, 2 и 3], признавая теоретическую необоснованность применения векторной диаграммы Потье к исследованию явнополюсных машин, все же рекомендуют ею пользоваться, ссылаясь на то, что для явнополюсных машин при $\cos\varphi=0,8$

диаграмма Потье дает результаты, близкие к действительности.

Такое совпадение объясняется следующим. При постоянном значении U величина тока возбуждения в основном определяется сопротивлением x_{ad} (особенно при $\cos\varphi < 0,8$).

Следовательно, если для явнополюсной машины, работающей при $\cos\varphi < 0,8$, принять $x_a = x_{ad}$ и воспользоваться диаграммой Потье, то найденное при этом значение тока возбуждения будет близко к величине тока возбуждения, полученной из диаграммы Блонделя. Однако углы θ и θ_b в основном определяются сопротивлением x_{aq} и поэтому значения этих углов, полученные из диаграммы Потье и диаграммы Блонделя, будут существенно отличаться друг от друга.

Так, например, расчет, произведенный для явнополюсной синхронной машины с использованием диаграммы Блонделя, показывает [Л. 4, приложение 2], что $\theta = 16^\circ 30'$, $\theta_b = 9^\circ 12'$, $\psi = 53^\circ 20'$, а ток возбуждения в относительных единицах равен 1,64. Используя диаграмму Потье, т. е., принимая $x_{aq} = x_{ad}$, и производя расчет по методу, указанному в [Л. 4, приложение 1], найдем, что $\theta = 21^\circ 40'$, $\theta_b = 14^\circ 22'$, $\psi = 58^\circ 30'$, а ток возбуждения в относительных единицах по-прежнему равен 1,64. В данном случае при вычислении тока возбуждения ошибка, вносимая непринятием различия реактивных сопротивлений по продольной и поперечной осям машины, компенсируется введением в расчет завышенного значения угла θ .

Следует отметить, что при иных значениях параметров машины и нагрузки такого совпадения может и не быть, поэтому применение векторной диаграммы Потье для исследования явнополюсных синхронных машин может привести к значительным ошибкам.

Литература

- Под редакцией Г. И. Петрова, Электрические машины, ч. 1, 1940.
- М. П. Костенко, Электрические машины.
- Л. М. Пиотровский, Электрические машины. Госэнергоиздат, 1949.
- Н. К. Чухин, Графоаналитический метод построения статических характеристик синхронных машин. Электричество, № 4, 1955.

**Кандидат техн. наук, доц. Н. К. Чухин
Московский энергетический институт**



За рубежом

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Кандидат эконом. наук, доц. Р. Я. Бриль

Ленинградский инженерно-экономический институт

Китайская Народная Республика успешно осуществляет преобразование всего народного хозяйства на базе широкого развития индустриализации страны. В решении этой задачи большое внимание уделяется развитию энергетики. Китайские друзья руководствуются указаниями В. И. Ленина о роли электрификации в народном хозяйстве и применяют эти указания к специфическим условиям развития экономики своей страны.

К моменту образования Китайской Народной Республики в Китае имелось несколько совершенных для того времени энергетических предприятий, однако в целом энергетика Китая была крайне отсталой и слабой. На доколониальной энергетике резко сказывались особенности

экономического развития страны, полуколониальный характер ее экономики, кабальная зависимость от империалистических стран, главным образом Японии, США и Англии.

До революции доля иностранного капитала в энергетике Китая непрерывно росла и составляла в 1936 г.—71%, а в 1944 г.—80% (по мощности станций). Борьба различных иностранных группировок и усиление позиций японского империализма привели к резкому росту, особенно с 1931 г., доли японского капитала, которая уже в 1944 г. составила 68,8% (по мощности станций).

Уровень производства электроэнергии в доколониальном Китае был крайне низок. В 1941 г. выработка электроэнергии составила около 6 млрд. квт·ч, или примерно 10...12 квт·ч на человека. Для старого Китая это был наивысший уровень. Многие районы страны не имели вовсе электроэнергии. В стране преобладали мелкие электростанции с низкими технико-экономическими показателями.

Размещение электростанций на территории страны было крайне неравномерным. Преимущественное разви-

тие энергетика получила в северо-восточных районах, где японские империалисты создавали плацдарм против СССР, и в приморских провинциях, где также было сильно развито влияние империалистических стран. В 1947 г. в этих районах Китая было сосредоточено 90% электростанций (по установленной мощности). Во время японской оккупации была осуществлена электрическая связь между станциями Северо-востока Китая и Кореи.

С созданием Китайской Народной Республики было обращено внимание на необходимость коренного преобразования всего энергетического хозяйства страны с тем, чтобы в короткие сроки ликвидировать имеющееся отставание. Были национализированы все электростанции, принадлежавшие иностранному капиталу, и уже к началу 1953 г. 88% всех электростанций (по мощности) находились в руках государства. Остальные станции находились в госкапиталистической, кооперативной и частной собственности. Энергетика страны стала развиваться на основе использования всех преимуществ социалистической плановой системы хозяйства.

За период с 1949 по 1952 г. были восстановлены разрушенные и частично реконструированы существующие электростанции. В результате уже в 1952 г. электроэнергии было выработано значительно больше, чем в 1941 г. Большое внимание было обращено на дальнейшее улучшение работы всех энергетических предприятий. Одновременно началась большая творческая работа по созданию энергетической базы, способной обеспечить энергией возрастающие нужды народного хозяйства.

До 1955 г. районные электростанции и сети находились в ведении Министерства топливной промышленности. В 1955 г. создано Министерство электроэнергетической промышленности, которое и осуществляет руководство проектированием, строительством и эксплуатацией районных электростанций, сетей и систем.

В КНР разработан 15-летний план электрификации страны на период 1953—1967 гг. и первый пятилетний план. В порядке оказания помощи в разработке этих планов принимали участие советские специалисты.

Первый пятилетний план развития энергетики успешно выполняется. Об этом можно судить по следующим данным о росте производства электроэнергии (в млрд. квт·ч):

1941 г.	5,95
1949 г.	4,31
1952 г.	7,26
1956 г.	14,90
1957 г.	15,9 (план)

Имеются основания полагать, что первый пятилетний план производства электроэнергии будет осуществлен досрочно. В предложениях VIII Всекитайского съезда Коммунистической партии по второму пятилетнему плану намечено довести выработку электроэнергии в 1962 г. до 40..43 млрд. квт·ч.

На районных электростанциях и в сетях ведется борьба за осуществление различных мероприятий, улучшающих технико-экономические показатели. О результатах этой борьбы можно судить по следующим данным:

Годы	Средний удельный расход топлива, кг/квт·ч	Расходы электроэнергии на собственные нужды, %	Потери в сетях, %	Число часов использования установленной мощности
1949	0,925	7,73	21,84	2 300
1952	0,659	5,76	12,56	3 680
1956	0,576	5,86	9,54	4 883

Численность персонала на электростанциях КНР пока еще значительна. Частично это объясняется большим количеством обучающихся и включением различного обслуживающего непроизводственного персонала. В 1952 г. удельная численность персонала на станциях и сетях составляла 33 чел./Мвт. Намечено в 1957 г. снизить этот показатель до 26 чел./Мвт.

На вновь строящихся электростанциях широко используется новая техника.

До 1952 г. 76% тепловых электростанций (по мощности) имели давление пара меньше 25 ата и только 0,9%

высокое давление. В первой пятилетке около 32% новых тепловых электростанций намечено соорудить на высоком давлении. В результате к концу пятилетки мощность станций высокого давления увеличится до 8,0%. В 1956 г. доля электростанций высокого давления уже составила 5%. Мощность станций среднего давления (26..35 ата) в 1957 г. составит около 60% всей мощности.

В 1952 г. удельный вес электростанций мощностью менее 3 Мвт составил 58,3% по количеству и 11,5% по мощности, а электростанции мощностью от 3 до 20 Мвт — 33,2% по количеству и 34,2% по мощности. Благодаря строительству более крупных станций с более мощными агрегатами средняя мощность станций и агрегатов увеличивается, что видно из следующих данных:

	1952 г.	1957 г.
Средняя мощность станций, Мвт ..	15,0	21,0
Средняя мощность турбоагрегата, Мвт ..	5,0	7,0

Средняя мощность станций, вводимых в первом пятилетии, составляет 38 Мвт. В первом пятилетии сооружается 19 тепловых электростанций с мощностью выше 50 Мвт.

Для нового Китая характерны очень высокие темпы роста производства электроэнергии. Первым пятилетним планом предусмотрен рост мощности на электростанциях в 2 раза, а рост выработки электроэнергии в 2,3 раза. Более высокий рост выработки объясняется тем, что в использовании существующих мощностей электростанций имелись значительные резервы. Ввиду большой напряженности перспективного электробаланса на следующие пятилетия предусматриваются еще более высокие темпы роста электрической мощности и выработки энергии.

Из общего прироста мощности, намеченного на первое пятилетие, 55% будет осуществлено за счет расширения существующих электростанций, а 45% за счет нового строительства.

В первом пятилетии предусмотрен рост промышленной электронагрузки примерно в 2,3 раза и коммунальной в 1,75 раза. Уже в 1952 г. доля промышленности в общем потреблении электроэнергии составила 82%, а в 1955 г. возросла до 85%. Наиболее крупными потребителями являются металлургическая, угольная и текстильная промышленность. Намечается применение электроэнергии в сельском хозяйстве, причем в ближайшие годы преимущественно на цели орошения. В ближайшие 10—12 лет намечается электрифицировать около 3 000 км железных дорог.

В КНР большое внимание уделяется развитию гидроэнергостроительства.

По запасам гидроэнергетических ресурсов страна занимает одно из первых мест в мире. Общие запасы гидроэнергетических ресурсов Китая исчисляются примерно в 540 Гвт. Если принять, что из них может быть использовано 50..60%, практически запасы составят 300 Гвт. Гидроэнергетические ресурсы размещены по всей стране равномерно и в больших количествах сосредоточены в районах, где отсутствует топливо.

Использование рек носит комплексный характер и связано с решением таких жизненно важных для страны вопросов, как борьба с наводнениями и засухой. В этом отношении большое значение приобретает использование рек Хуанхэ и Янцзы.

Большинство рек отличается благоприятными топографическими и геологическими условиями, что позволяет получить большие количества электроэнергии при относительно небольшом объеме строительных работ. Удельная стоимость строительства гидроэлектростанций в ряде случаев мало превышает удельную стоимость строительства тепловых электростанций, а в некоторых случаях даже ниже ее. Столь высокая эффективность гидроэлектростанций определяет непрерывное повышение их доли в энергетике страны. Удельный вес гидроэлектростанций по мощности в 1952 г. составлял 9,8%, а в 1957 г. согласно плану составит 16,1%. В ближайшие пятилетия предполагается увеличить удельный вес гидроэлектростанций до 35..40%.

В первой пятилетке будет реконструирована Фынманская ГЭС, после чего ее мощность составит 560 Мвт. Она будет полностью автоматизирована. По плану обуздания р. Хуанхэ на ней в ближайшие годы будут строиться две

гидроэлектростанции: Саньмыньская мощностью 1,1 Гвт и Люцясянская мощностью 1 Гвт. Плотина Саньмыньской ГЭС, строительство которой уже началось, будет иметь высоту 90 м. После сооружения плотины население нижнего течения р. Хуанхе избавится от угрозы наводнений. Строительство Саньмыньской ГЭС намечено закончить в 1962 г.

В 1957 г. на верхнем притоке реки Тян Тан Цзян началось строительство ГЭС Синаньцзян мощностью 580 Мвт. Пуск ее намечен на 1961 г. Кроме того, сооружается ряд других гидроэлектростанций.

КНР обладает большими запасами топливных ресурсов. В этих запасах наибольший удельный вес занимают битуминозные угли. Запасы бурых углей сравнительно не значительны. Для дореволюционного Китая было характерно хищническое использование всех видов топлива. В настоящее время в топливном балансе электростанций преобладают менее качественные сорта углей. В перспективе намечается использование на тепловых электростанциях в большом количестве отходов углеобогащения.

В планах электрификации страны предусматривается некоторое развитие теплофикации. Направление и масштабы ее развития в настоящее время тщательно изучаются китайскими энергетиками с учетом особенностей страны (климатические условия, характер застройки и др.). В первой пятилетке из 76 строящихся тепловых электростанций 19 теплоэлектроцентрали, сооружаемые преимущественно при промышленных предприятиях.

Значительное место отводится развитию энергетических систем. Одновременно с реконструкцией существующих Северо-восточной, Пекинской и Шанхайской систем ведутся работы по объединению районных электростанций, работающих изолированно. Наиболее крупными системами в стране являются Северо-восточная и Пекинская. В ближайшие пятилетия получит развитие ряд систем мощностью выше 1 Гвт (Пекин-Тяньцзинская, Шанхай-Нанкинская, Ланъчжоуская и др.). Мощность Северо-восточной системы будет значительно выше. В перспективе на базе крупных гидроэлектростанций будет создан ряд новых систем. Сейчас китайские энергетики работают над проблемой объединения энергетических систем.

Большое внимание в КНР уделяется созданию своей собственной промышленности по производству энергетического оборудования. Паровые котлы производятся на Шан-

хайском и Харбинском заводах. На Шанхайском заводе по советским и чехословацким проектам производятся турбины мощностью 12 Мвт. Харбинский завод будет производить отечественные турбины более высокой мощности. Поставлена задача в ближайшее время освоить производство турбин высокого давления.

Началось строительство заводов по изготовлению генераторов мощностью 12; 25 и 50 Мвт. Уже в 1956 г. Шанхайский завод по советским проектам выпустил первый турбогенератор мощностью 12 Мвт.

Большое внимание в стране уделяется переподготовке имеющихся и подготовке новых энергетических кадров. На всех предприятиях широко поставлена работа по повышению квалификации работающих. Можно без преувеличения сказать, что на энергетических предприятиях так же, как и на предприятиях других отраслей, все учатся. Это обучение хорошо продумано и организовано. На действующих станциях обучаются кадры для новых предприятий.

Значительное место отводится подготовке инженерно-технических кадров. В настоящее время число работников энергетических предприятий, имеющих среднее и высшее техническое образование, оценивается в 10% общей численности работающих на этих предприятиях. Из общего числа работников с высшим и средним образованием 70% имеет среднее и 30% высшее техническое образование. До последних лет подготовка инженеров по энергетическим специальностям производилась в институтах с трех- и четырехгодичным обучением. В последние годы в КНР перешли на подготовку инженеров в институтах с пятигодичным обучением. Подготовка специалистов по различным энергетическим специальностям проводится в многочисленных институтах преимущественно политехнического типа. В 1956 г. в г. Сиань впервые в КНР создан энергетический институт.

Большую бескорыстную помощь в развитии энергетики КНР оказывает Советский Союз. Новостройки снабжаются чертежами и оборудованием; ряд электростанций строится под непосредственным руководством советских специалистов; советники помогают в решении многочисленных вопросов проектирования, эксплуатации станций и подготовки инженерных кадров. Многие китайские товарищи повышают свою квалификацию или дополнительно обучаются в СССР. В КНР большой популярностью пользуется советская энергетическая литература.



По страницам технических журналов

ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

До последних лет единственным типом конденсаторов с твердым органическим диэлектриком являлся бумажный конденсатор.

Успехи современной химии высокомолекулярных синтетических соединений привели к появлению новых пленочных диэлектриков, обладающих высокой электрической прочностью, которые могут подобно бумаге изготавливаться в виде тонких, механически прочных лент и поставляться в рулонах. Эти особенности позволяют применить пленочные диэлектрики в конденсаторостроении, причем технология изготовления и конструктивное оформление конденсаторов остаются такими же, как и для бумажных конденсаторов [Л. 1, 2 и 3].

В настоящее время производство пленочных конденсаторов достигло наибольшего развития в США, где оно организовано рядом фирм, из которых некоторые специализируются только на изготовлении конденсаторов этого типа. Применяются пленочные диэлектрики двух основных типов: неполярные пленки с малым углом потерь, предназначенные в основном для изготовления высокочастотных конденсаторов, и полярные пленки, с повышенным углом потерь и несколько повышенной диэлектрической проницаемостью, пригодные для изготовления

конденсаторов, рассчитанных на использование в цепях постоянного тока или тока низкой частоты [Л. 4 и 5].

К диэлектрикам первой группы относятся полистирол, полизтилен и политетрафторэтилен. Некоторые свойства этих диэлектриков и изготовленных из них конденсаторов показаны в табл. 1. Основным преимуществом диэлектриков этого типа по сравнению с бумагой является малый угол потерь, равный $(2 \dots 5) \cdot 10^{-4}$. Малые значения угла потерь сохраняются в широком диапазоне частот, что позволяет таким диэлектрикам конкурировать в области высокочастотной техники не столько с бумагой, которая вследствие больших потерь здесь не применяется, сколько с высокочастотными неорганическими диэлектриками типа высокочастотной керамики или слюды. В этом случае преимущество данных диэлектриков особенно заметно при относительно больших значениях номинальной емкости, когда применение керамики или слюды делается особенно неудобным. Недостатком пленочных диэлектриков по сравнению с неорганическими материалами является меньшая стабильность их емкости во времени. Изменение емкости в течение года хранения конденсатора в лучшем случае составляет 0,1...0,2%, тогда как для конденсаторов с неорганическими диэлектриками при тех же условиях емкость изменяется лишь на 0,01...0,02%. Температурный коэффициент емкости пленочных конденсаторов больше,

Таблица 1

Некоторые характеристики неполярных пленок и изготовленных из них конденсаторов

Наименование характеристики	Полистирол	Полиэтилен	Политетрафорэтилен
Диэлектрическая проницаемость пленки при 25° С и 60 гц	2,58	2,25	2,05
То же при 25° С и 1 Мгц	2,58	2,25	2,05
Тангенс угла диэлектрических потерь пленки при 25° С и 60 гц	(2...3) 10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁴	(1...2) 10 ⁻⁴
То же при 25° С и 1 Мгц	2·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	(1...2) 10 ⁻⁴
Удельное объемное сопротивление пленки при 25° С, ом·см	10 ¹⁹ ... 10 ²²	10 ¹⁸ ... 10 ¹⁹	Более 10 ¹⁹
Емкость конденсатора при 85° С в процентах от емкости при 25° С	99	96	99
Температурный коэффициент емкости, 1/град	(-100...-130) 10 ⁻⁶	(-550...-700) 10 ⁻⁶	(-100...-120) 10 ⁻⁶
Абсорбция заряда (измерение через 1 мин после закорачивания на 2 сек), %	Менее 0,02	Менее 0,05	Менее 0,02
Изменение емкости при хранении в течение 1 года, %	0,1...0,2	0,3...0,5	0,2...0,3
Постоянная времени конденсаторов при 25° С и 250 в, Мом·мкф	Более 10 ⁶	10 ⁵	10 ⁶
То же при 85° С	10 ⁴ ...10 ⁵	10 ³	10 ⁴ ...10 ⁵
Пределы рабочей температуры конденсаторов, °С	От -60 до 60...85	От -60 до 85...90	Ст -90 до 200...250

чем для лучших типов керамических и слюдяных конденсаторов, для которых он составляет $\pm(30...50) 10^{-6}$ 1/град. Характер изменения емкости при изменении температуры для конденсаторов из неполярных пленок показан на рис. 1, где для сравнения показана аналогичная зависимость для бумажного конденсатора.

Особенностью диэлектриков рассматриваемой группы по сравнению с пропитанной бумагой является резко увеличенное удельное сопротивление, которое может превышать $10^{19}...10^{22}$ ом·см. В связи с этим постоянная времени конденсаторов резко увеличена (рис. 2) и скорость их саморазряда очень мала, что делает эти конденсаторы особенно подходящими для применения в счетно-решающих устройствах. В данном случае имеет большое значение также то обстоятельство, что конденсаторы с диэлектриками рассматриваемого типа имеют очень малую абсорбцию заряда.

Для обеспечения стабильности емкости пленочные конденсаторы после намотки подвергаются термической обработке (запеканию). При этом происходит усадка пленки, и она плотно прилегает к обкладкам из металлической фольги, вытесняя воздух из зазоров между пленкой и фольгой и из зазоров между слоями пленки (в случае многослойных конденсаторов), что приводит к тому, что емкость конденсатора в процессе термической обработки несколько возрастает. Данные табл. 1 относятся именно к таким конденсаторам, прошедшим запекание. Однако при этом не удается полностью освободиться от

воздушных включений и поэтому такие конденсаторы пригодны лишь для работы при низком напряжении, не превышающем нескольких сотен вольт [Л. 6].

При изготовлении конденсаторов высокого напряжения приходится применять пропитку конденсаторов жидким диэлектриком, который заполняет зазоры между пленкой и фольгой, в результате чего повышается напряжение начала ионизации. Поскольку в этом случае проводить запекание нельзя, то стабильность емкости конденсатора ухудшается, а также возрастает температурный коэффициент емкости. В США для пропитки пленочных конденсаторов чаще всего применяют кремнийорганическую жидкость диметилсиликон. Пропитанные пленочные конденсаторы имеют сниженную постоянную времени (иногда в 10 раз) и заметно увеличенную абсорбцию заряда (вместо сотых долей процента до 1% и даже выше).

Пленка полистирола (полистирен, стирофлекс) получила применение в конденсаторостроении не только в США [Л. 4], но и в Европе [Л. 8 и 9], однако в этом случае пленка несколько менее теплостойка, в связи с чем верхний предел рабочей температуры для конденсаторов снижается до 60° С вместо принятого в США значения 85° С. Удельный объем полистирольных конденсаторов значительно больше, чем для бумажных конденсаторов низкого напряжения, так как обычно в качестве диэлектрика применяется пленка толщиной 0,020 мм, тогда как толщина бумаги может быть взята равной 0,007...0,006 мм и, кроме того, диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги почти в 2 раза выше, чем у полистирола. При применении металлизированных пленок может быть достигнуто некоторое уменьшение удельного объема полистирольных конденсаторов за счет намотки пленки не в два, а только в один слой. Такие конденсаторы могут работать при напряжениях порядка 200...300 в.

Полиэтилен имеет преимущество перед полистиролом в части несколько повышенного верхнего предела рабочей температуры. Недостатком его является резко увеличенная зависимость диэлектрической проницаемости от температуры. Постоянная времени полиэтиленовых конденсаторов заметно меньше, чем у полистирольных. В Европе полиэтилен применяется в основном только в качестве изоляции высокочастотных кабелей; в США полиэтиленовую пленку используют также в конденсаторостроении, главным образом при изготовлении конденсаторов с высокочастотным установкам для нагрева металла, где вопрос о стабильности емкости при колебаниях температуры не имеет решающего значения. Как полистирол, так и полиэтилен являются относительно дешевыми материалами, что способствует расширению их применения в конденсаторном производстве.

Политетрафорэтилен (тэфлон) является значительно более дорогим продуктом, но его особым

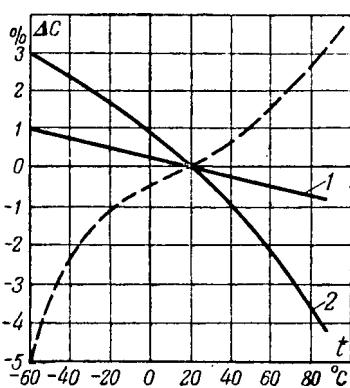


Рис. 1. Изменение емкости конденсаторов из неполярных пленок в зависимости от температуры.

1 — полистирольный и тefлоновый конденсаторы;
2 — полиэтиленовый конденсатор; пунктир — бумажно-масляный конденсатор.

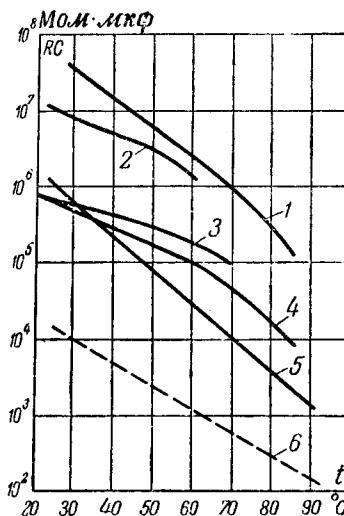


Рис. 2. Зависимость постоянной времени конденсаторов из неполярных пленок от температуры.

1 — секция полистирольного конденсатора без корпуса; 2 — такая же секция в корпусе из стекла пирекс (по Миличу); 3 — полистирольный конденсатор (по Коэнсу); 4 — полистирольный конденсатор (по Виксу); 5 — полиэтиленовый конденсатор; пунктир: р — бумажно-масляный конденсатор.

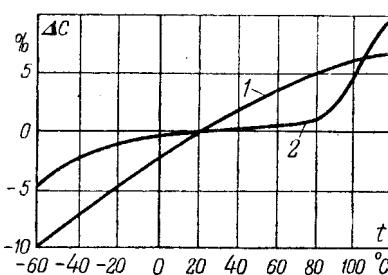


Рис. 3. Изменение емкости конденсаторов из полярных пленок в зависимости от температуры.

1 — конденсатор из пленки «пластикон А» при частоте 60 Гц; 2 — конденсатор из пленки «майлар» при частоте 1 кГц.

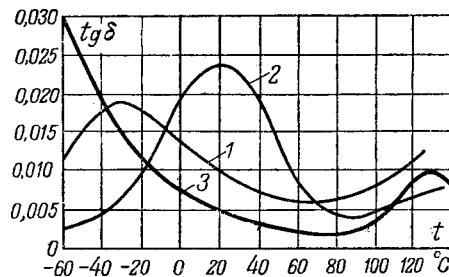


Рис. 4. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для конденсаторов из полярных пленок от температуры.

1 — конденсатор из пленки «пластикон А» при частоте 60 Гц; 2 — конденсатор из политрифтотерилор-этилена при частоте 1 кГц; 3 — конденсатор из полиэтилентерефталата при частоте 1 кГц.

преимуществом является исключительно высокая для органического материала рабочая температура, составляющая 200...250° С. Постоянная времени, абсорбция заряда, температурный коэффициент емкости и стабильность емкости тефлоновых конденсаторов близки к соответствующим значениям для полистирольных конденсаторов. В настоящее время тефлоновые конденсаторы имеют ограниченное применение в качестве специального типа конденсаторов, используемых при особо высоких рабочих температурах.

Преимуществом полярных синтетических пленок перед неполярными является повышенная диэлектрическая проницаемость и более высокая электрическая прочность, хотя невозможность получения весьма малого угла потерь заранее предопределяет область применения конденсаторов из полярных пленок только цепями низкой частоты или постоянного тока. В настоящее время среди полярных синтетических пленок находят применение три типа пленочных диэлектриков: ацетат целлюлозы, политрифтотерилор-этилен и полиэтилентерефталат (табл. 2).

Фирма «Конденсер Продэктыс» (США) уже на протяжении ряда лет выпускает конденсаторы из пленки «пластикон А», представляющей собой ацетат целлюлозы.

Изменения емкости пластиконовых конденсаторов при изменении температуры несколько больше, чем для бумажных конденсаторов (рис. 3); дипольный максимум потерь сдвигнут в область низких температур (рис. 4), а при повышенных температурах он несколько выше, чем у пропитанной бумаги; постоянная времени того же порядка, как у бумажных конденсаторов с неполярной пропиткой. Удельный объем пластиконовых конденсаторов заметно меньше, чем у стандартных бумажных радиотехнических конденсаторов, работающих при напряжениях свыше 600 в. Ввиду повышенных толщин пленки «пластикон А» (минимум 0,018...0,020 мм) изготовление конденсаторов на низкие напряжения нецелесообразно. Уменьшение удельного объема конденсаторов достигается за счет повышения напряженности поля в конденсаторе (до 64 кВ/мм — при напряжении постоянного тока 2 кв и выше и до 80 кВ/мм — при импульсном напряжении). Для конденсаторов, пропитанных кремнийорганической жидкостью, верхний предел температуры равен 125° С, а при пропитке маслом 105° С; однако при этих предельных температурах допустимое рабочее напряжение должно снижаться по сравнению с номинальным, установленным для температуры не свыше 65° С. Допускаемое напряжение по данным фирм составляют: при 85° С — 70%, при 105° С — 55% и при 125° С — 40% от номинального.

По-видимому, ацетат целлюлозы целесообразно использовать только для некоторых типов конденсаторов высокого напряжения, работающих при умеренных температурах; больших перспектив на широкое применение в конденсаторостроении этот материал не имеет.

Таблица 2

Некоторые характеристики полярных пленок и изготовленных из них конденсаторов

Наименование характеристики	Ацетат целлюлозы	Политрифтотерилор-этилен	Полиэтилентерефталат
Диэлектрическая проницаемость пленки при 20° С и 1 кГц	3,7	3,0	3,2
Тангенс угла диэлектрических потерь пленки при 20° С и 60 Гц	0,008	0,010	0,002
То же при 100° С и 60 Гц	0,006	0,018	0,010
То же при 20° С и 1 кГц	0,016	0,025	0,005
То же при 100° С и 1 кГц	0,009	0,005	0,003
Удельное объемное сопротивление пленки при 20° С, ом·см	10^{15}	$10^{17} \dots 10^{18}$	$10^{17} \dots 10^{19}$
Пробивная напряженность пленки при 20° С, кВ/мм	125...160	160...200	200...240
Емкость конденсатора при 85° С в процентах от емкости при 25° С	105	108	101
Температурный коэффициент емкости 1/град (в пределах от -60 до 85° С)	$700 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$	$500 \cdot 10^{-6}$
Постоянная времени конденсаторов при 20° С, Мом·мкФ	$(5 \dots 15) \cdot 10^3$	$(1 \dots 2) \cdot 10^4$	10^5
То же при 85° С	$(1 \dots 2) \cdot 10^2$	10^3	$(2 \dots 3) \cdot 10^3$
Абсорбция заряда (измерение через 1 мин после закорачивания на 2 сек), %	1,5...5	—	0,2
Пределы рабочей температуры конденсаторов, °С	От -60 до 125	От -60 до 150	От -60 до 150

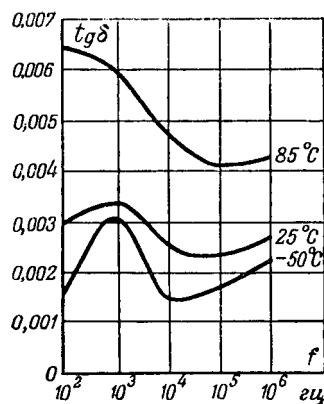


Рис. 5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь пленки «диаплекс» от частоты.

Политрифтхлорэтилен, известный в США под названием «кель-эф», применяется как электроизолирующий и конструктивный материал; имеются упоминания и об использовании его для конденсаторов в виде пленок, но широкого применения в конденсаторостроении он не получил. По величине диэлектрической проницаемости он уступает ацетату целлюлозы, но в отношении электрической прочности превосходит его и, по-видимому, допускает работу при 100...125° С при более высоких значениях напряженности поля. Дипольный максимум угла потерь при низких частотах приходится на область комнатных температур и при нагревании конденсатора его угол потерь снижается (рис. 4). Постоянная времени таких конденсаторов выше, чем у бумажных, что обеспечивает их работу при более высокой напряженности поля без опасения теплового пробоя при высоких температурах. Можно предполагать, что удельный объем конденсаторов, работающих на постоянном напряжении при температуре 100° С, снижается более чем в 2 раза по сравнению с бумажными конденсаторами.

Еще больший интерес представляет полиэтилентерефталат. Этот материал под названием «терилен» был впервые изучен в Англии, промышленное же освоение полиэтилентерефталата под названием «майлар» и внедрение его в конденсаторное производство началось в США [Л. 10]. По последним сведениям производство пленок из этого материала освоено в ФРГ, где этот материал называется «хостафан» [Л. 11]. Данный материал представляет большой интерес прежде всего благодаря своей высокой механической прочности, достигающей 2000...3000 кг/см², т. е. значительно превышающей прочность конденсаторной бумаги. Это позволяет ставить вопрос об изготовлении из полиэтилентерефталата весьма тонких пленок с нижним пределом толщины меньше, чем у конденсаторной бумаги. Высокая механическая прочность пленок сочетается с их высокой электрической прочностью и высоким удельным сопротивлением. Хотя диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталата ниже, чем у пропитанной бумаги, но повышенные значения допускаемой напряженности поля позволяют получать из него конденсаторы с заметно сниженным удельным объемом. Угол потерь для конденсаторов, изготовленных из такой пленки, имеет два релаксационных максимума: один лежит в области отрицательных температур, а второй — в области повышенных температур (рис. 4).

Емкость конденсаторов несколько снижается в области низких температур; в пределах от нуля до 80° С изменения емкости незначительны, однако при дальнейшем повышении температуры эти изменения резко увеличиваются (рис. 3). Постоянная времени конденсаторов значительно выше, чем в случае применения ацетата целлюлозы, и несколько превышает постоянную времени конденсаторов с пленкой из политрифтхлорэтилена. Таким образом, пленки полиэтилентерефталата представляют большой интерес для конденсаторного производства. Конденсаторы из этих пленок выпускаются в настоящее время в США рядом фирм, прежде всего в качестве малогабаритных радиоконденсаторов с повышенной рабочей температурой — до 125, 130 и даже до 150° С.

Для работы конденсаторов из полиэтилентерефталата при повышенных напряжениях необходима их пропитка жидким диэлектриком. При этом возникает затруднение в связи с тем, что пленка плохо смачивается обычными пропитывающими жидкостями и поэтому пропиточная масса не заполняет полностью зазоры. Это затруднение можно преодолеть, применяя комбинированный диэлектрик, полученный намоткой чередующихся слоев конденсаторной бумаги и пленки. Конденсаторная бумага в данном случае служит в основном в качестве фитиля, всасывающего пропиточную массу. Поскольку удельное сопротивление бумаги меньше, чем у пленки, то при постоянном токе основная доля напряжения ложится на пленку, а напряженность поля в бумаге оказывается настолько небольшой, что она может работать даже при температуре порядка 125...150° С.

В 1945 г. малоизвестная в области конденсаторостроения фирма «Эйркрафт Марин Продэкты» (США) сообщила о выпуске нового типа пленочных конденсаторов высокого напряжения для радарных установок. Конденсаторы имеют емкость от 0,0022 до 0,05 мкФ при рабочем напряжении постоянного тока 3...15 кВ. Диапазон рабочих температур конденсаторов от -60 до 100° С, температурный коэффициент емкости менее 150 · 10⁻⁶ 1/град, диэлектрическая проницаемость пленки равна 4,8, причем эта величина изменяется незначительно при изменении температуры и частоты. При температуре 25° С и частоте 1 кГц тангенс угла диэлектрических потерь составляет 0,0035; зависимость его от температуры и частоты показана на рис. 5. По рекламным данным электрическая прочность пленки равна 200...400 кВ/мм, а нагревостойкость достигает 250° С. В США эта пленка известна под названиями «ампифильм» или «диаплекс». По последним данным можно заключить, что данная пленка изготавливается на основе бентонита, т. е. представляет собой давно известный материал, о котором сообщалось ранее под названиями «альсифильм» или «бентофильм». Этот материал изучался у нас еще до войны в качестве заменителя слюды, однако вследствие повышенных потерь он оказался непригодным для замены слюды-мусковит и вследствие пониженной теплостойкости — для замены слюды-флогопит. Опыт американской фирмы показывает, что пленка этого типа удобна для изготовления высоковольтных конденсаторов небольшой емкости, пригодных для замены слюдяных конденсаторов, работающих при постоянном или импульсном напряжении. Удельный объем конденсаторов этого типа, имеющих емкость 0,002...0,003 мкФ, при рабочих напряжениях 6...15 кВ значительно меньше, чем для слюдяных конденсаторов типа КСО-13 или бумажных конденсаторов типа КБГ-П малой емкости (до 0,01 мкФ).

В СССР применение синтетических пленок в конденсаторостроении находится в начальной стадии, что обусловлено в первую очередь недооценкой важности этого вопроса со стороны химической промышленности. В настоящее время в промышленном масштабе выпускается только пленка полистирола (стирофлекс), из которой изготавливаются конденсаторы типов ПГ, ПО, ПОВ и др. Однако нагревостойкость этой пленки ниже американской, что не позволяет использовать конденсаторы при температурах выше 60° С. Для расширения областей применения полистирольных конденсаторов желательно обеспечить повышение нагревостойкости пленки до 85...100° С путем использования принципа сополимеризации или при помощи какого-либо иного технологического приема.

Полиэтилен используется в производстве высокочастотных кабелей. Освоение выпуска пленок из полиэтилена, имеющих толщину порядка 0,02...0,03 мм, позволило бы для высокочастотного нагрева использовать полиэтиленовые конденсаторы взамен бумажно-масляных, для которых из-за больших потерь в бумаге при частотах 10³...10⁴ Гц необходимо водяное охлаждение. Весьма интересно выяснить возможность повышения нагревостойкости полиэтилена путем его облучения. В США этим методом надеются поднять его нагревостойкость до 150° С.

Политетрафторэтилен выпускается в СССР под названием «фторопласт-4» [Л. 12]. Удачные опыты по выработке из него пленок позволили изготовить первые серии низковольтных и высоковольтных конденсаторов типов ФТ и ФГТ с рабочей температурой до 200...250° С. Освоение производства пленки в промышленном масштабе позволило бы организовать производство подобных конден-

саторов, которые необходимы для ряда отраслей техники, где требуется работа конденсаторов при столь высоких температурах и где не могут быть применены никакие другие конденсаторы.

Пленки из эфиров целлюлозы (например, триацетат целлюлозы) применяются в производстве электрических машин, однако они имеют значительную толщину. Снижение толщины этих пленок позволило бы поставить вопрос об их применении при изготовлении некоторых типов конденсаторов высокого напряжения, однако поскольку в данном случае трудно ожидать повышения рабочей температуры по сравнению с бумажными конденсаторами, то условием применения в конденсаторостроении ацетатной пленки вместо бумаги будет являться снижение ее стоимости.

Для конденсаторов с повышенной рабочей температурой представило бы интерес использование политетрафторхлорэтилена. Этот материал известен у нас под названием «фторопласт-3», но его изготовление в виде пленок химической промышленностью не освоено. Еще более интересный для конденсаторостроения материал — полизтилентерефталат известен в СССР под названием «лавсан», однако промышленное его изготовление и выпуск пленок также не освоены. Судя по опыту США, вопросу выпуска таких пленок целесообразно уделить первостепенное внимание, так как для конденсаторного производства этот диэлектрик является особенно ценным.

Следует надеяться, что в текущей пятилетке наша химическая промышленность сумеет преодолеть отставание в части разработки и промышленного выпуска синтетических пленок как из неполярных, так и в особенности из полярных диэлектриков, что даст возможность отечественному конденсаторостроению наладить выпуск пленочных конденсаторов для различных отраслей советской техники.

Доктор техн. наук. проф. В. Т. Ренне
Ленинградский политехнический институт
им. Калинина

Литература

1. В. Т. Ренне. Электрические конденсаторы. Госэнергоиздат, 1952.
2. В. Т. Ренне. Развитие отечественного конденсаторостроения. Электричество, № 7, 1955.
3. F. Rockett. Fixed capacitors undergo miniaturisation, Electronics, т. 27, стр. 120, № 7, 1954.
4. A. R. von Hippel. Dielectric materials and applications, New York, 1954.
5. G. Mystic. Capacitor miniaturisation with plastic films, Aero Digest, т. 70, стр. 54, № 5, 1955.
6. А. Н. Бутра и В. Т. Ренне. Поведение полистирольных конденсаторов при переменном напряжении. ЖТФ, стр. 1974, № 11, 1954.
7. J. R. Weeks. Polystyrene capacitors, Bell Laboratory Record, т. 24, стр. 111, № 3, 1946.
8. S. Flaks, A. Pigeonier. Les condensateurs au polystyrol, L'onde électrique, т. 35, стр. 288, № 336—337, 1955.
9. P. Harris. Plastic film capacitors, Ericsson Review, стр. 57, № 26, 1954.
10. M. Wooley и др. Polyethyleneterephthalate as a capacitor dielectric, El. Eng., т. 71, стр. 715, № 8, 1952.
11. Eine neue Isolierfolie — Hostaphan, Elektrotechnik, стр. 4, № 1, 1956.
12. Фторопласти, Госхимиздат, 1954.

СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЗА РУБЕЖОМ

Преимущества комплектных распределительных устройств (КРУ) заводского изготовления, в которых монтаж всех деталей и выполнение всех соединений внутри ячеек производится на заводе, а на месте установки остается выполнить только внешние присоединения, известны уже более полу века. Элементы распределительных устройств низкого напряжения, заключенные на заводе в металлические кожухи, появились еще в прошлом столетии. В 1905 г. в Англии были изготовлены первые КРУ

высокого напряжения. Еще до второй мировой войны КРУ получили весьма большое распространение за рубежом, особенно в США и Англии; после войны они находят все более широкое применение и в континентальных странах Европы.

В зарубежных КРУ нашла широкое применение специальная малогабаритная аппаратура высокого напряжения. Примером могут служить хотя бы измерительные трансформаторы для напряжений до 60 кв с обмотками, запрессованными в пластмассу, которая служит изолирующим веществом и одновременно является механическим креплением и кожухом. Такие трансформаторы тока и напряжения изготавливаются несколькими европейскими и американскими фирмами и обеспечивают минимальные габариты распределительных устройств.

КРУ изготавливаются в весьма широкой номенклатуре. Одновременно выпускается и рассыпанное электрооборудование для распределительных устройств обычного типа. При этом некоторые авторы считают вполне правомерным применение как КРУ, так и распределительных устройств в ячейках с перегородками. Так, Зоммерлатте [Л. 1] высказывает мысль, что КРУ не универсальны и вряд ли заменят целиком обычные распределительные устройства с открытыми ячейками, которые в ряде случаев могут дать экономию металла, и что пределом применения КРУ являются параметры 10 кв, 1 ка, 200 Мвт. Можно отметить, что разрабатываемые в ГДР типовые ячейки закрытых распределительных устройств заводского изготовления действительно приближаются к КРУ как по типу аппаратуры (смещение разъединителей с трансформаторами тока, выкатные тележки, механические блокировки), так и по габаритам.

В связи с тем, что нашей промышленности безусловно следует в ближайшие годы значительно расширить номенклатуру КРУ, изготавляемых отечественными заводами, представляется целесообразным осветить положение с изготовлением КРУ за рубежом.

Основные технические требования, которым должны удовлетворять КРУ в части удобства, гибкости и надежности эксплуатации, сводятся к следующему [Л. 2]: ячейки должны допускать выдвигание и вдвигание выключателя при помощи одного рычага с возможностью быстрого доступа ко всем его частям (желательно такой же быстрый доступ к предохранителям и измерительным трансформаторам); удаление и замена трансформаторов тока без перерыва работы; отключение путем простого выдвигания и быстрая замена панели со счетчиками и реле другой такой же панелью с другими номинальными данными; переход от кабельного ввода к воздушному путем простой замены соответствующего элемента ячейки КРУ; производство работ в частях ячейки, отделенных защитными перегородками, при наличии напряжения в других частях ячейки; возможность расширения путем простого добавления ячеек к существующему КРУ. Надежные механические блокировки должны быть предусмотрены для предотвращения отодвигания выключателя и отключения разъединителей под нагрузкой, одновременного включения разъединителей разных систем шин или же заземляющего и линейного разъединителей и других неправильных действий персонала.

Наибольшая компактность обеспечивается при выполнении ячеек КРУ с заполнением камер шин и выводов специальным компаундом. Сопоставление габаритов зданий распределительных устройств обычного типа со зданиями, в которых устанавливаются КРУ, показывает, что в последнем случае как площадь застройки, так и кубатура зданий сокращается по крайней мере в 3...4 раза.

КРУ, изготавливаемые различными фирмами, могут быть систематизированы по различным признакам: по типу применяемых выключателей — баковые и малообъемные масляные, газовые, воздушные (с разрывом дуги сжатым воздухом или при атмосферном давлении); по типу расположения аппаратуры — с неподвижными или выдвижными выключателями (на выкатной тележке или с опусканием выключателя); по применяемой изолирующей среде — воздух, масло, компаунд; по расположению сборных шин — вверху или внизу — и по типу отходящих линий — кабельные или воздушные; по количеству систем сборных шин; по способу обслуживания — одностороннее или двустороннее; наконец, по роду установки — наружная или внутренняя. Общепринятой является следующая класси-

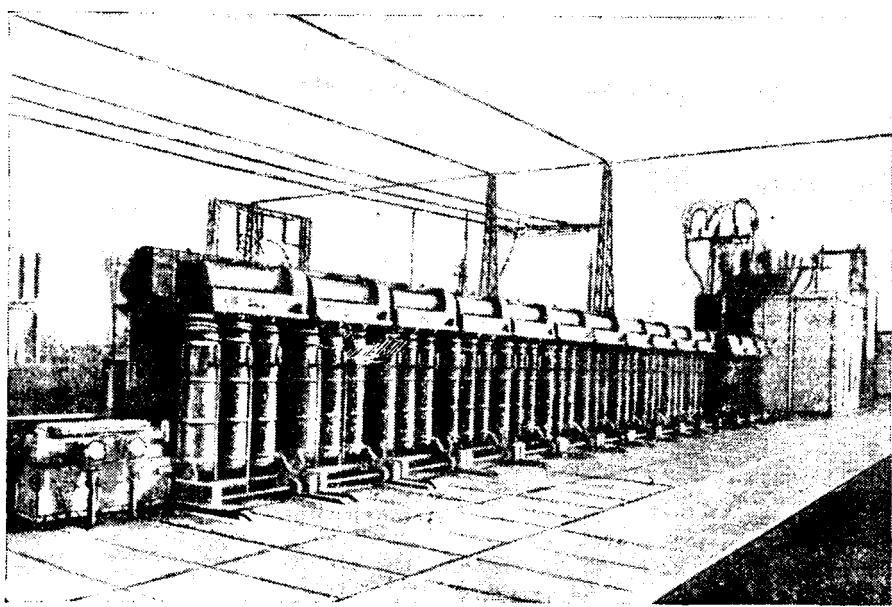


Рис. 1. Подстанция Фиоренцуола (Италия) с применением КРУ для наружной установки на напряжение 15 и 30 кв.

фиксация КРУ высокого напряжения: 1) распределительные устройства просто защищенного, закрытого типа без плотных кожухов; 2) распределительные устройства в плотных кожухах, не пропускающих капель воды; 3) собственно бронированные герметические распределительные устройства в кожухах, не пропускающих струи воды, т. е. воды под давлением.

Общее количество разновидностей КРУ высокого напряжения (КРУ ВН) может достигнуть огромной цифры, если, кроме перечисленных признаков, учесть также различные напряжения, токи и отключающие способности, разные способы отсоединения выключателя (при помощи разъединителей или же втычных контактов на выдвижной тележке, опускаемой вниз или отодвигаемой вперед); различные виды приводов (ручной, соленоидный, пневматический или пружинный с ручным или моторным заводом); наличие или отсутствие полного или частичного разделения фаз; конструктивные варианты, начиная от совершенно открытого и кончая герметическими ячейками; варианты с различными принадлежностями и вспомогательными устройствами и т. д.

Практически, по английским данным, при тщательной стандартизации все же приходится считаться с наличием 5...10 тыс. вариантов, что весьма затрудняет серийное заводское изготовление КРУ. Имеется предложение разделить КРУ ВН на две группы по способу изолирования электрических соединений: КРУ с ошиновкой, выполненной полностью или частично голыми шинами, и КРУ, в которых все электрические соединения полностью отделены изолирующим веществом как от кожуха, так и друг от друга.

Для решения вопросов об освоении изготовления и применения тех или иных типов комплектных (КРУ) и сборных (СБРУ) распределительных устройств нам представляется более целесообразным разделить их на следующие четыре группы:

1) КРУ и СБРУ с аппаратурой обычного типа, без откатных панелей, отличающиеся от обычных распределительных устройств лишь наличием собираемых на заводе (или на месте) металлических каркасов и металлических (либо асбокрементных и т. п.) перегородок вместо железобетонных камер;

2) КРУ со специальной малогабаритной аппаратурой, с обычными (или уменьшенными благодаря применению изолированных шин) разрядными расстояниями, с выключателями откатного типа;

3) КРУ собственно бронированного типа, с заполнением всего внутреннего пространства маслом, компаундом или сжатым воздухом;

4) КРУ с аппаратурой, органически объединенной с конструкцией ячеек (например, типа «Изотюб»).

КРУ и СБРУ, изготовленные в СССР, относятся к первой группе. Подобные КРУ и СБРУ типа распределительных шкафов с обычной аппаратурой, без силовых выключателей значительной мощности изготавливаются и за рубежом. Более широкое применение как в США, так и в Европе имеют КРУ с откатными панелями с разъединителями, мощными предохранителями, выключателями нагрузки, высоковольтными контакторами или силовыми безмасляными выключателями средней мощности, а также на больших подстанциях — со сравнительно мощными выключателями различных типов (в Европе — кроме баковых масляных) с отключающей способностью до 500 МвА при напряжениях 5..17,5 кв, а в отдельных случаях и до 33 кв.

Многие фирмы изготавливают КРУ из отдельных стандартных камер, из которых состоит каждая ячейка: камера сборных шин (одна или две системы), камера выключателя, предохранителя или трансформатора напряжения, камера реле и измерительных приборов, камера воздушного или кабельного вывода.

Это позволяет благодаря точной взаимозаменяемости камер собирать из стандартных ячеек распределительные устройства с самыми разнообразными схемами.

В некоторых конструкциях КРУ второй группы изолируются не только шины, но и все соединения. При этом особое внимание уделяется изолированию мест соединений и ответвлений.

Весьма характерно, что в последние годы к изготовлению компактных КРУ в металлических ячейках переходят и фирмы, ранее поставлявшие главным образом аппаратуру для распределительных устройств с железобетонными перегородками или же изготавлившие металлические ячейки со стандартной аппаратурой. Так, шведская фирма АСЕА выпускает КРУ для установки в помещениях на 10 кв современной конструкции с малообъемными масляными выключателями, имеющими отключающую способность 250 МвА [Л. 3].

Сопоставление размеров ячеек с одинаковыми номинальными данными (10 кв, 1000 а) показывает следующее: металлическая ячейка ранее выпускавшегося типа с обычной, жестко смонтированной аппаратурой, без изоляции шин имеет высоту 3250⁴, ширину 1150 и глубину 1200 мм, занимает площадь 1,32 м² и объем 4,3 м³; ячейка с выдвижным выключателем имеет соответственно размеры 2250×1000×1600 мм и занимает площадь 1,6 м² и объем 3,6 м³; современная ячейка типа VNB имеет размеры 2250×850×1250 мм, занимая площадь 1,06 м² и объем 2,4 м³.

Благодаря применению изолированных шин в указанном габарите удается разместить одиночную систему шин, одну рабочую и одну обходную или две рабочие системы шин. Шины, установленные на ребристых изоляторах, изолированы и рассчитаны на максимальный рабочий ток 2000 а и ударный ток короткого замыкания 60 кА. Выключатели типа НКН, которые специально разработаны для монтажа в КРУ и конструктивно объединены с одним или двумя разъединителями для одиночной или двойной системы шин, смонтированы на катках на высоте 0,5 м над полом и выдвигаются на специальную приставную тележку; для каждого КРУ поставляется одна тележка. Выключатели имеют дистанционный пружинный привод с электродвигателем для включения и отключающей катушкой. Реле и измерительные приборы установлены в верхней части открывающейся фасадной стенки ячейки.

Для сравнения укажем, что соответствующая ячейка КРУ с выключателем ВМГ-133 Запорожского трансформаторного завода занимает площадь пола 1,7 м² и объем 3,9 м³; подобная же ячейка СБРУ — соответственно 2,5 м² и 7,5 м³.

Это сопоставление показывает, что применение КРУ второй группы позволяет в 1,5—2 раза уменьшить занимаемые площадь и объем по сравнению с КРУ первой группы.

КРУ второй группы изготавливаются и для научной установки и широко применяются на комплектных подстанциях. На рис. 1 показано КРУ на 15 и 30 кв итальянской понижающей подстанции Фиоренцуола [Л. 4]. Благодаря размещению аппаратуры управления и щитов низкого напряжения в шкафах для наружной установки никаких зданий для таких подстанций не требуется.

КРУ третьей группы отличаются как специальной изоляцией друг от друга и от корпуса всех частей, находящихся под напряжением, так и усиленной конструкцией кожуха, который часто делается литым или же изготавливается из прочной листовой стали.

В некоторых конструкциях таких КРУ применяются два типа изоляции. Так, английская фирма Рейролл изготавливает КРУ до 15 кв с масляным выключателем и разъединителем в масляной ванне на откатной панели и с компаундной изоляцией шин и соединений. КРУ подобного типа изготавливаются для напряжений до 33 кв. Примерами современных распределительных устройств такого типа могут служить английские установки, например КРУ подстанции Лоу Род. На этой подстанции с двумя трехфазными трансформаторами по 100 Mva, 132/33 кв, на стороне 132 кв не имеется никакой аппаратуры, кроме двух разъединителей. В здании подстанции расположено КРУ 33 кв с одной системой шин, состоящее из металлических ячеек с разделением фаз, с выключателями с отключающей способностью 1 000 Mva. Ячейка секционного выключателя шин 33 кв отделена от секций шин огнестойкой стеной [Л. 5]. Подобное же распределительное устройство применено и на электростанции Плимут В [Л. 6], имеющей три турбогенератора по 30 Mva, 33 кв и два по 20 Mva, 6 кв.

Двухэтажное КРУ 33 кв (рис. 2) имеет полную высоту около 7,5 м. В нижнем этаже расположены две системы шин в стальных трубах, в верхнем — масляные выключатели невыдвижного типа. Для осмотра и испытания распределительного устройства и отдельных его частей предусмотрены специальные люки и съемные проходные изоляторы.

Наибольший интерес представляют, безусловно, КРУ четвертой группы, в которых аппаратура не только специально разработана для компоновки в максимально стесненных условиях ячейки, но и конструктивно объединена с корпусом ячейки. Примером КРУ этой группы может служить герметическое КРУ для наружной установки типа «Изотюб», изготавляемое голландской фирмой Кок [Л. 7, 8].

В ячейках «Изотюб» изоляция между фазами и относительно земли и конфигурация частей, находящихся под напряжением, выполнены так, чтобы получить определенное и поддающееся расчету распределение электрического поля, поэтому такие КРУ называются «бронированными распределительными устройствами с управляемым потенциалом».

Коммутационные аппараты, соединительная ошиновка и все другие части, находящиеся под напряжением, помещаются внутри плотных труб из изоляционного материала, заполненных диэлектриком — сжатым воздухом для высоких напряжений и минеральным маслом для средних.

Равномерное распределение электрического поля обеспечивает существенное уменьшение расстояний между фазами и относительно корпуса и благодаря этому — минимальные внешние габариты и компактность аппаратурой. Если для КРУ среднего напряжения применение конструкции с управляемым потенциалом типа «Изотюб» является существенным усовершенствованием, то в области высоких и весьма высоких напряжений эта конструкция опре-

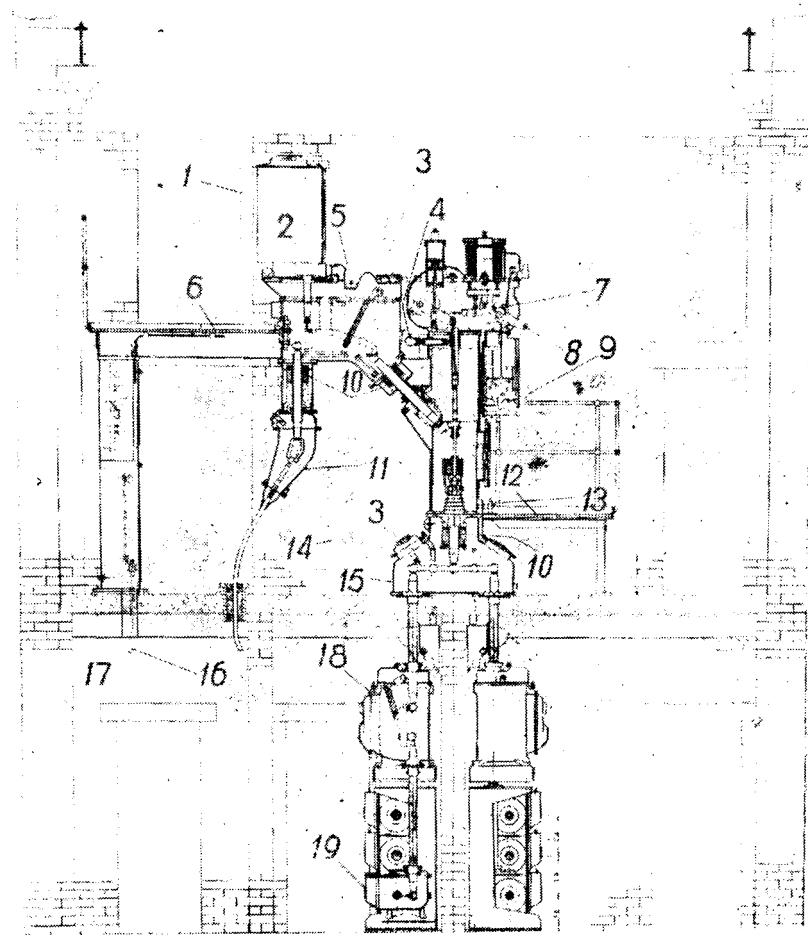


Рис. 2. Поперечный разрез по ячейке кабельной линии бронированного распределительного устройства 33 кв типа В24 электростанции Плимут В.

1 — отключенное положение трансформатора напряжения; 2 — трансформатор напряжения; 3 — съемный проходной изолятор для испытаний; 4 — вентиляционная трубка; 5 — линейный разъединитель; 6 — задняя панель; 7 — выключатель отключен; 8 — выключатель включен; 9 — съемный штурвал для ручного управления линейным и шинным разъединителями; 10 — трансформатор тока; 11 — концевая муфта кабеля; 12 — площадка для обслуживания; 13 — маслоспускной кран; 14 — перегородка; 15 — основание масляного выключателя; 16 — многожильный кабель; 17 — кабельный туннель; 18 — шинный разъединитель; 19 — коробка для ответвления от шин.

делила самую возможность изготовления КРУ бронированного типа.

Внешний металлический цилиндр корпуса ячейки обеспечивает механическую прочность и защиту находящихся внутри частей; на внутреннем цилиндре из изолирующего материала устанавливаются контактные части, выступающие внутрь цилиндра. Вокруг этих частей, в промежутке между цилиндрами, укрепляются металлические кольца, дающие равномерную конфигурацию электрического поля в пространстве между заземленным внешним стальным цилиндром и находящимися под напряжением частями аппаратуры, расположенными во внутреннем изолирующем цилиндре.

При однородном электрическом поле снижение электрических свойств дугогасящей среды, применяемой в выключателях, например масла, в результате старения, повторных отключений или же из-за загрязнения по другим причинам не является столь опасным, каким оно было бы при неоднородном поле.

Изолирующее вещество, находящееся в пространстве между двумя цилиндрами, изолировано как от действия дуги, так и от внешних воздействий и длительно сохраняет неизменными свои свойства, что позволяет заменять его лишь через большие промежутки времени и, кроме того, уменьшить размеры ячеек при одновременном повышении надежности. Это приводит к заметному уменьше-

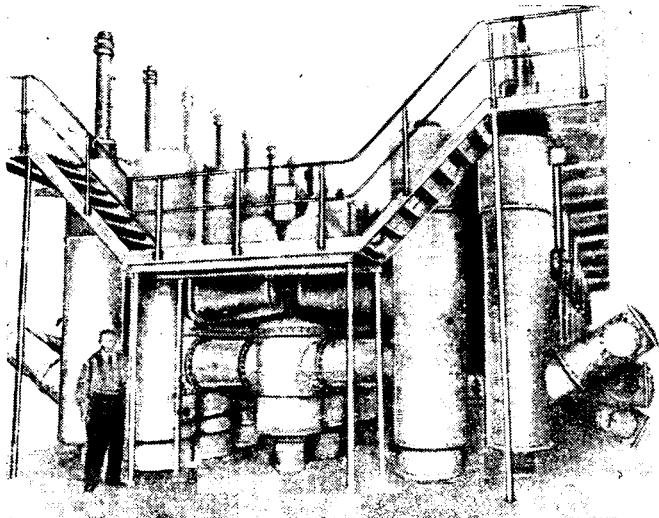


Рис. 3. Открытая подстанция 150 кв с бронированной аппаратурой типа „Изотюб“.

нию площади, занимаемой КРУ. Так, для сооружения одной подстанции 150 кв при применении обычной аппаратуры наружной установки потребовалась бы площадь около 2 830 м²; в действительности она была размещена при установке распределительного устройства типа «Изотюб» на площади всего в 560 м². На рис. 3 показан общий вид подстанции 150 кв с аппаратурой типа «Изотюб».

Распределительные устройства этого типа изготавливаются с масляной изоляцией для напряжений 10...60 кв, с отключающей способностью до 1 200 Мвт и с воздушной изоляцией для напряжений от 50 кв при отключающей способности 1 250 Мвт до 150 кв при отключающей способности 3 500 Мвт; разрабатываются также конструкции на 220 кв¹.

Каждая ячейка размещается в корпусе, состоящем из нескольких стальных цилиндров, в которых заключены внутренние изолирующие трубы. Сборные шины, выключатели, разъединяющие элементы и трансформаторы тока и напряжения находятся внутри труб. В нижней части ячейки расположены зажимы для кабелей, присоединяемых к корпусу через проходные изоляторы, снабженные устройствами для сигнализации наличия напряжения на каждой фазе кабеля.

Весь корпус ячейки до 60 кв (рис. 4) заполнен маслом, отделенным от масла, находящегося в изолирующих трубах, что исключает возможность внутренних коротких замыканий.

Гашение дуги производится в вертикальной разрывной камере масляного выключателя. Выключатели соединяются

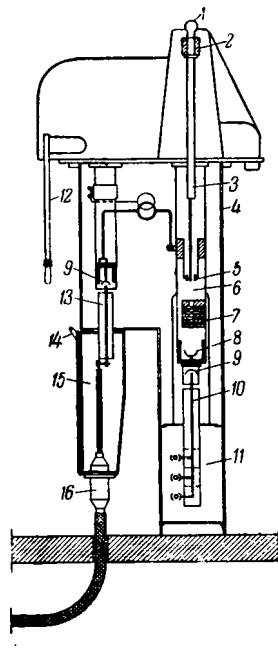


Рис. 4. Схематический разрез по ячейке среднего напряжения типа „Изотюб“.

1 — головка контактного стержня; 2 — траверса привода; 3 — контактный стержень; 4 — кожух из листовой стали; 5 — подвижной контакт; 6 — разрывная камера; 7 — гасительная камера; 8 — главный контакт; 9 — втычной контакт; 10 — проходной изолятор со стороны шин; 11 — сборные шины; 12 — рычаг управления; 13 — проходной изолятор со стороны кабеля; 14 — патрубок для заливки; 15 — зажимы для кабеля; 16 — приварная воронка.

¹ По другим сведениям распределительные устройства на 220 кв типа «Изотюб» уже изготавливаются; ширина ячейки 220 кв равняется 4,1 м [Л. 9].

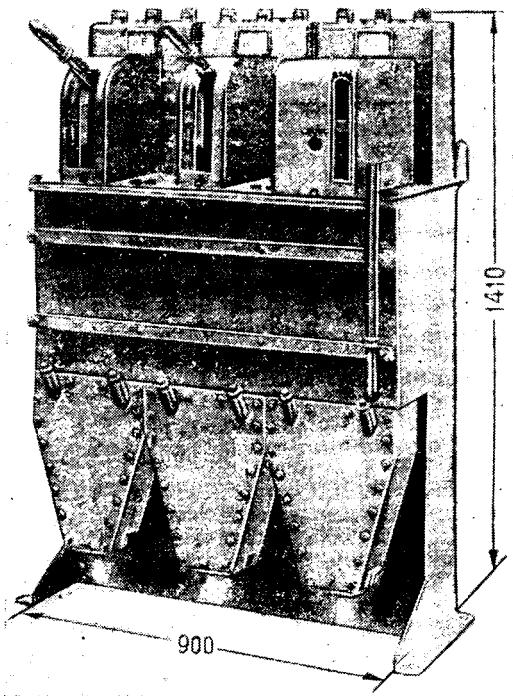
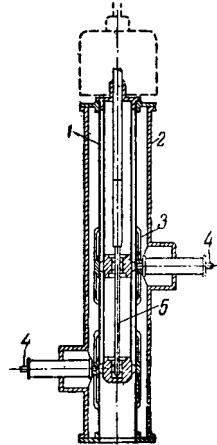
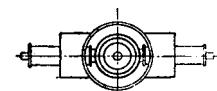


Рис. 5. Комплектная ячейка „Изотюб“ с двумя транзитными кабелями, силовым выключателем и соответствующими рукоятками управления.

с неподвижными токоведущими частями ячейки при помощи втычных контактов тюльпанного типа. При отключении выключателя его контактный стержень выходит из нижнего неподвижного контакта и поднимается, оставаясь в соприкосновении только с верхним кольцевым контактом. В отключенном положении выключателя контактный стержень легко вынут из ячейки, что позволяет проверять его состояние без разборки выключателя, а также надежно отключать линию от шин, исключая возможность ошибочного включения выключателя. Несмотря на то, что в разрывной камере находится лишь небольшое количество масла (выключатель 15 кв, 150 Мвт имеет объем масла 0,75 л на одну фазу), дуга охлаждается достаточно интенсивно, так как в охлаждении ее участвует и масло, находящееся в пространстве между стальной и изолирующей трубами.

Привод автоматического выключателя имеет отключающую и включающую пружины, и немедленно после операции включения, производящейся с большой скоростью, выключатель оказывается подготовленным к отключению. Для сверхбыстро действующего автоматического повторного включения применяются выключатели с двумя разрывными камерами.



Трансформаторы тока находятся в верхней части ячейки; для их осмотра имеется люк, открывающийся после удаления из ячейки масла. Трансформаторы напряжения присоединены к шинам через предохранители, конструктивно подобные выключателям, также имеющие внизу втыч-

Рис. 6. Разрез по выключателю ячейки высокого напряжения типа „Изотюб“.

1 — изолирующий кожух; 2 — металлический кожух; 3 — металлическое кольцо; 4 — соединение; 5 — контактный стержень.

кой, а вверху — кольцеобразный контакты. Между этими контактами устанавливается патрон с плавкой вставкой, который вынимается наружу вверх таким же образом, как подвижной контакт выключателя при помощи соответствующей тяги из изолирующего материала.

На рис. 5 показан общий вид ячейки КРУ типа «Изотюб» на 10 кв с тремя силовыми кабелями, из которых два являются транзитными. Высота ячейки 1410 мм, ширина 900 мм, глубина 735 мм.

КРУ для напряжений до 220 кв, заполненное сжатым воздухом, по компоновке почти не отличается от КРУ с масляной изоляцией. На рис. 6 приведен разрез по камере выключателя такого КРУ. Ширина ячейки КРУ на 150 кв, с выключателями с отключающей способностью 2500 Мвт, равна 3 м [Л. 10].

Для облегчения эксплуатации и обслуживания установки разработаны различные вспомогательные приспособления. Так, заземление отходящей линии осуществляется путем введения на место подвижного контакта выключателя металлического штыря такой длины, что он достигает только кольцевого контакта; для сигнализации наличия напряжения на линии или на шинах или же для проверки синхронности и синфазности двух напряжений на ячейках могут быть установлены неоновые сигнальные лампы.

По имеющимся данным КРУ типа «Изотюб» обладает хорошими эксплуатационными характеристиками, что подтверждается не только результатами успешных испытаний опытных установок, но и практикой многолетней эксплуатации. Так, например, на подстанции 110 кв в Гронингене (Голландия) аппаратура этого типа работает более 15 лет.

КРУ типа «Изотюб» изготавливаются в настоящее время, кроме Голландии, также и в Италии; вероятно, этот тип КРУ найдет в ближайшее время применение и в других странах. Советская электропромышленность, имеющая в своем активе немалые достижения, должна в кратчайший срок преодолеть отставание и в области изготовления современных КРУ ВН.

Литература

1. F. Sommerlatte. Technik, 11, № 6, 1956.
2. H. De Marsac. Electricité, № 216 и 218, 1955.
3. A. Olin. ASEA's Tidning, 47, № 10—11, 1955.
4. Elettrotecnica, № 3, 1955 (реклама).
5. El. Times, 198, № 3327, 1955.
6. G. B. Hayward. Metrop. Vickers Gazette, 25, № 424, 1954.
7. Quaderni di studi e notizie, 11, № 193, 1955.
8. E. Cappi. Elettrificazione, № 10, 1955.
9. El. Light a. Power, 32, № 4, 1954.
10. Bull. AIM, № 7—9, 1955.

Инж. Н. Н. Аントшин

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ЯПОНИИ НА ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

До последнего времени электрификация государственных железных дорог Японии проводилась на постоянном токе напряжением 1500 в. В 1956 г. общая протяженность электрифицированных по этой системе государственных магистральных железных дорог достигла 2000 км и они выполнили около 30% общего объема железнодорожных перевозок¹.

Острая нехватка каменного угля и нефти заставляет японские железные дороги изыскивать пути, обеспечивающие снижение потребности железнодорожного транспорта в топливе и форсировать в связи с этим темпы электрификации железных дорог.

Необходимость уменьшения капиталовложений и затрат цветного металла привела к разработке системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты. Технико-экономические расчеты показали, что эта система обеспечивает значительное уменьшение капиталовложений.

¹ Суммарная протяженность государственных и частных электрифицированных железных дорог Японии превышает 7000 км. Большинство частных дорог электрифицировано на постоянном токе более низкого напряжения.

Экспериментальное изучение новой системы электрической тяги проводилось на участке Сенсан — Тохуку (рис. 1) протяженностью 30 км, электрифицированном на однофазном токе 20 кв, 50 гц и сданном в эксплуатацию в 1954—1955 гг.*. Эксплуатация первого электрифицированного участка подтвердила высокие тяговые свойства электровозов однофазного тока, развивающих на 30% большие тяговые усилия, чем электровозы постоянного тока той же мощности.

Принято решение о переходе к более широкой электрификации железных дорог на однофазном токе. По этой системе будут электрифицированы железные дороги в районах, питаемых трехфазным переменным током частоты как 50, так и 60 гц.

Первым электрифицированным участком однофазного тока 60 гц будет участок Майбара — Цуруга протяженностью 45,1 км (рис. 1), который должен быть сдан в эксплуатацию в октябре 1957 г. Питание его предполагается осуществить от двух тяговых подстанций, расположенных в названных выше пунктах, причем подстанция у Майбара будет совмещена с существующей подстанцией постоянного тока, а подстанция у Цуруга — с понижающей подстанцией системы общего энергоснабжения.

Примерно в середине участка у Киноно контактная сеть будет секционирована при помощи нейтральной вставки. Предусмотрено сооружение нескольких промежуточных постов секционирования, управление которыми будет осуществляться дистанционно из Цуруга.

При электрификации этого участка будут решены вопросы стыкования различных систем электрической тяги. Одним из возможных вариантов является введение на первый период эксплуатации между Майбара, электрифицированной на постоянном токе, и Цуруга, электрифицируемой на однофазном токе, короткого плеча, обслуживающего паровозами или тепловозами. Однако возможно, что стыкование систем будет осуществлено в Майбара путем переключения питания контактной сети однофазным или постоянным током.

До вынесения решения о переходе к широкой электрификации железных дорог по новой системе тяги были проведены исследования о влиянии однофазной тяговой нагрузки на величину асимметрии в трехфазных распределительных сетях. Было изучено влияние асимметрии напряжений на работу асинхронных двигателей, синхронных компенсаторов, турбо- и гидрогенераторов. Наблюдения показали, что величина асимметрии в трехфазной сети получается небольшой и заметного мешающего влияния на работу перечисленных машин не оказывает. В точке подключения однофазной нагрузки величина асимметрии приближалась к расчетно-допустимому пределу, принятому равным 3%. Ввиду того, что в районах электрификации железных дорог имеются достаточно мощные линии электропередачи высокого напряжения, предполагается, что величина асимметрии будет небольшой и не будет оказывать заметного мешающего влияния на работу не-тяговых потребителей.

Номинальное напряжение контактной сети принято равным 20 кв. Это напряжение считается в Японии стандартным для линий электропередачи высокого напряжения. Питание контактной сети будет производиться от однофазных трансформаторов, включенных для обеспечения более равномерной нагрузки трехфазной системы по трехфазно-двухфазной схеме (схема Скотта). Отдельные фазы разделяются между собой посредством нейтральных вставок, которые устанавливаются также посередине между тяговыми подстанциями и служат для разграничения зон их питания. Параллельная работа подстанций не предусматривается.

На тяговых подстанциях предполагается установить воздушные выключатели мощности. Расстояние между подстанциями принято равным 48 км. На станциях, прилегающих к участкам с интенсивным движением, контактная сеть будет оборудована линейными выключателями. Это дает возможность в случае необходимости отключить поврежденный участок контактной сети, не нарушая при этом движения на соседних участках.

Для уменьшения падения напряжения изучается воз-

* Первая часть опытного участка протяженностью 20 км была сдана в эксплуатацию в октябре 1954 г. В 1955 г. длина участка была увеличена до 30 км.

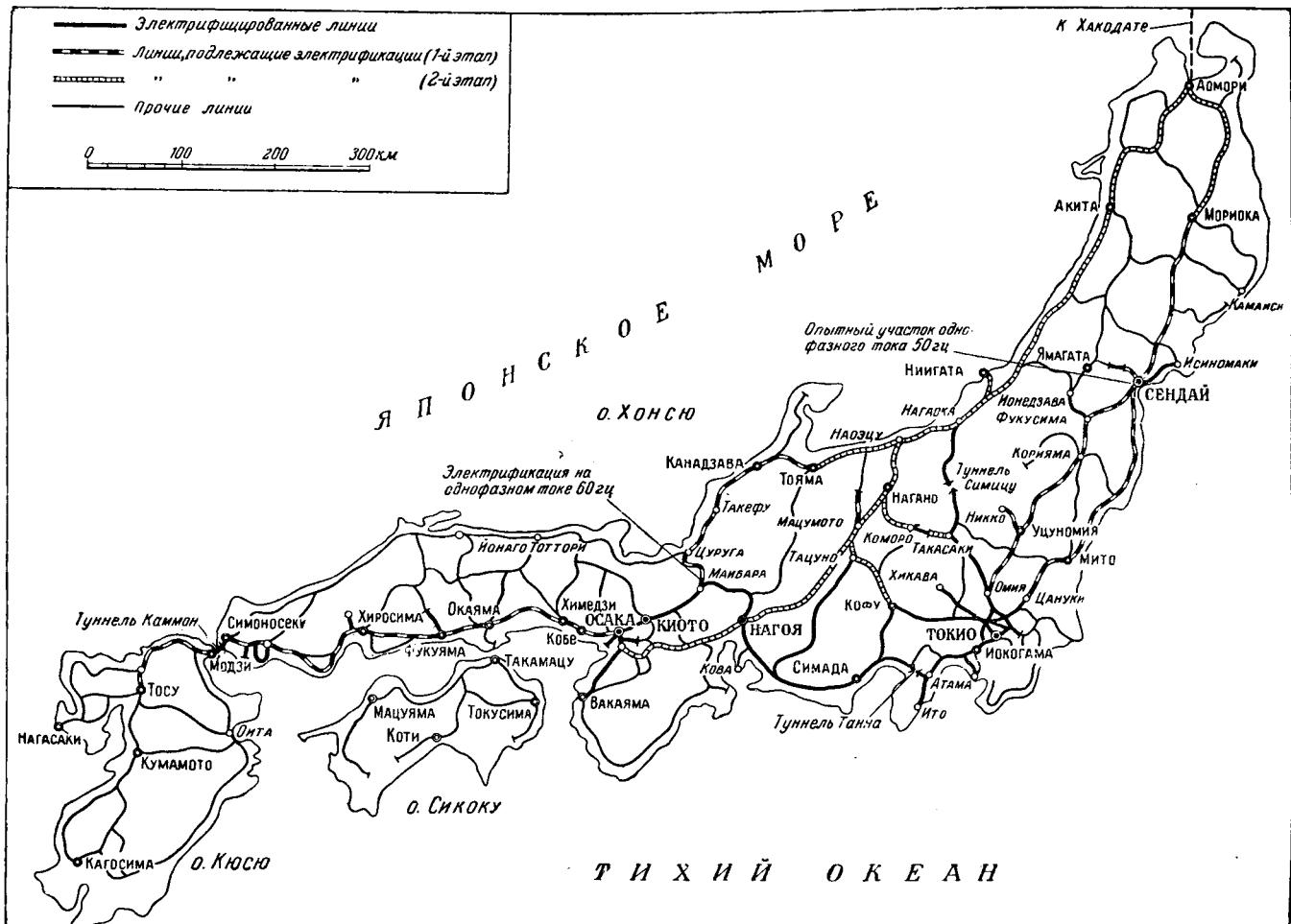


Рис. 1. Карта электрифицированных железных дорог Японии.

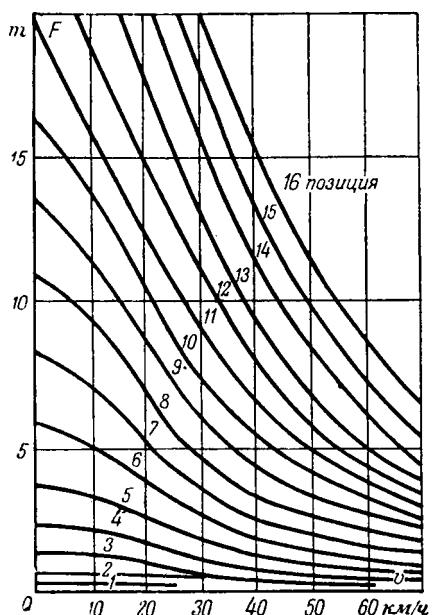


Рис. 2. Тяговые характеристики электровоза с однофазными коллекторными тяговыми двигателями типа ED441 при различных позициях контроллера.

можность применения продольной емкостной компенсации контактной сети.

Контактная сеть подвешивается на консолях, изоляторы которых смешены к опоре для уменьшения воздей-

ствия дымовых газов. Эксплуатация показала, что такое расположение изоляторов значительно уменьшает их загрязнение и увеличивает их эксплуатационную надежность. После прохождения 2 000 поездов, обслуживаемых паровозами, загрязнение изоляторов было небольшим и не вызывало значительного уменьшения их электрической прочности. Были проведены опыты по чистке изоляторов мелкими струями воды, нагнетаемой специальными насосами. Изоляторы выдерживают импульсное напряжение 150 кв макс и напряжение 60 кв при 50 гц.

Для уменьшения перенапряжений на тяговых подстанциях и локомотивах предусматривается установка разрядников, срабатывающих при повышении напряжения до 40 кв. Расстояние между контактным проводом и заземленными частями установлено равным 250 мм.

В качестве основного типа принята прямая подвеска, но некоторые участки оборудованы косой подвеской. Контактная сеть состоит из медного контактного провода с поперечным сечением 113,6 мм² и несущего троса сечением 51,6 мм².

Топографические условия Японии делают необходимой прокладку линий связи параллельно полотну железной дороги. Для защиты линий связи от опасного и мешающего воздействия тяговых токов на некоторых участках установлены (как это сделано в ряде случаев на государственных железных дорогах Швеции) отсасывающие трансформаторы, и на опорах контактной сети подвешен отсасывающий провод. На ряде участков линии связи будут калиброваны.

После сопоставления различных схем питания рельсовых цепей была выбрана однорельсовая схема постоянного тока с защитными дросселями. Успешные результаты были также достигнуты с двухрельсовой системой однофазного тока повышенной частоты (83,3 гц). Но эта система была признана менее экономичной, так как она требует прокладки четырехпроводной распределительной сети.

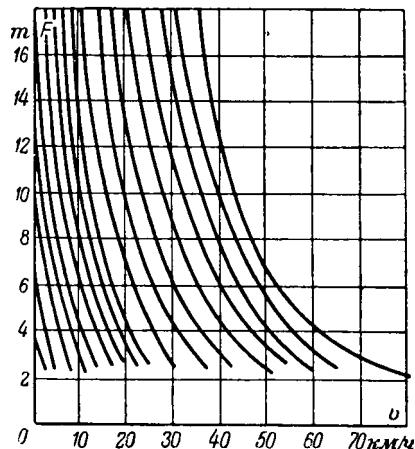


Рис. 3. Тяговые характеристики электровоза с ионными преобразователями типа ED451 при различных позициях контроллера.

Наличие большого количества туннелей малого габарита привело к решению об уменьшении на 150 мм высоты подвижного состава, предназначенного для работы на этих участках (высота электровозов при опущенном токоприемнике принята равной 4 140 мм).

При разработке электровозов однофазного тока большое внимание было уделено уменьшению их веса. Это вызвано тем, что на линии Сенцан, на которой проводились первые опыты по применению электрической тяги на однофазном токе 50 Гц, нагрузка оси на рельсы ограничивается 15 т. Для работы на этой линии построены электровозы двух типов: с однофазными коллекторными тяговыми двигателями (тип ED44) и с ионными преобразователями (тип ED45). Их основные данные указаны в табл. 1.

Таблица 1

	Тип электровоза	
	ED44	ED45
Осевая формула	$B_0 - B_0$	$B_0 - B_0$
Общий вес, т	60	59,2
Длина по буферам, мм	13 300	14 200
Высота при опущенном токоприемнике, мм	4 100	4 100
Ширина, мм	2 800	2 800
База тележки, мм	2 650	2 300
Расстояние между шкворнями, мм	6 300	7 400
Диаметр колес, мм	1 250	1 070
Передаточное отношение	93 : 16 = 5,81	91 : 16 = 5,69

Тяговые характеристики электровозов показаны на рис. 2 и 3.

Для электровозов типа ED44 разработаны три варианта однофазных коллекторных тяговых двигателей мощностью 400...450 л. с.; их основные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

	Тип двигателя		
	EFCO-H60	TDK 653-A	WBM 310-14
Мощность часового режима, квт	300	285	335
Ток часового режима, а	1 900	1 940	2 350
Напряжение, в	220	200	200
Скорость вращения, об/мин	1 250	1 250	1 160
Число полюсов	16	14	14
Расход воздуха, м ³ /мин	90	95	95
Вес, т	3,390	2,950	3,155

Электровозы типа ED45 оборудованы четырехполюсными тяговыми двигателями постоянного тока типа МВ-3026В длительной мощностью по 250 квт при 500 в, 550 а и 1 000 об/мин. Расход воздуха равен 63 м³/мин на двигатель. Первые электровозы типа ED44 сданы в эксплуатацию в августе, ED45 — в сентябре 1955 г. Для линии Хокурику, электрифицируемой на однофазном токе 60 Гц, заказаны 18 электровозов с ионными преобразователями, близких по своей конструкции к электровозам типа ED45, изготовленных для линии Сенцан (рис. 4). Основные данные этих электровозов следующие:

Осевая формула	$B_0 - B_0$
Мощность длительного режима, л. с.	2 010
Сила тяги длительного режима, кг	14 681
Общий вес, т	60
Длина по буферам	14 249
Ширина, мм	2 794
Высота (при опущенном токоприемнике), мм	4 140
База тележки, мм	2 388
Расстояние между шкворнями, мм	7 391
Диаметр колес, мм	1 118
Конструкционная скорость, км/ч	85,3

Выпрямление тока производится по двухполупериодной схеме посредством восьми игнитронов с водяным охлаждением. На электровозе установлено четыре 6-полюсных тяговых двигателя постоянного тока с форсированной вентиляцией. Применена опорно-осевая подвеска; зубчатая передача — эластичная; передаточное отношение 91 : 16 = 5,68. Тяговые двигатели постоянно соединены параллельно. Управление электровозами осуществляется переключением выводов вторичной обмотки силового трансформатора посредством контакторов. Электровозы с однофазными коллекторными тяговыми двигателями для этой линии пока еще не заказаны.

Кроме указанных, заказаны два опытных электровоза, один из которых должен быть оборудован экскитронами, другой — игнитронами. Эти электровозы должны быть переданы в опытную эксплуатацию на линию Сенцан в 1957 г.

Технико-экономические расчеты показали, что система электрической тяги на однофазном токе промышлен-

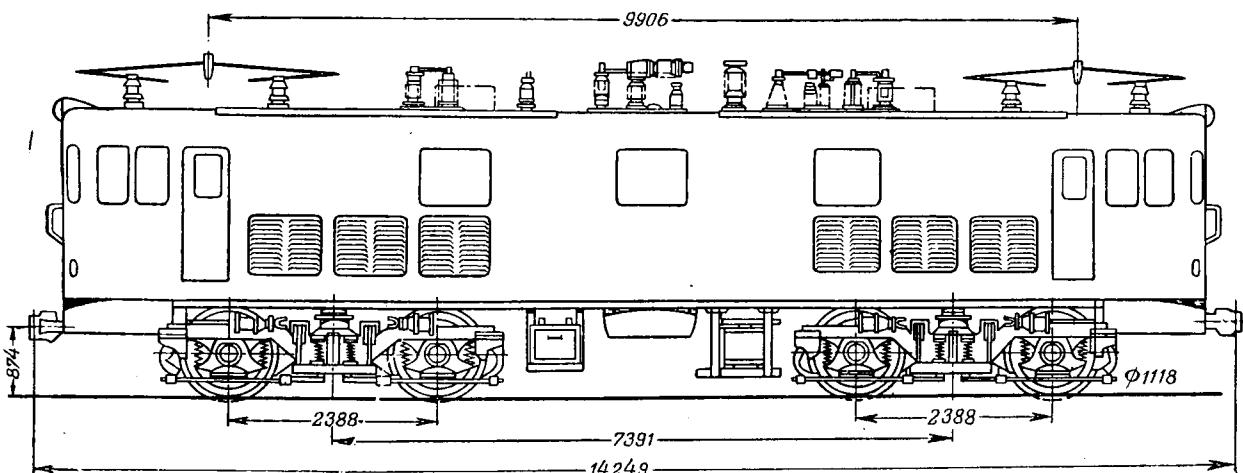


Рис. 4. Основные размеры электровоза с ионными преобразователями для линии Хокурику.

ной частоты обеспечивает по сравнению с применяемой в Японии системой постоянного тока напряжением 1500 в значительное уменьшение капиталовложений и эксплуатационных расходов. Расчеты были проведены для линий с различной грузонапряженностью (табл. 3).

Таблица 3

Участок	Грузонапряженность, млн. т $\text{км} \cdot \text{год}$	Стоимость электрификации на постоянном токе 1500 в по сравнению со стоимостью электрификации на однофазном токе 20 кв, %			Эксплуатационные расходы при электрификации на постоянном токе 1500 в по сравнению с расходами при электрификации на однофазном токе 20 кв, %
		Стационарные устройства	Электровозы	Всего	
Двухпутный . . .	25,6	133	107,5	120	123
Однопутный . . .	13,1	137	115	127	126
Однопутный . . .	4,4	148	129,5	142	142
Однопутный . . .	2,9	145	98,5	126,5	138

Применение системы однофазного тока промышленной частоты позволяет расширить масштабы электрификации железных дорог, так как благодаря уменьшению капиталовложений и эксплуатационных расходов становится рентабельной электрификация линий со сравнительно небольшой грузонапряженностью.

Из 3300 км железных дорог, подлежащих электрификации в ближайшие годы, 2640 км (80%) предполагается электрифицировать на однофазном токе и только 660 км (20%) на постоянном токе. Таким образом система однофазного тока промышленной частоты принимается в качестве основной для дальнейшей электрификации железных дорог Японии.

Литература

1. Bull. A. I. C. C. F., La Traction électrique dans les Chemins de Fer, т. VII, № 4.
2. Bull. A. R. C. A., Electric Traction on the Railways, т. VII, № 5.
3. S. Seki, The Railway Gazette, т. 105, № 21.
4. The Locomotive, т. 63, № 773.
5. S. Seki, Bull. A. I. C. C. F., La Traction électrique dans les Chemins de Fer, т. VIII, № 2.

Кандидат техн. наук А. А. Терехов

НОВЫЕ ТИПЫ СТРЕЛОЧНЫХ ЧАСТОТОМЕРОВ

Для исследовательских, испытательных и градирочных целей необходимы частотомеры высокой точности. Применяемые для этой цели измерительные установки сложны и громоздки. Более удобные и простые стрелочные частотомеры с электрическими резонансными цепями не могут быть выполнены высокой точности из-за явлений старения и температурной зависимости элементов схемы.

Значительно повысить точность стрелочных частотомеров удается специальным применением камертонов [Л. 1]. Если к ножке камертонов 1 (рис. 1) укрепить катушки 2, помещенные в поле постоянных магнитов 3, и питать катушки током измеряемой частоты, то при постоянном приложении напряжения в случае резонанса этот ток будет иметь минимальное значение. Полное сопротивление цепи катушек в функции частоты изменяется по ре-

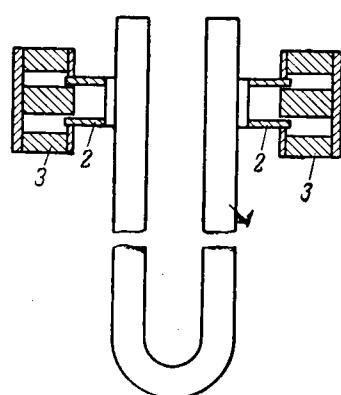


Рис. 1. Принципиальная схема устройства камертонов.
1 — камертон; 2 — катушка;
3 — постоянные магниты.

Вологодский государственный университет
www.booksite.ru

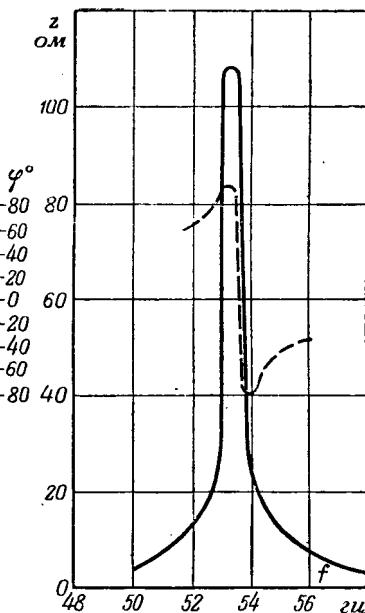


Рис. 2. Зависимость полного сопротивления z (сплошная кривая) и угла сдвига фаз φ (пунктирная кривая) в цепи катушек камертонов от измеряемой частоты.

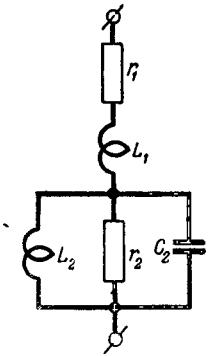


Рис. 3. Схема замещения камертонов.

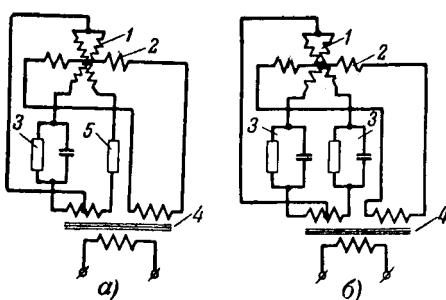


Рис. 4. Схемы частотомеров

а — с одним камертоном; б — с двумя камертонами.
1 — подвижные катушки логометра; 2 — неподвижные катушки логометра; 3 — камертон; 4 — трансформатор;
5 — активное сопротивление.

зонансной кривой, причем угол сдвига фаз вблизи резонанса изменяет свою величину почти скачкообразно на 180° при переходе с индуктивной ветви кривой на емкостную (рис. 2). Таким образом, такой камертон ведет себя как параллельная резонансная цепь. Так как угол сдвига фаз равен нулю не точно при резонансной частоте, а при несколько большем ее значении, схема замещения будет иметь вид, показанный на рис. 3.

Показывающим прибором является логометр электродинамической системы. Катушки камертонов включаются последовательно с одной из подвижных катушек, а другая включается через активное сопротивление. Неподвижные катушки логометра питаются от отдельной обмотки трансформатора (рис. 4, а).

Чувствительность измерительного устройства может быть значительно повышена, если последовательно с второй подвижной катушкой логометра включить камертонные катушки, как это показано на рис. 4, б. Камертонные выполняются так, что один из них работает на индуктивной ветви резонансной кривой, а другой — на емкостной.

Во избежание ложных показаний прибор снабжен язычком, настроенным на среднюю частоту, и отсчет следует производить только тогда, когда колеблется язычок. Шкала прибора практически равномерная и только немного сжата по краям.

Выполненный прибор с пределом измерения от 49,95 до 50,05 гц имел погрешности менее $5 \cdot 10^{-4}$ гц. Дополнительные погрешности показаний прибора от изменения температуры окружающей среды весьма незначительные при выборе соответствующего материала камертонов.

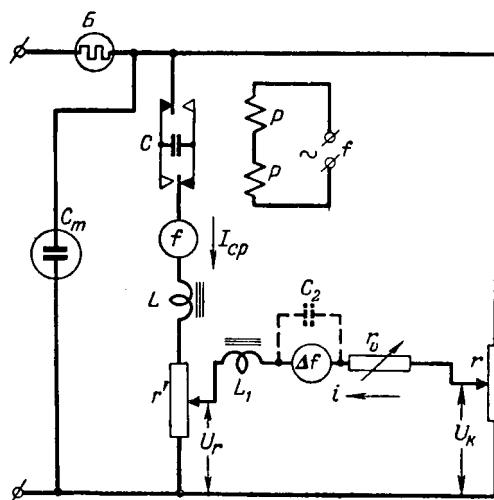


Рис. 5. Принцип работы частотомера с компенсационным устройством.

B — барометр; *C_m* — стабилизатор; *P* — поляризованные реле; *f* — грубый измеритель; Δf — точный измеритель.

Более значительным оказывается влияние намагничивания камертоном полем постоянных магнитов. Однако это влияние стабильно и учитывается при градуировке прибора.

Недостатком данного прибора является невозможность выполнения его многопредельным, поэтому его можно применять только для контроля фиксированной частоты.

На рис. 5 изображена принципиальная схема частотомера, выполненного по общезвестной схеме Максвелла, дополненной компенсационным устройством, позволяющим получить многопредельный частотомер с весьма узким диапазоном измерений и достаточно высокой точности [Л. 2]. Измеряемая частота подается на катушки поляризованных реле, контакты которых периодически переключают конденсатор в такт с измеряемой частотой. Среднее значение тока I_{cp} пропорционально измеряемой частоте и измеряется прибором *f*. Этот ток создает на сопротивлении r' падение напряжения, которое компенсируется встречным напряжением U_k той же величины. Ток i в компенсационной цепи измеряется прибором Δf , чувствительность которого примерно в 10^3 раз больше чувствительности прибора *f*.

Таким образом, прибором *f* производят грубые измерения в широком диапазоне частот, а прибором Δf измеряют отклонения от некоторого установленного значения средней частоты из этого диапазона. Установка средних значений частот производится изменением (плавно или ступенчато) сопротивлений r и r' , причем число этих значений в данном диапазоне частот практически может быть любым.

Изменением величины сопротивления r_v соответственно изменяется предел измерения прибора Δf . Шкала прибора Δf градуируется либо в герцах, либо в процентах и имеет нулевую отметку в середине шкалы.

Если применить самопищущий прибор с автокомпенсирующим усилителем и включить его в компенсационную

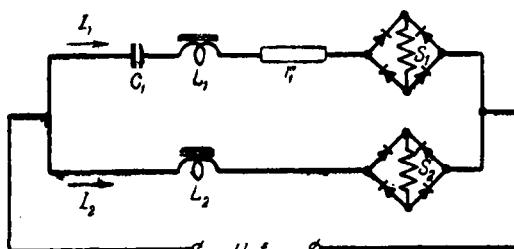


Рис. 6. Принципиальная схема частотомера детекторной системы. S_1 и S_2 — рамки логометра.

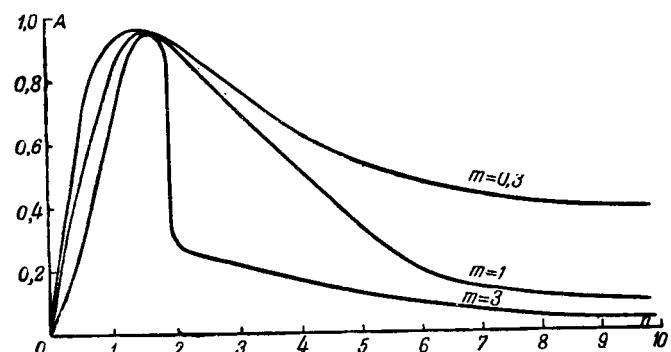


Рис. 7. Изменение функции *A* в зависимости от *n* при различных значениях *m*.

цепь частотомера, то можно записать отклонения от выбранного значения средней частоты.

Выполненный частотомер имеет два грубых предела измерения: $0 \div 60$ и $0 \div 20$ гц. Если во время работы прибора исчезнет напряжение измеряемой частоты или снижается настолько, что реле перестанут работать, то измерители *f* и Δf перегружаются, причем последний даже может выйти из строя. Чтобы избежать этого, в схеме предусмотрено защитное реле, отключающее оба измерителя.

Погрешность измерений прибором не превышает $0,1\%$ в диапазоне частот $43 \dots 55$ гц и $0,3\%$ в диапазоне $15 \dots 18$ гц.

Показания прибора не зависят от формы кривой напряжения измеряемой частоты и в широких пределах от его действующего значения. Габариты прибора: $300 \times 300 \times 150$ мм; вес — $11,8$ кг.

Как известно, большим недостатком стрелочных частотомеров детекторной системы является значительная зависимость их показаний от формы кривой напряжения измеряемой частоты. На рис. 6 приведена схема стрелочного частотомера детекторной системы, показания которого в значительно меньшей степени зависят от формы кривой напряжения измеряемой частоты [Л. 3].

Одна рамка логометра магнитоэлектрической системы включена через выпрямитель и последовательную резонансную цепь, а другая — через выпрямитель и дроссель. Ток в резонансной цепи

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (x_{L_1} - x_{C_1})^2}}$$

В случае резонанса ($f = f_0$) $x_{L_1} = x_{C_1} = x_0$.

Если теперь представить $\frac{x_0}{r_1} = m$ и $\frac{f}{f_0} = n$, то

уравнение будет иметь вид:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (mn r_1 - \frac{m}{n} r_1)^2}} = \frac{U}{r_1} A,$$

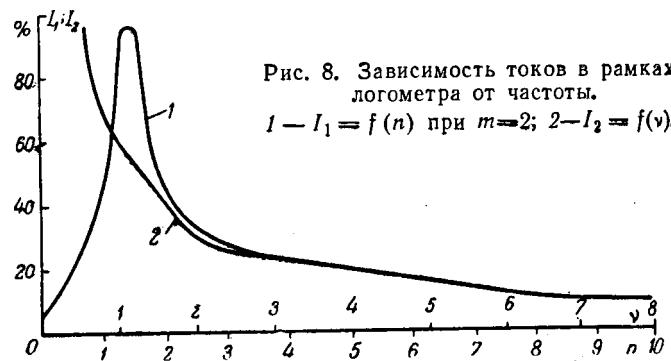


Рис. 8. Зависимость токов в рамках логометра от частоты.

1 — $I_1 = f(n)$ при $m=2$; 2 — $I_2 = f(v)$.

Хроника

КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ В г. БАКУ

В мае с. г. Азербайджанское республиканское отделение НТОЭП провело в г. Баку конференцию читателей журнала «Электричество». Участники конференции в своих выступлениях внесли ряд предложений по улучшению журнала.

В частности, было отмечено (инж. Б. Н. Еганов, Азэнерго), что многие дискуссии на страницах журнала проходят недостаточно организованно и результативно; так, не во всем дискуссиям редакция дает полноценное заключение (например, по такой важной дискуссии, как включение трансформаторов без сушки). Некоторым читателям вследствие этого трудно самим найти верное заключение.

Одновременно с помещением в разделе хроники технической информации о проводимых научно-технических совещаниях следовало бы публиковать в том же номере журнала статью на базе основного доклада.

Прекращение с 1956 г. помещения в журнале реферативных карточек не оправдано, так как они часто помогали читателям быстро ориентироваться при подборе литературы по отдельным научным и инженерным проблемам.

Указывалось (инж. Н. П. Клюцко, Сумгaitская ТЭЦ), что в журнале недостаточно освещаются вопросы внедрения новой техники. Желательно, чтобы в каждом номере журнала было опубликовано что-то новое; к сожалению, в действительности этого пока нет. О новинках техники читатели журнала узнают с большим опозданием (так было с появлением в журнале статей о полупроводниках, о счетно-решающих электрических машинах и др.). Желательно, чтобы на страницах журнала больше сообщалось о свойствах полупроводников, это принесло бы читателям практическую пользу.

На конференции отмечалась (инж. А. П. Задов, Энергосбыт Азэнерго) заслуга журнала «Электричество» в развитии теоретических знаний инженеров; содержание журнала, а также качество статей, помещаемых в журнале, улучшилось. Однако некоторые темы в журнале обходятся мало, например, помещается материалов о повышении коэффициента мощности, о рациональной системе тарифов, об уменьшении потерь и др.

Проф. З. Б. Ельяшевич (кафедра теоретической электротехники Азербайджанского индустриального института им. Азизбекова) сообщил о своем впечатлении, что в тематике журнала не заметно определенного плана и иногда кажется, что помещение отдельных статей можно объяснить лишь тем, что они написаны и присланы автором в редакцию.

Темы намеченных дискуссий следовало бы заранее опубликовать в журнале, чтобы каждый читатель мог заранее подумать и подготовиться к оценке вопросов, связанных с предстоящей дискуссией. Освещению на страницах журнала вопросов истории электротехники должно быть и в дальнейшем уделено большое внимание.

где

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(mn - \frac{m}{n}\right)^2}}.$$

На рис. 7 показано изменение функции A в зависимости от n при $m = \text{const}$. Видно, что можно подобрать такое значение m , при котором $I_1 = \varphi(f)$, начиная с третьей гармоники, практически будет совпадать с кривой

$$I_2 = \varphi(f), \text{ причем } I_2 \approx \frac{k}{v}, \text{ где } v \text{ — порядковое число}$$

высшей гармонической, а $k = \frac{U}{2\pi L_2}$.

На рис. 8 приведены кривые $I_1 = f(n)$ и $I_2 = f(v)$. Значение тока I_1 для резонанса принято за 100%, а отношение $n:v$ и $f_0:f_x$ выбрано равным 1:1,3. При этом отношение получается хорошее соппадение обеих кривых, когда $m = 2$. Если в особых случаях необходимо исклю-

чить влияние третьей гармоники, то нужно выбрать значение m немного более двух и тогда кривая $I_2 = f(v)$ пересечется с кривой $I_1 = f(n)$ при $v = 3$.

Инж. И. М. Петросов
г. Баку

В СЕКЦИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НТОЭП

Научно-техническое совещание по определению электрических нагрузок и регулирования напряжения

В мае 1957 г. в Ленинграде секцией НТОЭП было проведено научно-техническое совещание по вопросам определения электрических нагрузок и регулирования напряжения промышленных предприятий.

В совещании приняло участие около 300 инженерно-технических и научных работников промышленных предприятий, энергетических систем, проектных организаций и высших учебных заведений различных городов страны.

Доклады по электрическим нагрузкам были посвящены теоретическим обоснованиям и результатам практических проверок различных методов определения электрических нагрузок промышленных предприятий. Особое внимание было обращено на анализ методов, разработанных советскими специалистами на основе теории вероятностей. М. К. Харчев (Ленинградское отделение «Тяжпромэлектропроект») в кратком обзоре охарактеризовал достоинства и недостатки современных методов определения электрических нагрузок промышленных предприятий. Говоря о последних, он указал, что, например, при применении двучленных формул известную трудность представляет выбор коэффициентов, постоянных для той или иной группы приемников одинакового режима работы; метод, основанный на применении коэффициента спроса, неизменного по своей величине для группы с любым числом приемников, обладает тем недостатком, что при малом числе приемников возможны ошибки в оценке нагрузок; при применении же методов, основанных на использовании большого числа показателей нагрузок, затруднительна опытная проверка их по материалам обследования нагрузок.

Г. М. Каляев (Новочеркасский политехнический институт), автор работ по определению нагрузок на основе применения теории вероятностей, сообщил, что предложенный им метод упорядоченных диаграмм нагрузки (метод кривых распределения возможных значений нагрузки) позволил перейти от расчета сечений проводников по величине эффективного тока к расчету по тепловому действию тока переменной нагрузки. Докладчик отметил, что выбор

кривой $I_2 = f(v)$ для резонанса, то нужно выбрать значение m немного более двух и тогда кривая $I_2 = f(v)$ пересечется с кривой $I_1 = f(n)$ при $v = 3$.

Испытания показали, что при клирфакторе в питающем напряжении до 14% показания прибора с пределом измерения 49...51 гц изменяются всего на 0,04 гц. Погрешность показаний прибора от нестабильности элементов схемы и от самого измерительного механизма не превышает 0,03 гц. Дополнительные погрешности от изменения напряжения на $\pm 10\%$ составляют 0,015 гц и от изменения температуры окружающей среды 0,03 гц на 10°C . Внутреннее сопротивление прибора очень высокое.

Литература

1. K. Sattelberg. ETZ-A, стр. 84, № 3, 1956.
2. R. Putz. Frequenz, стр. 109, № 4, стр. 157, № 5, 1955.
3. F. Angersbach. ATM, стр. 193, № 236, 1955.

Инж. П. С. Богуславский

получасового максимума в качестве расчетной нагрузки, применяемого рядом проектных организаций, является в принципиальном отношении сугубо условным, а в практическом отношении — весьма неточным допущением. Метод упорядоченных диаграмм нагрузки учитывает как допустимые кратковременные пики температуры, так и тепловой износ изоляции проводников, а также их постоянные времена нагрева.

С. Е. Гродский («Гипротракторосельхозмаш», г. Харьков) сообщил о результатах экспериментальных исследований электрических нагрузок на заводах тракторного и сельскохозяйственного машиностроения с целью установления фактических расчетных коэффициентов, необходимых при выборе сечения проводов и мощностей трансформаторов для указанных заводов. Теоретической основой исследований послужил метод упорядоченных диаграмм нагрузки, разработанный Новочеркасским политехническим институтом; кроме того, учитывались инструкции Тяжпромэлектропроекта по исследованию электрических нагрузок промышленных предприятий. По результатам исследований нагрузок фидеров было произведено сравнение значений коэффициентов спроса, получающихся при пользовании двучленными формулами, с фактическими коэффициентами спроса, которые были определены при исследованиях. Сравнение показало, что коэффициенты спроса, определенные на основании двучленных формул, для обследованных фидеров оказались завышенными по сравнению с фактическими значениями.

А. А. Максимов (Новосибирское отделение «Тяжпромэлектропроект») подробно остановился на недостатках как метода коэффициентов спроса, так и метода двучленных формул. По мнению докладчика, наилучшие результаты для приемников, работающих при длительном режиме, дает метод, основанный на применении коэффициентов использования и коэффициента максимума. Преимущества этого метода: наличие определенного физического смысла применяемых коэффициентов, неизменность значений коэффициентов использования для данной группы приемников, возможность определения в любых участках сети средней мощности узла без введения поправочных коэффициентов, возможность простого и точного определения величины превышения расчетного максимума над значением средней мощности.

Г. А. Штейнике (Горьковский политехнический институт) привел результаты опытного определения коэффициентов спроса машин контактной сварки на основе наблюдений и измерений нагрузок 13 фидеров питающих 293 сварочные машины в кузовном и прессовом корпусах Горьковского автомобильного завода.

Н. А. Киклевич (Донецкий научно-исследовательский угольный институт) сообщил об итогах теоретических и экспериментальных исследований электрических нагрузок угольных шахт Донбасса, проведенных в период 1945—1956 гг. На основе этих исследований была разработана достаточно теоретически обоснованная и практически удобная методика определения расчетных нагрузок по отдельным установкам угольных шахт.

П. Ж. Озол (Оргэнергонефть) привел результаты экспериментального определения коэффициентов спроса основных потребителей электроэнергии на нефтепромыслах в 1955—1956 гг. в районах Грозного, Баку, Татарской АССР и Башкирской АССР. В основу экспериментальной части работы был положен метод длительного наблюдения исследуемой нагрузки при помощи хронографа в комплекте с трехфазным счетчиком.

Г. В. Киселев (Ивановское отделение «Энергоголлерпром») остановился на методике определения электрических нагрузок предприятий текстильной промышленности (поясильно-ткацких и отделочных хлопчатобумажных фабрик) по средневзвешенным значениям удельного потребления электроэнергии на единицу продукции.

Б. С. Мешель (Киевское отделение НТОЭП) сообщил о целесообразности применения математической статистики для определения электрических нагрузок предприятий.

Ю. Л. Мукосеев (Горьковское отделение «Электропротект») предложил унифицировать обозначения, применяемые разными авторами для анализа и расчета электрических нагрузок, с целью облегчения задачи выбора чай-более рациональных методов определения электрических нагрузок.

Г. В. Сербиновский и В. А. Шевченко (Министерство электростанций СССР) остановились на отклонениях и уровнях напряжения в сетях районных энергетических управлений и на промышленных предприятиях. Ими были рассмотрены методы централизованного (на станциях и районных подстанциях) и местного (непосредственно на предприятиях) регулирования напряжения при помощи синхронных компенсаторов, трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой, а также конденсаторов для продольной и поперечной компенсации.

Б. И. Розенберг (Ленинградский политехнический институт) указал, что централизованное регулирование напряжения в общем случае экономичнее местного регулирования. Поэтому в функции местных регулирующих устройств должно входить только добавочное, индивидуальное регулирование в тех случаях, когда в этом возникает потребность. Для централизованного регулирования напряжения необходимо оснащение энергетических систем экономически оправданной мощностью синхронных компенсаторов, а также широкое внедрение регулируемых трансформаторов. Для местного регулирования напряжения должны быть использованы синхронные двигатели и конденсаторы, применяемые на предприятиях для снижения и компенсации реактивных нагрузок. При этом большое значение приобретает автоматическое включение и отключение конденсаторных установок в зависимости от уровня напряжения сети. Для регулирования напряжения во вторичных сетях промышленных предприятий во многих случаях требуются регулируемые трансформаторы с высшим напряжением 6...10 кв. Для снижения колебаний напряжения при толчкообразных нагрузках в сетях предприятий должна применяться продольная компенсация.

В докладе **А. А. Тайца** («Центрэнергочермет») было отмечено, что для обеспечения допустимых отключений напряжения и поддержания необходимых уровней напряжения в сетях необходимо внедрение встречного регулирования напряжения на шинах электростанций и на шинах вторичного напряжения подстанций 35 кв и выше (при этом следует широко применять трансформаторы с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой с диапазоном регулирования 15...20 %); при неблагоприятных условиях регулирования напряжения в центрах питания должны быть использованы местные средства регулирования — вольтодобавочные трансформаторы, синхронные двигатели и синхронные компенсаторы, батареи конденсаторов с ручным или автоматическим регулированием мощности; необходимо организовать выпуск специальных трансформаторов для электропечей и ртутновыпрямительных установок с регулированием под нагрузкой; все трансформаторы на напряжение 35 кв и выше должны изготавливаться с регулированием напряжения под нагрузкой; для длинных перегруженных линий и линий, работающих с низким значением коэффициента мощности, целесообразно применение продольной компенсации.

И. Э. Ибрагимов (Энергетический институт Академии наук Азербайджанской ССР) остановился на некоторых вопросах регулирования напряжения при помощи последовательных конденсаторов в местных электрических сетях морских нефтяных промыслов. Исследования показали эффективность и экономичность применения этого метода компенсации потери напряжения.

Б. А. Поляков (Новочеркасский политехнический институт), рассматривая общие принципы, условия и схемы автоматического регулирования мощности конденсаторных установок для повышения коэффициента мощности, подчеркнул, что проектные организации в проектах конденсаторных установок должны выяснить целесообразность регулирования их мощности и во всех случаях, когда это будет признано целесообразным, предусматривать устройства для регулирования.

М. М. Морозов (Конденсаторный завод) в своем сообщении коснулся особенностей работы конденсаторных установок, предназначенных для регулирования напряжения. Он указал, что большие пусковые токи и коммутационные перенапряжения обычно не представляют опасности для конденсаторов. Но к коммутационной аппаратуре должны предъявляться специальные требования (с точки зрения термической и динамической устойчивости и др.). В зарубежной практике при конденсаторных бата-

реах большой мощности поперечного включения, применяемых для регулирования напряжения, устанавливаются реакторы для ограничения пусковых токов.

Представитель Запорожского трансформаторного завода т. Горбунцов сообщил о параметрах выпускаемых трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой.

В принятом на совещании решении предложено созданной при ЦЕНТОЭП рабочей комиссии на основе материалов данного совещания и с учетом зарубежного опыта рассмотреть и сопоставить существующие методы исследований и определения величин и категорий электрических нагрузок, установить, какие из методов для разных отраслей промышленности и различных условий работы электроустановок являются наиболее целесообразными, и дать свои рекомендации по всем этим вопросам. Комиссии предложено к 1 марта 1958 г. выпустить проект руководящих указаний по определению электрических нагрузок на промышленных предприятиях и широко обсудить этот проект в первичных организациях Общества и на страницах технических журналов.

В решении совещания отмечены преимущества метода регулирования напряжения в протяженных электрических сетях посредством применения трансформаторов с регулируемыми под нагрузкой коэффициентами трансформации. В рекомендациях совещания предусматривается расширение шкалы номинальных мощностей трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой, с увеличением пределов регулирования и повышением гарантируемого числа переключений без осмотра состояния контактов.

Совещание обратило внимание Министерства электростанций СССР на необходимость широкого внедрения как на действующих, так и на вновь сооружаемых районных подстанциях трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой или регулируемых вольтодобавочных трансформаторов, а также сочетания их действия с действием регулируемых генераторов реактивной мощности и, в частности, синхронных компенсаторов.

Совещание предложило промпредприятиям и проектным организациям широко внедрять синхронные двигатели, как наиболее экономичные средства покрытия реактивных нагрузок, одновременно дающие возможность улучшить режим напряжения в электрических сетях, а также применять автоматические устройства для включения и отключения конденсаторных установок поперечной компенсации — полностью или частично в зависимости от потребности в реактивной мощности с управлением от органа, реагирующего на величину реактивной мощности, время или отклонение напряжения.

Совещание признало целесообразным выделение рабочей комиссии при ЦЕНТОЭП по разработке следующих Руководящих указаний и Технических условий: по регулированию напряжения в электрических сетях; на конденсаторные установки с устройствами автоматического включения и отключения; по применению продольной компенсации; по методике технико-экономических расчетов при проектировании устройств для регулирования напряжения в электрических сетях.

Совещание отметило желательность более широкого освещения в журналах «Электричество» и «Промышленная энергетика» исследований по электрическим нагрузкам на промышленных предприятиях и по регулированию напряжения.

Кандидат техн. наук Б. А. Константинов
Секция электроснабжения промпредприятий НТОЭП

мику В. С. Кулебакину, который отметил, что на совещании должны быть освещены состояние и важнейшие перспективные научно-технические проблемы по ферромагнетизму, а также по освоению и изысканию новых магнитотвердых материалов и применению их в различных областях техники

В обзорном докладе д. т. н. А. С. Займовского было указано, что в задачи исследований технологического, металловедческого и физического направлений должно входить дальнейшее глубокое изучение кристаллической и магнитной структуры наиболее важных и распространенных сплавов ални-магнико в различных состояниях. Необходима разработка технологии изготовления магнитов из магнико методом направленной кристаллизации. Чрезвычайно большой интерес представляет изучение возможности существенного улучшения сплавов ални, тем более, что эти наиболее дешевые и массовые магниты остаются единственными, к которым еще не применена текстуровка. Между тем по аналогии их с магнико можно было бы путем отливки с направленной кристаллизацией вдоль ребра куба и последующей текстуровкой псевдомонокристалльной отливки повысить свойства сплава в $2\frac{1}{2}$ —3 раза.

К. т. н. Л. Ш. Казарновский в своем обзоре рассмотрел развитие различных групп материалов для постоянных магнитов. Основным материалом являются сплавы на основе системы Fe—Ni—Al. Массовое производство в СССР литых магнитов уже в предвоенные годы не уступало по свойствам этих магнитов заграничным образцам. Но в дальнейшем качество отечественных магнитов не улучшилось, а нормы ГОСТ 4402-48 допускают даже более низкие показатели, чем были достигнуты прежде. Изотропные сплавы Fe—Ni—Al, легированные кобальтом, медью и титаном (алнико), обладают более высокой магнитной энергией, чем сплавы ални, и менее чувствительны к колебаниям состава; поэтому, невзирая на дорогоизн кобальта, сплавы алнико широко применяются в технике. Сплавы алнико в дальнейшем значительно усовершенствовались. Магнитно-анизотропные сплавы системы Fe—Ni—Al, получаемые путем охлаждения в магнитном поле, не уступают изотропным сплавам алнико. Широкое распространение в СССР и, особенно, за границей получили анизотропные сплавы. Приоритет разработки способа повышения свойств постоянных магнитов путем охлаждения в магнитном поле принадлежит советскому инж. Э. П. Комаровскому. Резкое улучшение свойств ряда анизотропных сплавов было достигнуто путем создания в отливках кристаллографической анизотропии при помощи направленной кристаллизации. Весьма производительной и рентабельной оказалась металлокерамическая технология при массовом изготовлении мелких магнитов из высококоэрцитивных сплавов.

Широкое распространение получили в современной технике неметаллические магнитомягкие материалы, ферриты, представляющие смеси окислов железа и двухвалентных металлов; магнитотвердые ферриты отличаются высокой коэрцитивной силой, «феррит — барий» имеет гексагональную структуру и отличается большой кристаллической анизотропией.

Член-корр. АН СССР А. Н. Ларионов в докладе «О проблемах применения постоянных магнитов в электромашиностроении» обратил внимание на большую роль постоянных магнитов в электромашино- и аппаратостроении. Из имеющихся в настоящее время многих марок материалов для постоянных магнитов только некоторые могут успешно применяться в электрических машинах, поскольку при выборе материала постоянного магнита необходимо учитывать особенности конструкции, удельную мощность генератора, двигателя, размеры магнита, величину механических напряжений, температурную зависимость магнитных свойств материала. Для расчета соответствия критической точки размагничивания оптимальному использованию материала необходимы данные о степени выпуклости и коэффициенте магнитного возврата, которые обычно отсутствуют и не нормированы. Нестабильность и неоднородность материалов для постоянных магнитов влечут за собой низкий коэффициент использования магнита и являются одной из причин больших габаритов и веса электрических машин с постоянными магнитами.

Для разрешения задач в области бесконтактных высокоскоростных генераторов необходимо применение анизо-

СОВЕЩАНИЕ ПО ПОСТОЯННЫМ МАГНИТАМ

В мае 1957 г. Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР и Институт metallurgии им. Байкова Академии наук СССР провели широкое совещание, посвященное вопросам теории и практики постоянных магнитов. В совещании участвовало свыше 300 представителей многих научно-исследовательских организаций, высших учебных заведений и заводов страны.

Председатель Оргкомитета член-корр. АН СССР А. Н. Ларионов предоставил вступительное слово академи-

тропных сплавов с особо высокой удельной энергией и высокими механическими свойствами. Сплавы марки магнитко с удельной энергией (ВН) \max ниже 4 млн. гаусс \times Хэрстед не обеспечивают высокого использования генераторов, в особенности от 30...100 ква и выше. К материалам необходимо предъявлять требования высокой механической прочности, возможности работы при окружных скоростях 70...100 м/сек и неизменяемости магнитных свойств при температурах 300...400° С. Далее докладчик привел основные конструктивные формы исполнения генераторов с постоянными магнитами, сравнение различных методов регулирования или стабилизации напряжения генераторов, системы намагничивания и способы стабилизирования, а также основные характеристики генераторов и технико-экономические показатели их. Применение магнитотвердых материалов позволило изготовлять серии гистерезисных двигателей с повышенными энергетическими показателями и уменьшенным весом; эти двигатели нашли широкое применение в системах автоматики, в гироколических приборах, в звукозаписи и в других областях техники, в особенности там, где требуется синхронное вращение электромеханизмов переменного тока малой мощности.

Предложенная А. Н. Лариновым безобмоточная гистерезисная муфта в комбинации с бесконтактной электромагнитной муфтой для целей стабилизации частоты синхронного генератора, возбуждаемого постоянными магнитами повышенной частоты, мощностью 300 вт была подготовлена в МЭИ, успешно прошла испытания и в настоящее время практически применяется.

НИИ быт. МЭП разработал серию гистерезисных двигателей мощностью до 100 вт на различные частоты 50, 400, 500 гц в однофазном и трехфазном выполнении. Работы по гистерезисным двигателям ведутся в течение последних лет в ряде ОКБ и исследовательских институтах.

Затем с докладами выступили д. т. н. Н. Н. Шумиловский (Основные вопросы применения постоянных магнитов в электроприборостроении), к. т. н. Д. И. Габриэлян (Итоги исследования деформируемых сплавов для постоянных магнитов), д. ф.-м. н. Е. И. Кондорский (Современные представления о природе высококоэрцитивных магнитных сплавов), д. т. н. Б. Г. Лившиц (металлографические основы термообработки высококоэрцитивных Fe—Ni—Al-сплавов), д. ф.-м. н. Я. С. Шур (Магнитная структура в высококоэрцитивных сплавах), д. т. н. К. М. Поливанов (Энергия постоянных магнитов), инж. Ф. Н. Степанов, к. т. н. А. И. Ванеев, инж. Е. И. Соколовский, инж. М. М. Раевская, к. т. н. А. Б. Альтман, инж. П. Л. Гладышев, инж. В. Л. Мемелов и др.

В выступлениях по докладам резко критиковалось создавшееся застойное положение в разработке и производстве новых постоянных магнитов.

В решении было отмечено, что уровень производства новых магнитных материалов не удовлетворяет возросшие потребности народного хозяйства и отражается на развитии новой техники, поскольку часто приходится применять постоянные магниты с неоднородными, нестабильными и заниженными магнитными свойствами. Необходимо обеспечить разработку и выпуск сплавов с удельной энергией порядка 10...12 млн. гаусс \times Хэрстед.

Совещание обратило особое внимание на недопустимость игнорирования в ведущихся исследовательских работах многих важнейших характеристик магнитных сплавов, как-то: температурной зависимости, механических свойств, стабильности, коррозионной стойкости и др. В высших учебных заведениях недостаточно освещаются вопросы расчета и конструирования постоянных магнитов и магнитных систем и слабо прививаются студентам навыки по экспериментальному исследованию.

Совещание разработало ряд конкретных мероприятий с целью рационализации производства и более широкого внедрения постоянных магнитов и наметило первоочередные производственно-исследовательские работы, к которым относятся: исследование возможностей текстурокции магнитов и сплавов типа ални; изучение процессов получения высококоэрцитивной силы и выпуклой кривой размагничивания в сплавах типа магнитко и реализация новых постоянных магнитов на основе системы железо—никель — кобальт — алюминий с высокой удельной энергией; изучение температурных зависимостей различных магнитов и магнитных систем в интервале температур от $-200\ldots+350^{\circ}$ С, коррозионных свойств, а также и механических свойств для всех применяемых магнитных материалов и другие вопросы.

В решении совещания сформулированы рекомендации по тематическим планам Института прецизионных сплавов и других институтов и лабораторий. Совещание придало большое значение созданию ведущего научно-технического центра по изысканиям, исследованиям и разработкам магнитотвердых материалов.

Совещание признало назревшими переработку устаревшего ГОСТ 4402-48 и установление новых стандартов на деформируемые, магнитотвердые материалы, порошковые и оксидные магниты с учетом требований потребителей.

В решении отмечается также необходимость снижения стоимости магнитотвердых сплавов и разработки более дешевой рецептуры изготовления.



Библиография

М. М. СИНАЙСКИЙ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД ЗАТВОРОВ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ.
200 стр., ц. 6 руб. 75 коп. Госэнергоиздат, 1956.

Большое развитие отечественного гидростроительства сопровождалось оригинальными работами проектных организаций и промышленности по созданию совершенного электропривода механизмов, управляющих затворами гидро сооружений. В этой области уже накоплен значительный опыт, и необходимость в систематизации и обобщении накопленного материала назрела уже давно.

Опубликованные в разное время несколько печатных работ лишь в небольшой степени и только односторонне освещали эти вопросы. Поэтому следует приветствовать выход в свет книги М. М. Синайского, ведущего специалиста в рассматриваемой области, под руководством которого было выполнено большинство проектов электроприводов затворов отечественных гидро сооружений (главным образом шлюзов).

В книге рассмотрены в сжатом виде основные проблемы, возникающие в процессе проектирования электропривода затворов гидро сооружений. Ее отличительной осо-

бенностью является стремление автора трактовать как общие вопросы электропривода, так и ряд специальных вопросов, изложенных в книге применительно к конкретным условиям работы привода затворов гидро сооружений.

Глава I содержит общую оценку специфических особенностей рассматриваемого электропривода. В этой главе дана характеристика нагрузки и зависимость ее от различных факторов, показаны особенности, вытекающие из принятых скоростей, рассмотрены типичные режимы работы и охарактеризованы принятые системы управления.

Рассматривая условия работы, автор отмечает возможность широкого использования короткозамкнутых двигателей; ни в этой главе, ни в последующих главах, к сожалению, не объясняется тот факт, что доминирующими типом двигателей, применяемых для затворов гидро сооружений, остается, однако, электродвигатель с фазным ротором.

В главе II дан минимум общих сведений, необходимых для определения нагрузки электродвигателей.

В главе III изложены механические свойства электродвигателей и указан метод подхода к выбору электродвигателей по их расчетным нагрузкам. Особое внимание удалено рассмотрению характеристик специальных электро-приводов, находящих широкое применение для затворов шлюзов, а именно механического соединения электродвигателей, соединения по схеме электрического вала и асинхронных двигателей двойного питания.

При рассмотрении методов получения малых скоростей для приводов затворов с головным наполнением автор, бегло отметив недостатки микропривода, переходит к заменяющей его системе с двигателями двойного питания, не указав сравнительных достоинств этой системы. Учитывая новизну и спорность этой новой для привода гидротехнических затворов системы, необходимо было дать более обстоятельный сравнительный анализ различных систем и на базе выполненных проектов сделать конкретное заключение. Следовало бы также привести технические данные выполненных преобразователей частоты.

В главе IV излагаются общие методы построения естественных и реостатных характеристик трехфазных двигателей.

Одним из наиболее ценных разделов рецензируемого труда является глава V, посвященная тепловым расчетам электродвигателей. В этой главе изложены практические методы расчета потерь и нагрева двигателей применительно к конкретным условиям гидротехнического привода. На основании большого экспериментального материала автор указывает границы применения различных теоретических формул.

В главе VI рассмотрены характерные схемы силовых цепей и основные узлы схем цепей управления. Помимо распространенных схем одно- и двухскоростных двигателей рассмотрены также схемы привода с синхронизирующими двигателями и с двигателями двойного питания. Далее изложены принципы построения схем управления «в, в частности, схем автоматического управления затворами шлюзов.

В главе VII изложены способы определения величины пусковых и регулировочных сопротивлений и выбора стандартных ящиков сопротивления по расчетным данным. Следует отметить (как недостаток) отсутствие указаний о способе определения числа ступеней пусковых сопротивлений. Утверждение автора о том, что это число обычно залано конструкцией контроллера, едва ли применимо в данном случае, поскольку для привода гидротехнических затворов используются не стандартные, а специальные контроллеры, в отношении которых отсутствует заводская информация.

Большую практическую ценность представляет глава VIII, посвященная электрической защите. В главе рассмотрена защита от токов короткого замыкания, в частности, типичный случай короткого замыкания при включении статора при неподвижном и замкнутом накоротко роторе. Большое внимание удалено условиям защиты от перегрузки механизмов и двигателей. Указаны области применения различных аппаратов защиты. В частности, рассмотрены характеристики установочных автоматов, находящих в последнее время большое применение. Особенно ценными являются практические указания по выбору уставки защиты, сделанные с учетом устойчивости электрооборудования.

В главе IX приведены основные технические линии аппаратов, применяемых для электропривода гидротехнических затворов (контакторы, реле управления, конечные выключатели и пр.) и даны указания по их выбору.

В главе X описаны приборы сигнализации, используемые как для указания положения отдельных элементов схемы, так и для указания положения затворов. В главе показано применение схемы включения сигнальных ламп и кратко описан источник пульсирующего напряжения, используемый для получения мигающего света. В этой же главе дано описание телемеханического чекателя повреждений, нашедшего за последние годы применение в практике шлюзов.

В главе XI рассмотрены различные системы синхронной связи, описана конструкция всевозможных приемных приборов и датчиков, широко применяемых в шлюзах, и даны указания по их выбору.

В главе XII, посвященной энергоснабжению шлюзов, дано обоснование выбора рода тока и величины напряжения как силовых нагрузок, так и для цепей управления и сигнализации. Даны также рекомендации по выбору сечения кабелей и проводов. Рассмотрены схемы питания цепей управления и сигнализации.

К рекомендации выбирать трансформаторы и сечения кабелей по току, соответствующему опрокидывающему моменту, автору следовало бы сделать оговорку, что это правило действительно лишь при определенном соотношении между опрокидывающим и статическим моментом (приблизительно равном 1,7 согласно главе III). Если это соотношение значительно превышает указанную величину, что имеет место при выборе двигателей по нагреву или при выборе их с большим запасом по моменту, вследствие отсутствия в номенклатуре подходящих по моменту двигателей, применение указанного правила даст неоправданный запас по мощности трансформатора и сечению кабеля. В этой главе следовало бы также рассмотреть вопрос, имеющий большое практическое значение, о допустимой перегрузке трансформатора в конкретных условиях работы шлюза.

В заключительной — XIII — главе дан ряд практических указаний по наладке и испытанию различных элементов электропривода затворов гидросооружений.

В дополнение к недостаткам, упомянутым выше, следует отметить, что некоторые главы нужно было развить более подробно (например, о схемах управления, о синхронной связи). Это сделало бы книгу более доступной для молодых специалистов, не имеющих достаточных знаний в ряде специальных вопросов. Автору книги необходимо было бы также осветить перспективы дальнейшего развития электропривода затворов гидротехнических сооружений и показать, какие задачи стоят в указанной области, а также какие работы ведутся в настоящее время в этом направлении. В частности, представляло бы интерес рассмотрение вопроса об упрощении и удешевлении системы сигнализации.

В целом рецензируемая книга заслуживает положительной оценки. Написанная в предельно лаконичной форме она тем не менее отличается ясностью изложения и четкостью формулировок.

В книге полностью отражены современные достижения в рассматриваемой области. Практические рекомендации дополнены значительным информационным материалом и цennыми сведениями по характеристикам различного электрооборудования. Книга послужит незаменимым пособием для лиц, занятых проектированием электропривода гидротехнических сооружений, и будет также полезна для персонала, занятого эксплуатацией указанных устройств.

**Доц. Б. С. Успенский, инж. А. С. Кричевский
и инж. И. А. Берлин**
Гидроэнергопроект

Б. А. ТЕЛЕШЕВ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. 496 стр., ц. 17 руб. 25 коп. Госэнергоиздат, 1956.

Допущено Главным управлением политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР в качестве учебного пособия для неэлектротехнических специальностей высших учебных заведений.

Книга написана автором на основе многолетнего опыта преподавания общего курса электротехники в Московском институте тонкой химической технологии им. Ломоносова, а также с учетом опыта преподавания нескольких более расширенного курса «Основы электротехники».

«Электрические машины» на энергетическом факультете Московского инженерно-экономического института им. Орджоникидзе.

В книге охвачены ведущие разделы программы курса «Общая электротехника»: основы электротехники, элек-

трические измерения, электрические машины, промышленная электроника и общие вопросы электроснабжения промышленных предприятий. Специальные главы программы этого курса (электропривод, электротермия, электротехнология и др.), требующие различного охвата для разных специальностей, автором не рассматриваются. По этим специальным главам программы подготавливается издание отдельного пособия.

Книга состоит из 17 глав. Первые 8 глав содержат: общее введение, сведения об основных понятиях и положениях физики электрических явлений, теорию цепей постоянного тока, вопросы теплового действия тока, электрических аккумуляторов, электрического и магнитного полей и, наконец, электромагнетизма и электромагнитной индукции (120 стр.). Глава IX посвящена теории переменных токов (102 стр.); глава X — электрическим измерениям (35 стр.). Последующие пять глав охватывают трансформаторы, асинхронные машины, машины постоянного тока и синхронные машины (161 стр.). Глава XVI посвящена электронным и ионным приборам и промышленной электронике (40 стр.). Последняя глава отведена вопросам производства и распределения электрической энергии (35 стр.).

Книга отличается методичностью изложения. В ней использованы в необходимой мере элементы высшей математики для обоснования общетеоретических положений и законов, на базе которых строятся технические расчеты и практические выводы и применения рассматриваемых явлений. Научный уровень изложения с углубленным рассмотрением физической стороны явлений совмещен с до-ходчивостью языка книги для широкого круга читателей. Автор придерживается строгого подхода к выбору терминов и определений; наличие ряда примеров расчетов, тщательное выполнение иллюстраций, а также квалифицированное редактирование книги позволяет считать, что она найдет заслуженное применение при подготовке новых кадров специалистов.

Остановимся на содержании отдельных глав. По первым семи главам, посвященным вопросам основных физических понятий, электрическим цепям постоянного тока, электрическому и магнитному полям и электромагнетизму, часто возникают предложения о значительном сокращении объема и содержания этих глав в курсах электротехники, так как рассматриваемые в них вопросы предполагаются известными из курса физики, предшествующего курсу электротехники. Однако с таким предложением мы не можем согласиться, так как в курсах физики эти вопросы рассматриваются только с физической точки зрения без рассмотрения технической стороны вопроса, обязательного в техническом курсе. Действительно, в рецензируемой книге в этих главах, наряду с изложением основных законов электрических цепей постоянного тока дается сравнительная оценка последовательного и параллельного соединений и приводятся примеры расчета сложных разветвленных цепей; при рассмотрении вопроса о параллельной работе источников тока устанавливается закономерность распределения тока нагрузки между отдельными источниками на основе обобщенных уравнений параллельной работы источников тока, легко получаемых из законов Кирхгофа, применительно к рассматриваемой разветвленной цепи (стр. 42—43). Здесь же приводится графоаналитический метод решения такой задачи для случая двух источников тока, названный автором методом «шаговых диаграмм».

При рассмотрении теплового действия тока достаточно место удалено вопросам материалов, применяемых в нагревательных устройствах, и расчету нагревательных приборов, характеристике работы плавких предохранителей, а также вопросу потерь энергии в проводах, вызванных их нагревом и связанным с этими потерями к. п. д. электрической цепи. Рассмотренные в главе V вопросы устройства и применения свинцовых и щелочных аккумуляторов с их основными характеристиками, а также режимов работы аккумуляторных батарей являются весьма важными как для студентов, так и для инженеров.

В следующих главах (VI, VII и VIII) при рассмотрении свойств диэлектриков приводятся технические характеристики различных диэлектриков и понятие о классах электрической изоляции; отдельно здесь рассмотрены вопросы электрической емкости с указанием на условия возникновения естественных емкостей процессы заряда и

разряда конденсаторов и возможные схемы включения емкостей. При рассмотрении теории магнитных цепей сообщается о широко применяемых в современной электротехнической практике ферромагнитных материалах и приводятся примеры расчета магнитных цепей. Удачно изложены вопросы электромагнитной индукции и законы Фарадея — Максвелла и Ленца. К сожалению, не упомянута роль советских металлургов в разработке новых ферромагнитных материалов.

В главе IX, посвященной переменному току, автору удалось избежать чисто формального рассмотрения вопросов. Теория переменных токов изложена в книге без применения символического метода, о котором кратко упоминается, поскольку этот метод позволяет наиболее просто решать задачи по расчету сложных цепей переменного тока.

В главе X «Электрические измерения» рассмотрены сначала принципы работы различных систем электроизмерительных приборов, а затем основные методы измерения тока, напряжения, мощности и электрической энергии в цепях постоянного и переменного тока. Здесь же освещены электрические методы измерения неэлектрических величин и применяемые для этой цели различного типа преобразователи-датчики.

При рассмотрении работы счетчиков автор пользуется термином «реактивный счетчик» вместо принятого термина «счетчик реактивной энергии»; при этом автор указывает, что более правильным названием для такого счетчика было бы название «синусонный счетчик» в отличие от обычного счетчика электрической энергии, работающего по косинусной схеме. В конце главы рассмотрены два основных типа электромагнитных реле — максимального тока и минимального напряжения; применяемый при рассмотрении реле минимального напряжения термин «кнулевая защита» лучше было бы заменить термином «защита минимального напряжения».

В главах XI—XV рассмотрены все основные типы электрических машин и трансформаторов. При рассмотрении различных типов машин большое внимание уделено рабочим характеристикам двигателей, причем они рассматриваются одновременно с механическими характеристиками производственных машин, что весьма ценно.

Вопросы нагрева электрических машин освещены в книге недостаточно. В главе о машинах постоянного тока автором неполно изложен вопрос о реакции якоря и коммутации в машинах постоянного тока. Этот вопрос, имеющий большое практическое значение, следовало бы рассмотреть несколько подробнее. В этой главе дается весьма подробная классификация электрических машин постоянного тока и подробно разбираются характеристики генераторов и двигателей различных типов. При рассмотрении электромашинных преобразователей тока указывается, что двигатели-генераторы представляют собой агрегаты с преимущественным применением асинхронных двигателей; следовало бы указать, что в настоящее время столь же широкое применение получают в двигателях-генераторах синхронные двигатели, как более экономичные.

Глава, посвященная синхронным машинам, охватывает широкий круг вопросов, относящихся к синхронным генераторам и двигателям. При сравнительно небольшом объеме главы автору удалось осветить в ней достаточно полно все основные вопросы, в том числе и вопросы синхронизации и самосинхронизации синхронных генераторов, основные характеристики генераторов и двигателей и режимы их работы. При указании номинальных параметров синхронных двигателей (стр. 418) следовало упомянуть о синхронных двигателях, изготавляемых на напряжение 10 кв, а при рассмотрении пуска синхронных двигателей — отметить широкое применение пуска синхронных двигателей с подключенным возбудителем и применение реаторной схемы пуска лишь в особых случаях.

В главе XVI, посвященной электронным и ионным приборам, рассмотрены все основные электронные и ионные приборы, находящие широкое применение в промышленности и на транспорте, включая и новые типы полупроводниковых выпрямителей — германевых и кремниевых. Весьма удачен помещенный в начале главы раздел о схемах выпрямления тока, где вкратце рассмотрены различные схемы выпрямления и получаемые при этом отношения между напряжениями в различных схемах.

Было бы желательно при рассмотрении работы выпрямительных установок осветить вопрос о коэффициенте мощности этих установок и о его изменении при регулировании выпрямленного напряжения.

В последней главе XVII разобраны вопросы производства и распределения электрической энергии. Приведенный в этой главе материал рассматривает главным образом вопросы, имеющие значение для потребителей электрической энергии, и потому представляется в данном учебном пособии большой интерес. К числу таких вопросов относятся: рассмотренные в книге графики нагрузки и их зависимость от сменности работы предприятия, коэффициенты, характеризующие эти графики, коэффициент спроса различных промышленных предприятий и общие схемы канализации электрической энергии от электрических станций до потребительских установок.

Широкий общественный просмотр книги, состоявшийся в Московском отделении Всесоюзного научно-технического общества энергетической промышленности, с участием представителей вузов города Москвы, подтвердил положительные качества рассматриваемой книги как учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей. В большинстве выступлений (доц. А. Е. Зорахович, МИИТ; проф. В. Н. Степанов, МИИТ; доц. Л. А. Ломакин, Институт тонкой химической технологии; доц.

В. В. Романова, Московский институт пищевой промышленности; доц. А. Б. Альтман, МВТУ; проф. Е. В. Никусов, МЭИ; доц. М. А. Заманский, Московский нефтяной институт; инж. А. А. Ермилов, Тяжпромэлектропроект; инж. М. Р. Найфельд, Центрэлектромонтаж) книга получила хорошую оценку; при этом отмечалось удачное сочетание математической и физической трактовки рассматриваемых явлений и закономерностей, а также ценность данного пособия не только для студентов, но и для инженеров. Выход в свет данного учебного пособия рассматривается как положительный фактор. В некоторых выступлениях (В. Н. Степанов, А. Е. Зорахович) отмечались чрезмерно большой объем книги и желательность более краткого изложения основных законов электротехники и вопросов электрического и магнитного полей, поскольку эти вопросы изучаются в курсе физики, что позволило бы сократить объем книги. Некоторую дискуссию вызвал вопрос о целесообразности более полного включения в книгу символического метода.

В качестве общей оценки рецензируемой книги следует признать ее весьма ценной и полезной. В ней отражен многолетний научно-педагогический и производственный опыт ее автора.

Кандидат техн. наук А. А. Тайц
МОНТОЭП

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Бресслер С. Е. РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. Изд. 3-е, переработ. 550 стр., ц. 16 руб. 30 коп. Гостехиздат.

Брайде А. М. СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫМ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРИБОРАМ. 176 стр., ц. 5 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

ГОРНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. Сборник статей под ред. Н. В. Левенберга. 92 стр., ц. 3 руб. 75 коп. Углехимиздат.

ГОСТ 5561-54. КОНДЕНСАТОРЫ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ТИПА КЭ. 17 стр., 65 коп. Стандартиздат.

Гульденбальк В. В. НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОР ДЛЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И МЕТОДЫ ИХ СООРУЖЕНИЯ. 20 стр., ц. 6 руб. Гостехника.

Двоскин Л. И. СДВОЕННЫЕ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ РЕАКТОРЫ. 47 стр., ц. 3 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

Долгинов А. И. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И СИСТЕМАХ. 328 стр., ц. 10 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Дорофеев А. С. МОНТАЖ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ. 152 стр., ц. 5 руб. 15 коп. Госстройиздат. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН. ПРИБОРЫ. 19 стр., ц. 4 руб. Гостехника.

Казанцев К. Г. РУТНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ЗАВОДОВ. 349 стр., ц. 11 руб. 85 коп. Металлургиздат.

Кондахчан В. С. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ. Изд. 2-е переработ. 304 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Лайбл Т. ТЕОРИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ. Пер. Л. М. Петровой под ред. Г. Н. Петрова. 168 стр., ц. 5 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Литвак Л. В. ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. Изд. 2-е переработ. и доп. С предисл. Г. В. Сербиновского. 191 стр., ц. 6 руб. 55 коп. Госэнергоиздат.

Пасечник Н. Д. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. 4-е испр. и доп. изд. 224 стр., ц. 4 руб. 60 коп. Гостехиздат УССР.

ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ. Под ред. Я. З. Чыпкина. 242 стр., ц. 10 руб. 55 коп. Академиздат.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ. МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ. Под ред. В. М. Ермоленко. 232 стр., ц. 9 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

Серге Эмилио. АНТИПРОТОНЫ. Пер. с англ. и послесловие В. М. Харитонова. 22 стр., ц. 60 коп. «Знание».

Сигорский В. П. и Синайский Л. А. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛОГОМЕТРЫ. Под ред. К. Б. Карадеева. 199 стр., ц. 9 руб. 45 коп. Академиздат УССР.

Соколов В. А. СТРОИТЕЛЬСТВО ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В АВСТРИИ. 31 стр., ц. 1 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

Солдаткина Л. А. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ СССР. ОБЗОР. 48 стр., ц. 3 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

Тартаковский Г. П. ДИНАМИКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ. 191 стр., ц. 6 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

Уайтхед С. ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ. Пер. под ред. В. Т. Ренне. 270 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Фельдбаум А. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 2-е изд. 807 стр., ц. 27 руб. 50 коп. Оборонгиз.

Фторорганические ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Переводы статей под ред. Б. М. Тареева. 64 стр., ц. 4 руб. Госэнергоиздат.

Фюрстенберг А. И. СДВОЕННЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. 51 стр., ц. 9 руб. Гостехника.

Чечик Н. О., Файнштейн С. М. и Лишиц Т. М. ЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ. Под ред. Д. В. Зернова. Изд. 2-е, доп. и перераб. 575 стр., ц. 21 руб. 15 коп. Гостехиздат.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ОТ РАЙОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. Материалы совещания. Под ред. В. И. Вейца и А. Г. Захарина. 102 стр., ц. 5 руб. 70 коп. Академиздат.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА. Четыре лекции. Пер. с англ. Е. И. Невстреевой и Я. В. Шевелева. Под ред. М. А. Стыриковича. 229 стр., ц. 7 руб. 85 коп. Изд. иностр. лит.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ. Пер. с англ. (МАТЕРИАЛЫ КОМИССИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ США), т. 2. ТЕХНИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ. 782 стр., ц. 51 руб. 65 коп. Изд. иностр. лит.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

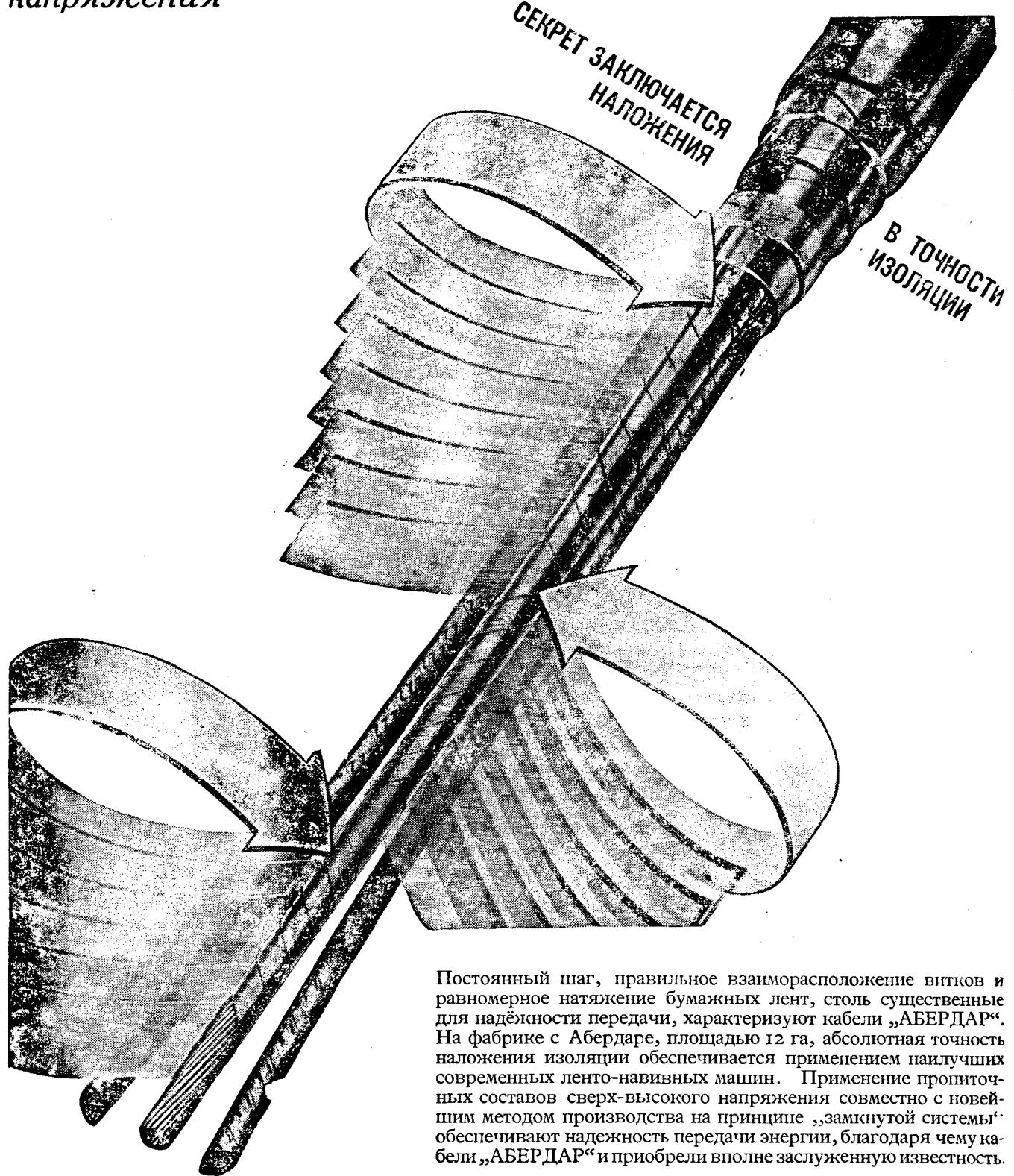
К. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцов, Н. Г. Дроздов (главный редактор), Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, И. И. Петров, В. И. Попков, И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин.

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 почтamt, почтовый ящик № 648.

Безукоризненная изоляция для кабелей высокого напряжения



Постоянный шаг, правильное взаиморасположение витков и равномерное натяжение бумажных лент, столь существенные для надёжности передачи, характеризуют кабели „АБЕРДАР“. На фабрике с Абердаре, площадью 12 га, абсолютная точность наложения изоляции обеспечивается применением наилучших современных ленто-навивных машин. Применение пропиточных составов сверх-высокого напряжения совместно с новейшим методом производства на принципе „замкнутой системы“ обеспечивают надежность передачи энергии, благодаря чему кабели „АБЕРДАР“ и приобрели вполне заслуженную известность.

Aberdare Cables

ABERDARE CABLES LIMITED · NINETEEN WOBURN PLACE · LONDON · АНГЛИЯ

Фабрика: Aberdare, Glam., South Wales.



**Измерительные
приборы DAWE
в промышленности**



**Машины
для динамического
уравновешивания**

Тип 1250

для роторов весом от 28 г до 4,5 кг.

Балансировка якорей ручных электрических сверл.
(С любезного разрешения фирмы Блэк и Деккер Лтд.)



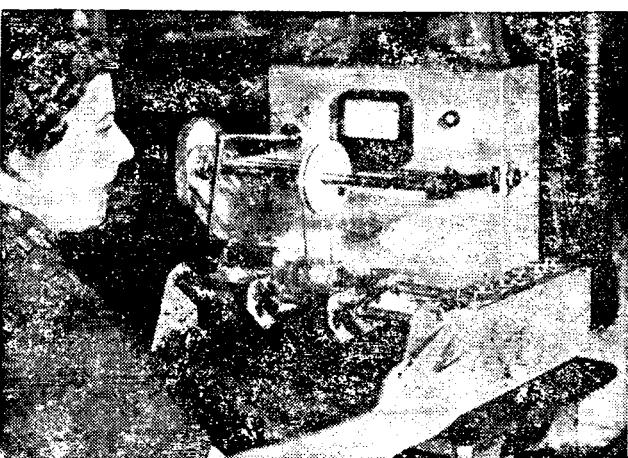
Стробоскопы

Тип — Серия № 1200

для контроля высокоскоростных процессов и
наблюдения быстродвижущихся объектов.

Непосредственный отсчёт в пределах
150 — 18 000 об/мин.

◀ Проверка вращающегося анода рентгеновской трубы на ускорение
и плавность действия в течении нескольких минут посредством
СТРОБОФЛАША „DAWE“
(С любезного разрешения фирмы Муллард Лтд.)



**Ультра-акустический
прибор
для измерения толщины**

Тип 1101 и 1101/1

для измерения толщины материалов в случаях, где
доступ имеется лишь к одной поверхности.

Диапазон измерений:

1101 от 1,5 мм до 300 мм стали.
1101/1 от 0,5 мм до 100 мм стали.

◀ Измерение толщины материала на выпуклом конце кислотной
цистерны во время капитального ремонта. После сварки подобного
рода измерения механическим путём фактически невозможны.

* Вышеприведенные и прочие применения измерительных
приборов „Dawe“ подробно описаны в брошюре „Измери-
тельные приборы „Dawe“ в промышленности“, каковую
мы охотно вышлем Вам по запросу — бесплатно.

Также полные технические данные от:

DAWE INSTRUMENTS LTD.
99 UXBRIDGE ROAD, EALING, LONDON, W.5 · АНГЛИЯ

Для качественной оценки электроизоляционного материала, решающим фактором являются в одинаковой мере: — как прочность материала, так и его изоляционная эффективность

Ткань из стекловолокон, — современный диэлектрический, изолирующий материал, отличается прочностью, надежностью и высокой эффективностью.

Ткань из стекловолокон фабричной марки «Текстигласс» находит широкое применение для производства электроизоляционного материала, как-то для армировки дугоотводных щитов, для распределительных, коммутационных панелей, коллекторных конусов и т. п.

ТЕКСТИГЛASS

Пьер Женэн и К-о. Ани. О-бо
Ул. Поль Валери № 44.
Париж, Франция.

Электродвигатель с изоляцией из силикона и ткани из стекловолокон фабричной марки «Текстигласс»

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ АВТОРАМИ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

1. Размер статьи не должен превышать 0,5 авт. листа (12 стр. машинописного текста через 2 интервала с 5—6 рис.).

2. Оригинал статьи представляется в одном экземпляре (первом с машинки), отпечатанном через два интервала, с полями 4—5 см.

Оригинал должен быть тщательно проверен и подписан автором (цитаты заверяются подписью автора особо каждая, с указанием точного источника). Ниже подписи автора проставляет свою фамилию, полностью имя и отчество, домашний адрес, место работы, занимаемую должность, год рождения.

3. Примененные автором обозначения выписываются им на отдельном листе с указанием: 1) что символ обозначает, 2) какого алфавита буква, 3) строчная или заглавная; аналогичное пояснение делается и в отношении индексов. Следует руководствоваться принятыми в журнале: буквенными обозначениями электротехнических и общетехнических величин и сокращенными обозначениями единиц измерения.

4. Формулы отчетливо вписываются от руки чернилами выделенными строками, а не в строках текста. Таблицы не должны быть громоздкими; все наименования в них проставляются полностью.

5. При вписывании букв, индексов, символов и других знаков следует соблюдать правильные их начертания во избежание смешения сходных изображений: заглавных и строчных букв (С и е, К и к, О и о, С и с, У и и, В и в и др.), букв, трудно различимых в рукописи (е и л, И и І, г и ғ, п и и, в и в (греч.), Х и χ (греч.), д и а (греч.), є и є и др.).

Заглавные (прописные) буквы рекомендуется подчеркивать карандашом двумя черточками снизу (например, О), а строчные сверху. 0 (нуль)



не подчеркивать. Греческие буквы заключать в кружки цветным карандашом.

6. Нумерация сносок к тексту, ссылок на литературу, ссылок на рисунки выполняется раздельно в порядке собственной последовательности в тексте.

Библиографический указатель (Литература) составляется в следующем порядке: а) для журналов — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название статьи (иностранный — в русском переводе), название журнала, часть или том (для журналов, не имеющих счета томов, — номер), страница начала статьи, год издания; б) для книг — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), заглавие книги, ссылка на страницы, наименование издательства (для иностранных изданий — место издания), год издания.

7. Иллюстрации должны быть перечислены в специальной описи. На обороте каждого рисунка автор должен указать свою фамилию и номер, соответствующий ссылке в тексте.

8. Пометки и надписи, относящиеся к графическому материалу, должны быть сделаны вне площади рисунка.

9. Условные обозначения в площади рисунка должны быть краткими и общеупотребительными. Расшифровка примененных условных обозначений дается без сокращений на свободном поле или в приложении к каждому рисунку вместе с его наименованием для набора надлежащей подписи к рисунку.

10. Фотоснимки должны быть отпечатаны на белой глянцевой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой деталей. Свет должен усиливать восприятие основных линий и деталей изображения. Главный предмет съемки не должен сливаться с фоном или поддаваться последним.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ на 1958 год

НА ЖУРНАЛЫ:

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Академии наук СССР и Министерства электростанций СССР

Год издания 18-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 96 руб.,
на 6 мес. 48 руб.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Орган Министерства электростанций СССР

Год издания 29-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 98 руб.,
на 6 мес. 48 руб.

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ

6 номеров в год

Подписная цена приложения
с журналом „Электрические станции“
на год 120 руб., на 6 мес. 60 руб.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Орган Министерства электростанций СССР

Год издания 27-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 72 руб.,
на 6 мес. 36 руб.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный журнал Министерства электростанций
СССР и Академии наук СССР

Год издания 5-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 96 руб.,
на 6 мес. 48 руб.

ТОРФЯНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Орган Министерства электростанций СССР

Год издания 35-й 8 номеров в год

Подписная цена на год 32 руб.,
на 6 мес. 16 руб.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Орган Министерства электростанций СССР

Год издания 13-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 48 руб.,
на 6 мес. 24 руб.

СВЕТОТЕХНИКА

Орган Министерства радиотехнической промышленности СССР

Год издания 4-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 36 руб.,
на 6 мес. 18 руб.

ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

Год издания 28-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 84 руб.,
на 6 мес. 42 руб.

ЭНЕРГЕТИК

Массовый производственно-технический журнал
Министерства электростанций СССР

Год издания 6-й 12 номеров в год

Подписная цена на год 24 руб.,
на 6 мес. 12 руб.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА РЕФЕРАТИВНЫЙ ЖУРНАЛ

Институт научной информации Академии наук СССР

Год издания 3-й 24 номера в год

Подписная цена на год 480 руб.,
на 6 мес. 240 руб.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЯ:

городскими и районными отделами Союзпечати, во всех конторах, отделениях связи и общественными уполномоченными по подписке на предприятиях, в организациях, учебных заведениях и учреждениях.