

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1957



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

8

СОДЕРЖАНИЕ

Е. А. Архангельский и Г. Р. Огульник — Куйбышевская гидроэлектростанция	1
И. М. Постников — О расчете электродинамических сил в обмотках трансформаторов	9
А. А. Янко-Триницкий — Электромеханические переходные процессы в синхронных машинах	16
П. А. Ионкин — Формулы преобразования активных многоугольных звезд в эквивалентные многоугольники	22
Л. П. Шиниберов — Электрогидропривод как объект регулирования	27
Г. И. Штурман — Трансформаторные режимы селсинов	32
А. А. Виноградов — Оптимальные параметры системы ионного самовозбуждения синхронных генераторов	38
В. М. Бондаренко и Г. Е. Пухов — Об одном численном методе расчета электрических цепей	44
В. Б. Романовский — По поводу численного метода расчета некоторых электрических цепей	47
В. А. Лабунцов и Ю. Н. Пленкин — Кольцевые пересчетные схемы на полупроводниковых триодах	48
К. Г. Митюшкин — Магнитный делитель частоты	53
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
А. П. Осадчий — Импульсный метод определения расстояния до места повреждения в пупинизированных кабелях	59
Г. А. Шашмулин — О замыкании нулевых проводов воздушных линий низкого напряжения	60
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
А. В. Яроцкий — К 125-летию первой публичной демонстрации телеграфа П. Л. Шиллинга	62
ДИСКУССИИ	
Неотложные задачи теории городских сетей — Э. С. Иохвидов, Р. И. Клионская, В. В. Бургдорф и П. Ф. Гогичаишвили, А. А. Глазунов. Вопросы электрификации железных дорог — Г. М. Сехниашвили	67
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
Испытание высоковольтных токоограничивающих предохранителей на колебательном контуре. Работа дросселя насыщения с полупроводниковым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой	74
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
По поводу статьи Джона Хардта. Американский журнал о советской энергетике. Промышленное применение мощных германиевых выпрямителей. Городской безрельсовый электротранспорт за рубежом	77
ХРОНИКА	
XXII Пленарная сессия Международной электротехнической комиссии в Москве. Межвузовская конференция по физическому и математическому моделированию	91
БИБЛИОГРАФИЯ	
Я. З. Цыпкин и И. И. Петров — Книга М. В. Мерова „Введение в динамику автоматического регулирования электрических машин“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96

CONTENTS

The Kuibishev Hydro-electric Station—E. A. Arhangelski, G. R. Ogulnik	1
On Calculating Electromagnetic Forces in Transformer Windings—I. M. Postnikov	9
Electro-mechanical Transients in Synchronous Machines—A. A. Yanko-Trinitski	16
Formulas for Transforming Non-passive Multi-ray Star Networks into Equivalent Polygon Networks—P. A. Ionkin	22
An Electric Drive as the Regulated Object—L. P. Shiniberov	27
Transformer Operation of Selsyns—G. I. Shturman	32
Optimal Parameters of an Electronic Self-excitation System for Large Synchronous Generators—A. A. Vinogradov	38
On a Numerical Method for Calculating Electric Circuits—V. M. Bondarenko, G. E. Pukhov	44
Concerning a Numerical Method for Calculating Certain Electric Circuits—V. B. Romanovski	47
Ring Recounting Circuits Using Transistors—V. A. Labuntsov, U. N. Plenkin	48
A Magnetic Frequency Divider—K. G. Mituchkin	53
FROM OPERATING EXPERIENCE	
An Impulse Method for Determining the Distance to the Fault Point in Pupinized Cables—A. P. Osadchi	59
Concerning Faults of Neutral Conductors in Low Voltage Overhead Lines—G. A. Shashmurin	60
FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING	
DISCUSSION	
NOTES AND LETTERS	
IN OTHER ENGINEERING JOURNALS	
CHRONICLE	
BIBLIOGRAPHY	

Куйбышевская гидроэлектростанция

Инж. Е. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ и инж. Г. Р. ОГУЛЬНИК

В текущем году на Куйбышевском гидроузле заканчиваются строительные работы, и Куйбышевская ГЭС — одна из гидроэлектростанций Волжского каскада — достигнет своей проектной мощности.

Куйбышевский гидроузел сооружается в 90 км выше г. Куйбышева. В его состав входят следующие основные сооружения: здание гидроэлектростанции, земляная плотина, водосливная бетонная плотина и два двухниточных однокамерных шлюза. Взаимное расположение основных сооружений показано на рис. 1.

Здание гидроэлектростанции примыкает к правому берегу реки и имеет длину, включая монтажную площадку, около 700 м; машинный зал — закрытый.

В верхнем бьефе на расстоянии 50 м от здания ГЭС, параллельно его фронту, расположено сороудерживающее сооружение, оборудованное четырьмя кранами грузоподъемностью 2×125 т; сороудерживающие решетки снабжены электрообогревом.

Земляная плотина имеет длину 2154 м, а водосливная бетонная плотина 981 м. Для обслуживания затворов на водосливной плотине устанавливаются три козловых крана грузоподъемностью по 2×125 т. Пазы затворов оборудованы электрообогревом.

Один из шлюзов расположен в створе гидроузла, а второй — на расстоянии около 4,5 км от створа вниз по течению реки. Шлюзы соединяются судоходным каналом.

На правом берегу реки вблизи здания гидроэлектростанции расположены: со стороны верхнего бьефа — открытое распределительное устройство 400 кв, а со стороны нижнего — открытое распределительное устройство 110 кв. Открытое распределительное устройство 220 кв расположено со стороны нижнего бьефа у левого торца здания ГЭС на дамбе земляной плотины.

Объем основных работ по сооружению гидроузла характеризуется следующими данными: укладка бетона 7,4 млн. м^3 , выемка земли 78,9 млн. м^3 , насыпь земли 71,9 млн. м^3 , монтаж металлоконструкций 81,1 тыс. т. При строительстве Щербаковского гидроузла было уложено бе-

тона 1,4 млн. м^3 и выполнено земляных работ 26 млн. м^3 , а при строительстве Камского уложено бетона 1 млн. м^3 и выполнено земляных работ 14,6 млн. м^3 .

Через сооружения гидроузла проходят железная и автомобильная дороги.

Площадь водохранилища, которое образуется после сооружения гидроузла, при нормальной отметке подпорого горизонта составит 5580 км^2 . До сооружения Саратовского гидроузла, лежащего ниже Куйбышевского, полезная емкость водохранилища при наибольшей сработке его уровня до отметки 45,5 м составит 31,5 км^3 , а после постройки Саратовского гидроузла при сработке до отметки 47,0 м — 26,5 км^3 . Водоохранилище позволит осуществить сезонное регулирование стока, степень использования которого составит около 94%.

До сооружения Саратовского гидроузла годовая выработка энергии Куйбышевской ГЭС в зависимости от водности года будет колебаться от 7,9 до 13,5 млрд. квт·ч, а после его сооружения — от 8,0 до 14,3 млрд. квт·ч. Сооружением Куйбышевского гидроузла улучшатся условия судоходства по р. Волге.

На гидроэлектростанции устанавливается 20 агрегатов по 105 Мвт. В период паводка все агрегаты станции будут работать на покрытие базисной части графика нагрузки связанных с ней энергосистем, а в остальное время года — на покрытие пиковой части графика нагрузки. До постройки Саратовского гидроузла из водохранилища Куйбышевской ГЭС будут делаться принудительные пуски воды в нижний бьеф для судоходства и санитарии, в связи с чем на этом этапе эксплуатации гидроэлектростанции часть ее агрегатов будет работать на покрытие базисной части графика не только во время паводка, но и в другое время года.

Каждый агрегат состоит из вертикальной поворотнолопастной гидротурбины и гидрогенератора, имеющих общий вал. Нормальная скорость вращения агрегата 68,2 об/мин, угонная 140 об/мин.

Диаметр рабочего колеса турбины 9,3 м; общий вес турбины 1550 т; вес рабочего колеса 462 т. Гидротурбина рассчитана на работу при

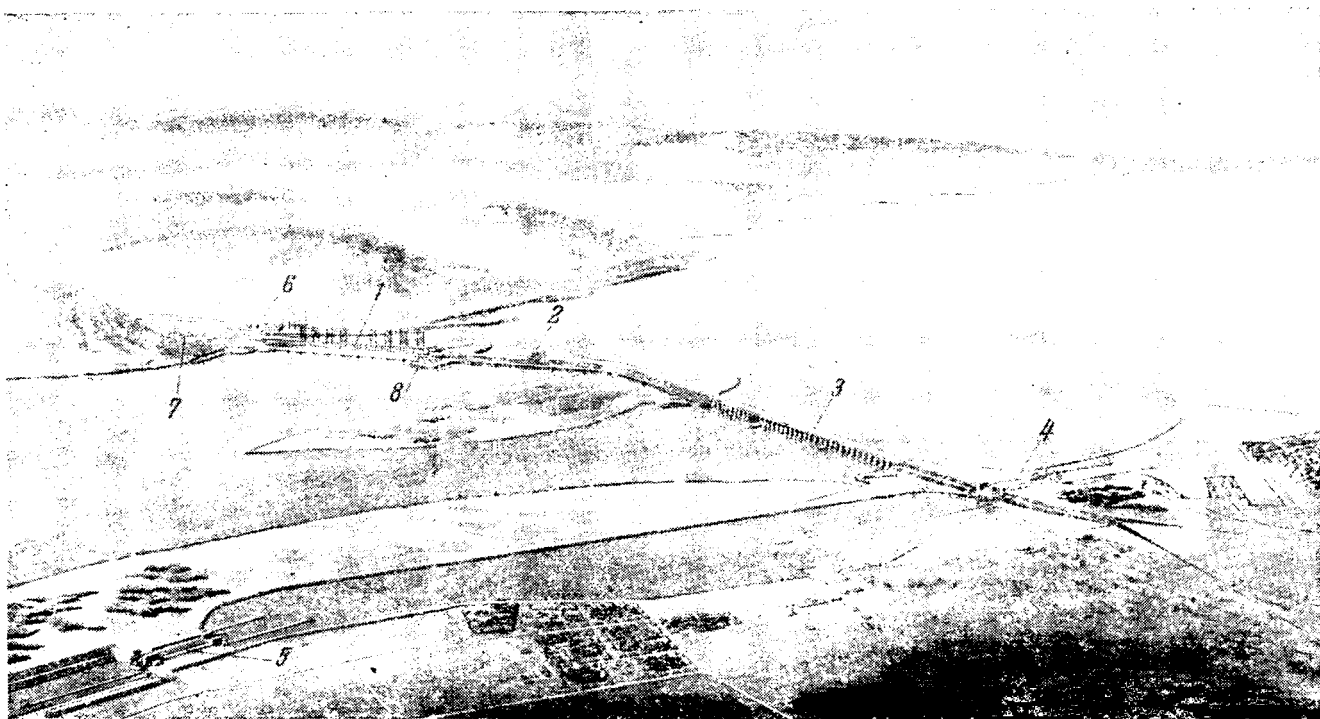


Рис. 1. Взаимное расположение сооружений Куйбышевского гидроузла.

1 — здание гидроэлектростанции; 2 — земляная плотина; 3 — бетонная водосливная плотина; 4 — верхний шлюз; 5 — нижний шлюз; 6 — открытое распределительное устройство 400 кВ; 7 — открытое распределительное устройство 110 кВ; 8 — открытое распределительное устройство 220 кВ.

напорах от 14 до 30 м. Во время катастрофических паводков допускается работа при напоре 12 м. При расчетном напоре 19 м максимальный расход воды через турбину равен $675 \text{ м}^3/\text{сек}$, при этом турбина развивает мощность на валу $108,5 \text{ Мвт}$ и имеет максимальный, гарантированный заводом, к. п. д., равный 93,5%.

Регулирование гидротурбины — двойное. Регулятор скорости состоит из собственно регулятора типа РКО-250 и маслonaпорной установки типа МНУ-32.

Мощность гидрогенератора 123 Мва , напряжение $13,8 \text{ кВ}$, коэффициент мощности 0,85. Внешний диаметр статора $17,1 \text{ м}$, диаметр расточки статора $14,3 \text{ м}$. Общий вес генератора 1500 т , вес ротора без вала и втулки 744 т . Маховой момент генератора $125 \text{ тыс. т} \cdot \text{м}^2$. Коэффициент полезного действия при полной нагрузке и коэффициенте мощности, равном единице, 97,9%.

Подпятник генератора рассчитан на давление 3400 т при весе вращающихся частей агрегата 1500 т .

Реактансы гидрогенераторов: $x'_a = 0,15$, $x'_d = 0,2$.

В целях обеспечения устойчивой параллельной работы Куйбышевской ГЭС с отдаленными энергосистемами к возбуждению гидрогенераторов были предъявлены повышенные требования, а именно: четырехкратное предельное напряжение возбудителя и пяти-семикратная скорость нарастания напряжения.

Для гидрогенераторов Куйбышевской ГЭС завод «Электросила» предложил так называемую

машинную систему возбуждения с дополнительным, отдельно стоящим мотор-генератором, питающимся от вспомогательного генератора, размещенного на общем валу агрегата. Такой системой возбуждения снабжены девять агрегатов. Девять агрегатов оборудуются системой ионного возбуждения, испытания которой на Щербаковской ГЭС дали положительные результаты. На остальных двух генераторах, работающих на местную энергосистему, применена обычная система, т. е. их возбуждение осуществляется от возбудителя, расположенного на валу агрегата.

Главная схема электрических соединений. Энергия Куйбышевской ГЭС будет передаваться по двум линиям 400 кВ в Московскую энергосистему и по одной линии 400 кВ в энергосистемы Урала. Учитывая, что с течением времени количество электроэнергии, передаваемой на Урал, может увеличиться, в распределительном устройстве 400 кВ предусмотрено место еще для одной линии в сторону Урала. Для выдачи электроэнергии сравнительно близко расположенным потребителям предусматриваются распределительные устройства 220 и 110 кВ с возможностью присоединения к шинам первого из них шести, а второго — восьми линий электропередачи.

Следует отметить, что, как это выяснилось впоследствии, большой необходимости в распределительном устройстве 110 кВ на Куйбышевской ГЭС не было. Сравнительно энергоемких, а также удаленных от станции потребителей, например г. Ульяновск, более целесообразно питать при напряжении 220 кВ . Поэтому не было необходимости в большом количестве линий 110 кВ и, следова-

тельно, в сложном распределительном устройстве этого напряжения.

Принятая для Куйбышевской ГЭС главная схема электрических соединений приведена на рис. 2.

Учитывая большое число цепей, присоединенных к шинам 400 кВ, большую мощность, выдаваемую при этом напряжении, а также и то, что напряжение 400 кВ в Советском Союзе применено впервые, для распределительного устройства этого напряжения предусмотрена двойная система шин с присоединением к ним каждой цепи через два выключателя.

Так как в процессе эксплуатации может возникнуть необходимость в раздельной работе Московской и Уральских энергосистем, шины 400 кВ делятся выключателями на две секции, к одной из которых присоединены московские линии, к другой — уральская.

Для распределительного устройства 220 кВ приняты одинарная, секционированная реактором, и обходная системы шин с присоединением каждой цепи через один выключатель.

Выводы обмоток 220 кВ трансформаторных групп к обходной системе шин не присоединяются, так как к шинам 220 кВ присоединены четыре группы трехобмоточных трансформаторов, и выход из работы выключателя 220 кВ одной из групп не повлечет за собой недоотпуска электроэнергии в сеть 220 кВ. Мощность же трансформаторной группы, выключатель которой вышел из работы, может быть выдана в сеть 110 или 400 кВ.

На напряжении 110 кВ принята схема с двойной и обходной системами шин. Одна система шин секционирована реактором. Каждая цепь присоединяется через один выключатель. Кроме отходящих линий, к обходной системе шин присоединены и вводы трансформаторов, так как к шинам 110 кВ присоединяются только две трансформаторные группы и выход из работы выключателя

110 кВ одной из групп может повлечь за собой нарушение работы системы 110 кВ.

Трансформаторный завод не мог поставить для Куйбышевской ГЭС транспортабельных трансформаторов 13,8/420 кВ мощностью более чем 123,5 Мва в фазе и автотрансформаторов 13,8/242/420 кВ с мощностью обмотки генераторного напряжения более чем 82,5 Мва. Исходя из этого, а также учитывая мощность системы, к которой присоединяется Куйбышевская ГЭС, на станции устанавливаются двухобмоточные и трехобмоточные трансформаторы 13,8/420 и 13,8/121/420 кВ мощностью по 123,5 Мва в фазе, трехобмоточные трансформаторы 13,8/121/242 кВ мощностью по 82,5 Мва в фазе и автотрансформаторы 13,8/242/420 кВ проходной мощностью 167 Мва в фазе.

Обмотки генераторного напряжения трансформаторов и автотрансформаторов расщеплены на две или три ветви в зависимости от числа генераторов, объединяемых в один электрический блок. Связь генераторов с трансформаторами осуществляется шинами.

В связи с тем, что напряжение на шинах 400 кВ будет изменяться от 360 до 420 кВ в зависимости от нагрузки, группы трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов снабжены вольтодобавочными агрегатами для продолжного регулирования напряжения в пределах $\pm 10\%$ его номинального значения. Вольтодобавочные агрегаты включаются со стороны нейтрали обмотки 220 кВ.

В распределительных устройствах 400, 220, 110 и 13,8 кВ Куйбышевской ГЭС устанавливаются воздушные выключатели мощностью отключения соответственно 15; 5; 4; 2 и 0,4 Гва.

Воздух к выключателям подается при давлении 20 ат. Выключатели, установленные в здании ГЭС, снабжаются воздухом от общего воздушного хозяйства станции, а выключатели открытых рас-

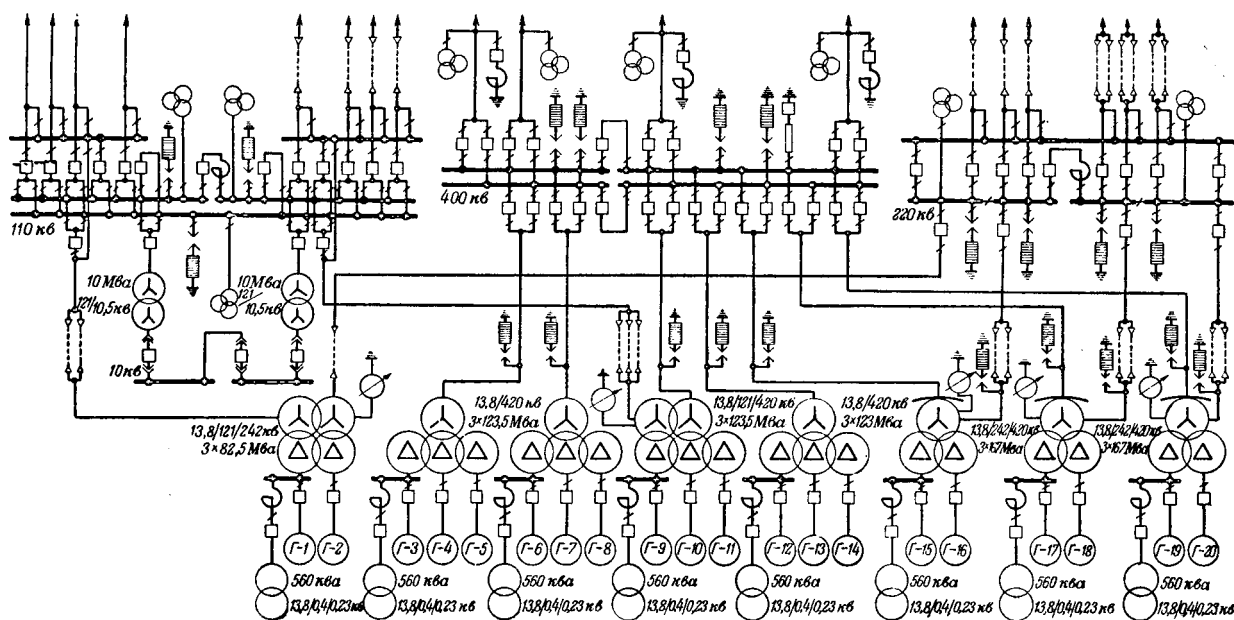


Рис. 2. Принципиальная схема электрических соединений Куйбышевской ГЭС.

пределительных устройств 110, 220 и 400 кВ — от специальных компрессорных установок.

Для соединения главных повысительных трансформаторов и автотрансформаторов с распределительными устройствами 220 и 110 кВ и для вывода части линий электропередачи 220 и 110 кВ за пределы гидроузла применены кабели. Осуществление указанных связей и выводов в виде воздушных линий при наличии на станции напряжений 400, 220 и 110 кВ и необходимости вывода линий всех трех напряжений на оба берега было бы крайне сложным и затруднительным.

Кабели 220 и 110 кВ — маслонеполненные, в стальных трубах, заполненных маслом под давлением 15 ат. В каждую трубу заключено по три одножильных кабеля. В пределах здания ГЭС кабели 220 и 110 кВ проложены по кабельному этажу; между зданием ГЭС и распределительными устройствами 110 и 220 кВ — в земле. Кабельные участки линий 220 и 110 кВ проложены также в земле.

Сечение кабеля 110 кВ — 425 мм², а кабеля 220 кВ — 550 мм². Пропускная способность одного трехфазного кабеля 110 кВ — до 123 Мва, а кабеля 220 кВ — до 250 Мва.

Для поддержания в стальной трубе кабеля необходимого давления применены специальные подпитывающие устройства.

Схема собственных нужд. Схема собственных нужд переменного тока 10 и 0,38 кВ представлена на рис. 3.

Потребители, непосредственно связанные с работой агрегатов, получают питание от сухих трансформаторов 13,8/0,4—0,23 кВ мощностью 560 кВА. На каждый электрический блок устанавливается по одному такому трансформатору.

Каждые два трансформатора мощностью по 560 кВА резервируются трансформатором 10/0,4—0,23 кВ мощностью 750 кВА, питающимся от шин общестанционного распределительного устройства 10 кВ. От трансформаторов мощностью по 750 кВА питаются общестанционные собственные нужды.

Общестанционное распределительное устройство 10 кВ — комплектное, состоит из двух секций, каждая из которых питается трансформатором 121/10,5 кВ мощностью 10 Мва. Кроме трансформаторов мощностью по 750 кВА, от распределительного устройства 10 кВ питаются потребители открытых распределительных устройств 400, 220 и 110 кВ, сороудерживающего сооружения, водосливной плотины и шлюзов, а также сеть наружного и внутреннего освещения гидроэлектростанции и гидроузла.

Все электродвигатели собственных нужд, за исключением электродвигателей насосов откачки воды из отсасывающих труб, имеют напряжение 380 в. Для насосов откачки воды из отсасывающих труб приняты электродвигатели напряжением 10 кВ, мощностью по 700 кВт.

Напряжение 10 кВ принято для распределительной сети собственных нужд гидроэлектростанции ввиду большой протяженности этой сети и больших мощностей, присоединенных к ней. Например, мощность потребителей сороудерживающего

щего сооружения при включенном обогреве решеток составляет около 15 Мва, а водосливной плотины при включенном обогреве пазов — около 1 800 кВА.

Для осветительной сети гидроэлектростанций принято напряжение 380/220 в. Эта сеть питается от отдельных трансформаторов 10/0,4—0,23 кВ мощностью по 180 кВА, резервируемых фидерами 380 в от щитов общестанционных собственных нужд. Осветительная сеть распределительных устройств 400, 220 и 110 кВ присоединена к трансформаторам, питающим силовую нагрузку соответствующих открытых распределительных устройств.

Сеть аварийного освещения здания гидроэлектростанции нормально питается от тех же трансформаторов, что и осветительная сеть ГЭС. При исчезновении переменного напряжения сеть переключается на питание от специального синхронного генератора мощностью 35 кВт, который вращается электродвигателем постоянного тока, питающимся от шин собственных нужд постоянного тока. Преимущество такой схемы в том, что разветвленная сеть аварийного освещения отделена от сети постоянного тока. На открытых распределительных устройствах аварийного освещения не предусматривается.

В силовой и осветительной сетях 380 в в качестве основной коммутационной аппаратуры применены автоматы ХЭМЗ с максимальным и мгновенным расцепителями; для осуществления автоматического ввода резерва приняты автоматы типа А2050 с дистанционным управлением на постоянном токе. В цепях отдельных электродвигателей, участвующих в циклах автоматики, установлены магнитные пускатели. В сети 10 кВ использованы выключатели типа ВМГ-133 с соленоидными приводами.

Для сети собственных нужд постоянного тока принято напряжение 220 в. Эта сеть питается от двух аккумуляторных батарей типа СК-20, размещенных в здании ГЭС, и двух батарей типа СК-5, размещенных в щитовом блоке открытого распределительного устройства 400 кВ.

Питание потребителей постоянного тока открытого распределительного устройства 400 кВ от отдельных аккумуляторных батарей объясняется большой ответственностью этого распределительного устройства, через которое передается почти вся мощность гидроэлектростанции, сравнительно большой мощностью потребителей постоянного тока открытого распределительного устройства 400 кВ и удаленностью его от здания ГЭС на 1 000 м. Потребители открытых распределительных устройств 110 и 220 кВ питаются от батарей, установленных в здании ГЭС.

Схема собственных нужд постоянного тока — типовая. Каждая батарея присоединяется к своей системе шин 220 в. От одной системы шин питаются потребители силовой нагрузки, а от другой — нагрузки управления. Коммутационная аппаратура размещена на главном щите постоянного тока, установленном в помещении главного щита управления. Батареи работают в режиме

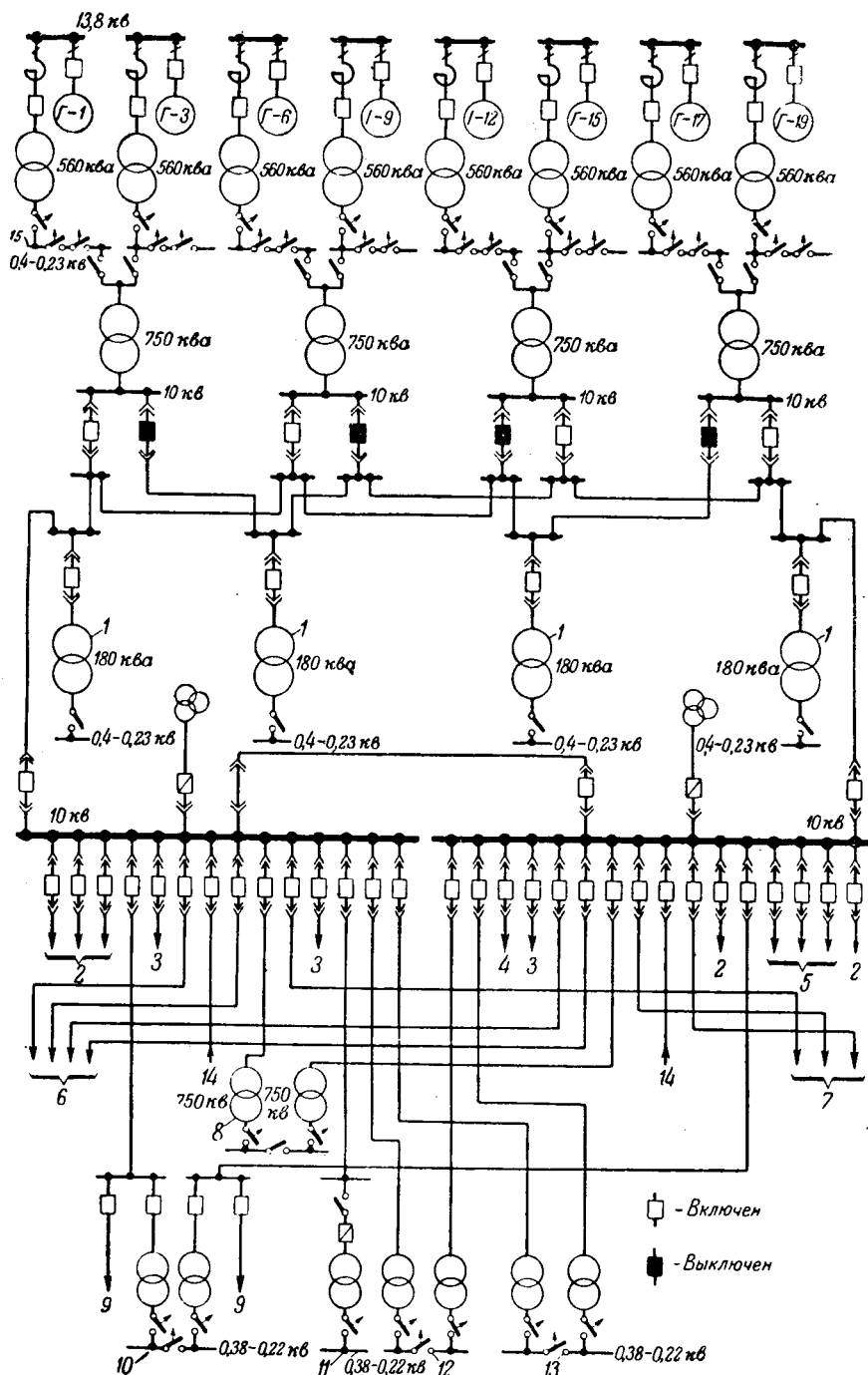


Рис. 3. Принципиальная схема собственных нужд переменного тока Куйбышевской ГЭС.

1 — трансформаторы внутреннего освещения; 2 — фидеры плотин и шлюзов; 3 — фидеры сороудерживающего сооружения; 4 — фидер наружного освещения; 5 — резерв; 6 — насосы откачки воды из отсасывающих труб в блоке монтажной площадки; 7 — насосы откачки воды из отсасывающих труб в грязеспуске; 8 — подстанция монтажной площадки; 9 — фидеры радиостанции; 10 — подстанция распределительного устройства 400 кВ; 11 — подстанция наружного освещения; 12 — подстанция распределительного устройства 220 кВ; 13 — подстанция распределительного устройства 110 кВ; 14 — от трансформатора 110/10 кВ. 10 Мва; 15 — щиты 0,4...0,23 кВ блоков.

постоянного подзаряда, осуществляемого зарядным агрегатом (мотор-генератором). Для заряда батареи после глубокого разряда предусмотрен отдельный мотор-генератор, который может быть присоединен к любой системе шин.

Для питания потребителей постоянного тока электрических блоков предусмотрено по три панели на каждый блок: две — для цепей силовой

нагрузки и одна — для цепей управления. Панель управления связана с силовыми панелями кабельной перемычкой. Питание панелей осуществляется по самостоятельным фидерам от шин главного щита постоянного тока. Все панели оборудуются автоматами ХЭМЗ. На главном щите постоянного тока предусмотрена возможность переключения фидеров управления с одной системы шин на другую.

Предусмотрены устройства для автоматического регулирования напряжения, контроля изоляции и исчезновения напряжения на шинах постоянного тока. Сигналы о появлении «земли» или исчезновении напряжения в системе постоянного тока передаются на центральный пост управления станции.

Автоматизация и управление станций. Агрегаты Куйбышевской ГЭС автоматизированы в такой степени, что можно пуск и остановку их производить подачей только одного импульса, а наблюдение за режимом работы вести без вмешательства персонала. Необходимая последовательность операций при пуске и остановке достигается применением в системе регулирования турбины вспомогательных устройств, связанных с органами управления турбиной и обеспечивающих полную автоматизацию процессов пуска и остановки агрегата.

Пуск и остановка агрегата могут осуществляться автооператорами или персоналом станции. В последнем случае пуск можно осуществить с центрального поста управления или со щита управления, установленного непосредственно у агрегата.

Включение гидрогенератора в сеть производится методом самосинхронизации.

Автооператоры совместно с другими специальными устройствами автоматически распределяют активную и реактивную нагрузки станции между работающими агрегатами таким образом, чтобы к. п. д. станции в целом был максимальным.

Для того чтобы при помощи агрегатов Куйбышевской ГЭС осуществлять регулирование частоты в системе, на ней устанавливаются регуляторы частоты.

Отходящие от гидроэлектростанции линии электропередачи оборудуются устройствами авто-

матического повторного включения и автоматического осциллографирования, а также импульсными искателями повреждений.

В схеме собственных нужд предусмотрено автоматическое включение резервного оборудования и резервных фидеров.

При такой степени автоматизации достаточно иметь дежурный персонал только на центральном посту управления, с которого осуществляется управление всеми 20 гидроагрегатами, выключателями силовых трансформаторов, линий электропередачи 400, 220 и 110 кВ и другим имеющим оперативное значение оборудованием.

На центральном посту управления устанавливаются звукозаписывающие аппараты для записи оперативных переговоров персонала гидроэлектростанции с диспетчером.

У каждого гидрогенератора устанавливается свой щит управления, с которого можно управлять агрегатом во время ремонтов и испытаний. Управление с агрегатного щита можно рассматривать как резервное. Кроме того, у каждого электрического блока устанавливается щит, на котором размещаются аппаратура релейной защиты повысительных трансформаторов и аппаратура сигнализации состояния оборудования собственных нужд блока.

Ввиду больших расстояний от открытых распределительных устройств до центрального поста управления на станции установлены трансформаторы тока 400, 220 и 110 кВ с номинальными вторичными токами, равными 1 А.

С Куйбышевской ГЭС на объединенное диспетчерское управление единой высоковольтной сети средствами телемеханики предусмотрено передавать: суммарную активную мощность генераторов, работающих на шины 400 и 220 кВ; суммарную активную нагрузку обмоток 110 и 220 кВ повысительных трансформаторов; напряжение и частоту на шинах 400 кВ; нагрузку линий электропередачи 400 кВ в сторону Москвы, нагрузку линии 400 кВ в сторону Урала; положение выключателей («включен», «отключен») в цепях генераторов, линий электропередачи, реакторов 400 кВ, повысительных трансформаторов и секционных выключателей.

С объединенного диспетчерского управления может производиться изменение общей нагрузки генераторов, работающих на шины 400 и 220 кВ, путем воздействия на регулятор активной мощности и вызов известительной передачи о положении всех телеконтролируемых объектов гидроэлектростанции. Устройства телемеханики устанавливаются в помещении центрального поста управления.

Компоновка оборудования и отдельные конструктивные решения. На рис. 4 дан поперечный разрез по зданию ГЭС. Электрооборудование, устанавливаемое в здании ГЭС, размещено в основном в помещениях, расположенных над отсасывающими трубами; на площадке, одновременно служащей крышей для этих помещений, на открытом воздухе установлены повысительные трансформаторы и автотрансформаторы. Некото-

рая часть электрооборудования размещена в машинном зале.

На монтажную площадку трансформаторы и автотрансформаторы доставляются на собственных тележках по специальному пути, проложенному вдоль здания ГЭС. Тележки трансформаторов — поворотные. Вдоль трансформаторов проложены шинопроводы, при помощи которых обмотки генераторного напряжения соединяются в «треугольники». В качестве шинопроводов приняты медные трубы диаметром 140 и 100 мм, которые при помощи подвесных изоляторов типа П-4,5 закреплены в соответствующих металлоконструкциях.

Непосредственно у трансформаторов на металлоконструкциях устанавливаются концевые муфты кабелей 220 и 110 кВ.

Под трансформаторами устроены открытые маслоприемники для улавливания масла при аварии в трансформаторе. Из маслоприемников масло сливается в нижний бьеф. Группы повысительных трансформаторов разделены между собой огнеупорными перегородками.

Самый верхний этаж помещений, расположенных над отсасывающими трубами, отведен для кабелей, 220, 110 и 10 кВ, контрольных кабелей, идущих с центрального поста управления к электрическим блокам и открытым распределительным устройствам, а также для магистральных маслопроводов, по которым осуществляется подвод масла к повысительным трансформаторам.

Этажом ниже размещены распределительные устройства 13,8 кВ, щиты релейной защиты и автоматики электрических блоков, трансформаторы мощностью 750, 560 и 180 кВА с соответствующими щитами собственных нужд 380/220 В, а также распределительные устройства собственных нужд 10 кВ и аккумуляторные батареи с мотор-генераторами.

Еще одним этажом ниже размещена аппаратура охлаждения масла трансформаторов и вентиляционные установки. Самый нижний этаж отведен под масло-, водо- и воздухопроводы машинного зала ГЭС.

Распределительное устройство 13,8 кВ конструктивно выполнено таким образом, что оно, по существу, является сборным, состоящим из отдельных камер (камеры выключателя, камеры трансформаторов напряжения, камеры разъединителя и т. п.), закрытых сетками или стальными листами. Между собой камеры соединяются шинными конструкциями. Такая конструкция распределительного устройства 13,8 кВ позволила разместить в одном зале распределительное устройство 13,8 кВ, щиты 380/220 В, щиты защиты и другое оборудование, ускорить и упростить монтаж, повысить удобство эксплуатации и уменьшить объемы строительных работ.

Ввиду больших токов короткого замыкания каждая шина распределительного устройства 13,8 кВ в большинстве узлов закреплена в опорных изоляторах, установленных друг против друга. Распределительные устройства 10 кВ и щиты 380/220 В — комплектные, заводского изготовления.

Рис. 4. Разрез по зданию гидроэлектростанции.

1—выводы на открытое распределительное устройство 400 кВ; 2—этаж кабелей 220 и 110 кВ; 3—этаж электрооборудования; 4—аппаратура охлаждения трансформаторов; 5—шнупроводы, соединяющие обмотки генераторного напряжения трансформаторов в „треугольники“; 6—кран грузоподъемностью 450 т; 7—кран грузоподъемностью 30 т; 8—кран грузоподъемностью 2×125 т; 9—сороудерживающее сооружение; 10—кран грузоподъемностью 2×125 т; 11—металлический шпунт; 12—кран грузоподъемностью 2×125 т.

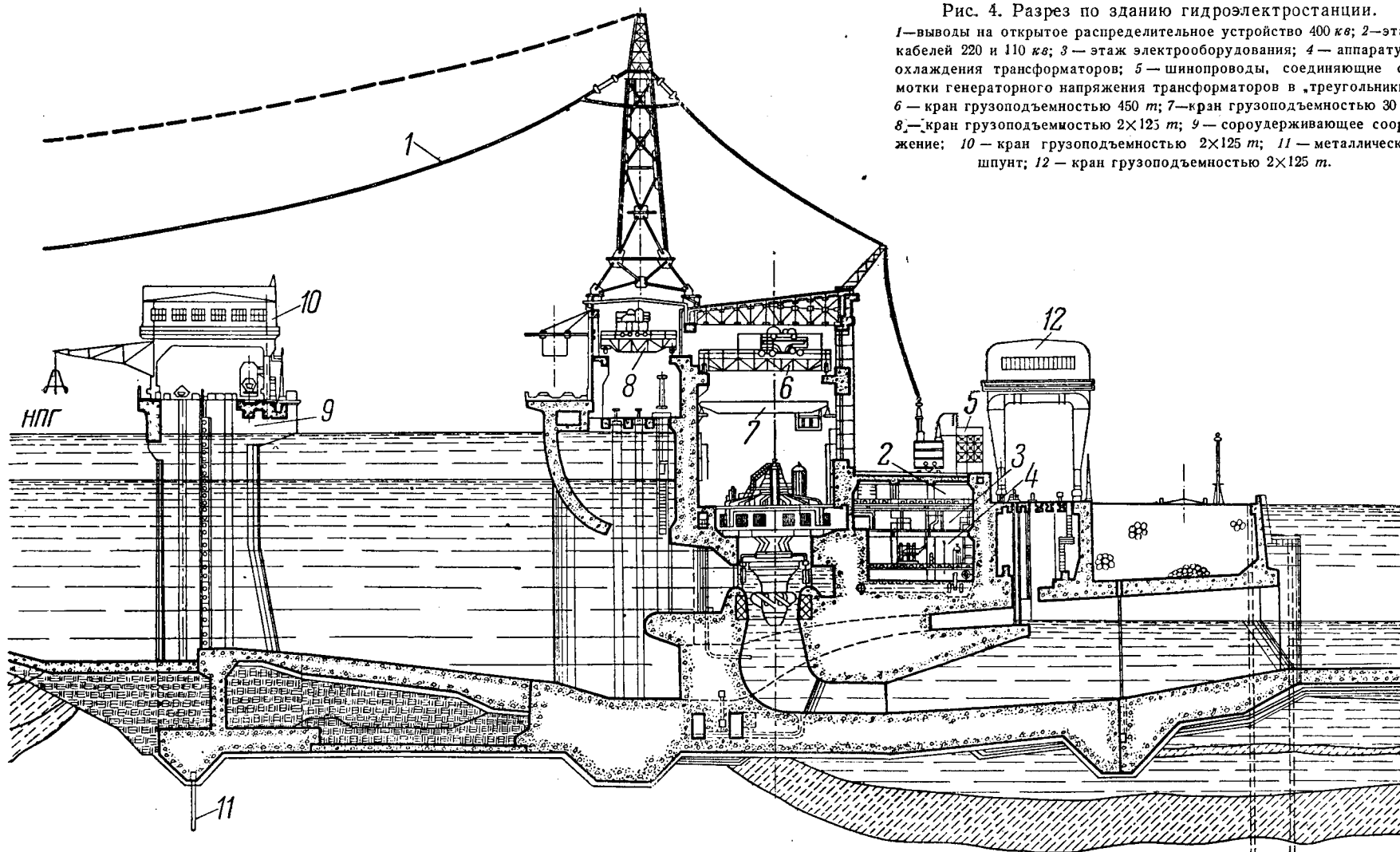


Рис. 5. Размещение электрооборудования трехагрегатного блока с машинной системой возбуждения генераторов.

1 — щиты автоматики генератора; 2 — распределительное устройство 3 кв вспомогательного генератора; 3 — щиты защиты и собственных нужд блока; 4 — сопротивления в цепи возбуждения; 5 — аппаратура 13,8 кв выводов генераторов; 6 — трансформаторы напряжения; 7 — реакторы и выключатель трансформатора собственных нужд; 8 — трансформатор собственных нужд; 9 — шахты для кабелей; 10 — проемы для вывода шин; 11 — вход в турбинный зал; 12 — вентиляционные камеры; 13 — помещение аккумуляторной батареи; 14 — служебное помещение.

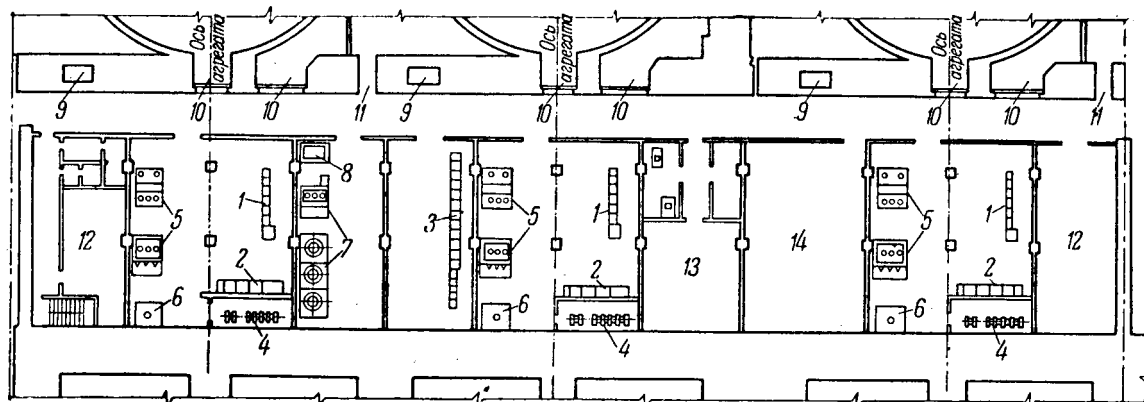


Рис. 6. Размещение электрооборудования трехагрегатного блока с ионной системой возбуждения генераторов.

1 — аппаратура ионного возбуждения; 2 — щиты ионного возбуждения; 3 — щиты защиты и собственных нужд блока; 4 — комплектная подстанция собственных нужд; 5 — аппаратура 13,8 кв выводов генератора; 6 — трансформаторы напряжения; 7 — реакторы и выключатель трансформатора собственных нужд; 8 — трансформатор собственных нужд; 9 — шахты для кабелей; 10 — проемы для вывода шин; 11 — вход в турбинный зал; 12 — вентиляционная камера; 13 — помещение для формовки выпрямителей; 14 — аппаратура формовочного стенда; 15 — служебное помещение.

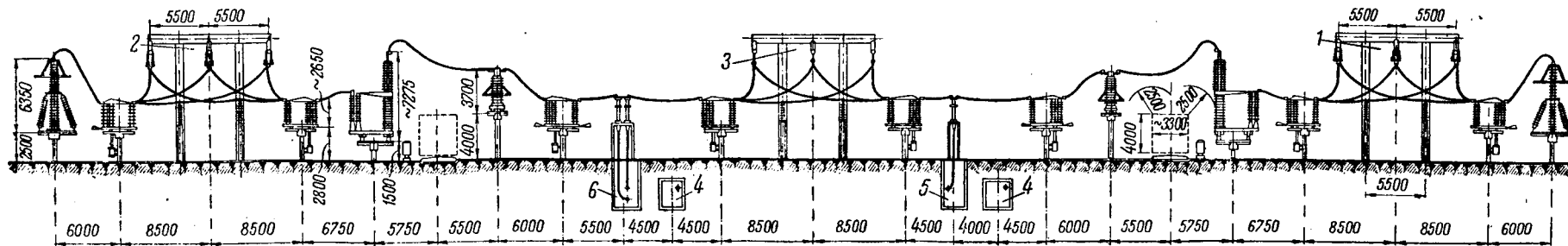
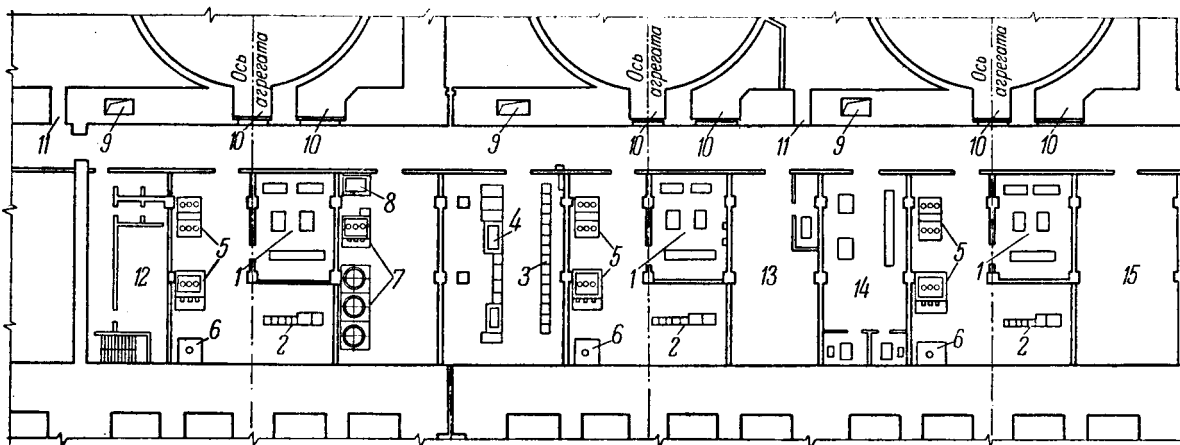


Рис. 7. Открытое распределительное устройство 220 кв (разрез по ячейкам разрядников и отходящих линий).

1 — первая секция рабочей системы шин; 2 — вторая секция рабочей системы шин; 3 — обходная система шин; 4 — туннель кабелей 220 кв (ввод с ГЭС); 5 — туннель кабелей 220 кв (линии на правый берег); 6 — туннель кабелей 22 кв (линии на левый берег).

На втором (считая сверху) этаже помещений над отсасывающими трубами вдоль стены машинного зала проходит основной эксплуатационный коридор, из которого имеются выходы в машинный зал. Эксплуатационные коридоры предусмотрены и на других этажах помещений над отсасывающими трубами. Как основной эксплуатационный коридор, так и коридоры других этажей имеют выходы на лестницы, связывающие помещения каждого электрического блока, и на основную трехмаршевую лестницу гидроэлектростанции, находящуюся в блоке монтажной площадки.

Часть электрооборудования, относящегося к агрегатам, размещена в машинном зале: на отметке пола машинного зала непосредственно у каждого агрегата установлены агрегатные щиты управления, щиты измерения уровней и расходов воды, панели компаундирования и коррекции и мотор-генераторы системы возбуждения (у агрегатов с машинным возбуждением).

Колонка регулятора скорости, маслonaпорная установка и агрегатные щиты сосредоточены в одном месте, что представляет определенные эксплуатационные удобства.

На отметке пола турбинного зала установлена аппаратура, подключенная к нулевым точкам обмоток генераторов, сопротивления, автоматы гашения поля и т. п.

На рис. 5 показано размещение электрооборудования, относящегося к трехагрегатному блоку с машинной системой возбуждения генераторов, а на рис. 6 — к такому же блоку, но с ионной системой возбуждения.

В блоке монтажной площадки, в той его части, которая является продолжением машинного зала, помещаются ремонтные мастерские, а также предусмотрены площади для раскладывания деталей оборудования во время ремонта. В другой части блока, являющейся продолжением по-

мещений над отсасывающими трубами, размещены центральное масляное хозяйство, служебный корпус с лабораториями, бытовыми помещениями и узлом связи.

Открытые распределительные устройства 400 и 110 кВ выполняются на металлических опорах, заделанных в бетонные фундаменты. Фундаменты под оборудование 400 кВ выполнены из сборного железобетона.

Открытое распределительное устройство 220 кВ выполнено на железобетонных опорах. Разрез по ячейкам разрядников и линий открытого распределительного устройства 220 кВ дан на рис. 7.

На территории каждого открытого распределительного устройства размещено здание щитового блока, в котором находятся панели управления и защиты трансформаторных групп и линий, оборудование дальней связи, подстанции собственных нужд распределительных устройств и вентиляционные устройства. Кроме этого, в щитовом блоке распределительного устройства 400 кВ размещено оборудование постоянного тока, а в щитовом блоке распределительных устройств 220 и 110 кВ — подпитывающие устройства для участков линий электропередачи, выполненных кабелем 220 и 110 кВ. Контрольные кабели и силовые кабели напряжением до 10 кВ прокладываются в туннелях, проходящих между зданием ГЭС и соответствующими распределительными устройствами.

Все открытые распределительные устройства имеют подъездные пути в виде автомобильных дорог, а распределительное устройство 400 кВ в связи с установкой на нем швнтрирующих реакторов, кроме этого, имеет железнодорожный подъездной путь.

Жилой поселок эксплуатационного персонала размещается на правом берегу Волги в 4 ... 5 км от гидроэлектростанции и связан с ней асфальтированной дорогой.

[25. 1. 1957]



О расчете электродинамических сил в обмотках трансформаторов

Доктор техн. наук, проф. И. М. ПОСТНИКОВ

Киевский политехнический институт

Проблема расчета электродинамических сил в трансформаторах и других электромагнитных механизмах, приводящихся к трансформатору, занимает важное место среди прочих проблем, возникающих при проектировании этих устройств. Особенно большое значение эта проблема приобретает в связи с задачами производства сверхмощных трансформаторов.

Расчету электродинамических сил в обмотках трансформаторов посвящено значительное количество работ как отечественных, так и иностранных. Однако многие вопросы остаются не вполне исследованными, а предложенные методы не свободны от недостатков и неточностей. В данной работе показан метод расчета более простой и теоретически более обоснованный. При этом при-

няты допущения, обычные при расчете средних сил (монолитность катушек, пренебрежение намагничивающим током и пр.). При расчете напряжений учитывается приближенно их распределение по сечению обмотки.

Аксиальные силы при симметрично расположенных обмотках вызывают лишь сжатие обмоток в осевом направлении. При смещении обмоток на величину h (рис. 1), кроме этих сил, появляется результирующая аксиальная сила, направленная так, чтобы величина асимметрии h увеличилась. Рассмотрим сначала метод расчета этой результирующей аксиальной силы.

Как известно, результирующая сила в направлении h равна частной производной от запаса электрокинетической энергии A системы по коор-

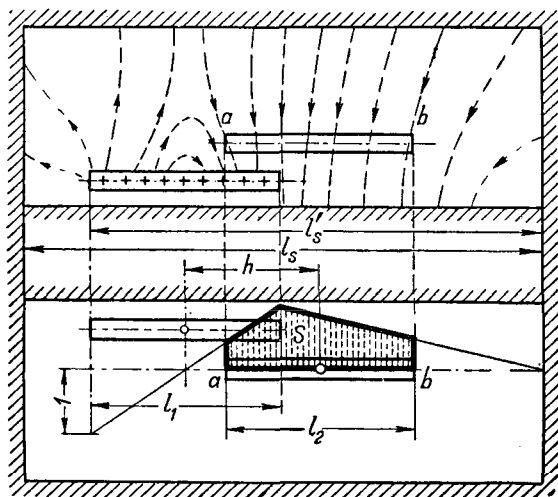


Рис. 1.

динате h . При этом частная производная должна быть взята, полагая токи или потокоцепления не зависящими от h , т. е.

$$f_h = \left(\frac{\partial A}{\partial h} \right)_{i=\text{const}} = - \left(\frac{\partial A}{\partial h} \right)_{\psi=\text{const}}. \quad (1)$$

Запас энергии двух обмоток равен:

$$A = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2. \quad (2)$$

Полные индуктивности первичной и вторичной обмоток L_1 и L_2 при относительном их смещении практически не изменяются. Изменяется только взаимная индуктивность $M_{12} = M_{21} = M$. Поэтому

$$\frac{\partial A}{\partial h} = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial h} [\partial \mathcal{H} / \text{см}]. \quad (3)$$

Токи i_1 и i_2 могут изменяться во времени как угодно и должны определяться из уравнений

$$i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \psi_1),$$

$$i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t + \psi_2).$$

Рассматривая наиболее важный случай, когда $U_2 = 0$, т. е. режим короткого замыкания в момент $t=0$, и считая, что $M=f(h)$ может быть взято в виде параметра, зависящего только от координаты h (но не от времени t), получим известные уравнения для токов i_1 и i_2 :

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{(\omega L'_{1h})^2 + r_\kappa^2}} [\sin(\psi_2 - \varphi_\kappa) e^{-\alpha_\kappa t} - \sin(\omega t + \psi_2 - \varphi_\kappa)]; \quad (4)$$

$$i_2 = -\frac{M}{L_2} i_1; \quad \alpha_\kappa = \frac{r_\kappa}{L'_{1h}} = \frac{\omega U_{a\kappa}}{U_{p\kappa}},$$

где $L'_{1h} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$ — эквивалентная индуктивность первичной обмотки с учетом короткозамкнутой вторичной, зависящая от смещения h ;

$r_\kappa = r_1 + r_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2$ — активное сопротивление короткого замыкания.

Максимум тока будет в том случае, если в момент короткого замыкания ($t=0$) $\psi_2 - \varphi_\kappa = \frac{\pi}{2}$, и так как обычно в трансформаторах

$$\varphi_\kappa = \arctg \frac{\omega L'_{1h}}{r_\kappa} \approx \frac{\pi}{2},$$

то $\psi_2 \approx \pi$, т. е. при замыкании обмотки в тот момент, когда напряжение в ней проходит через нулевое значение (в этот момент ее потокоцепление проходит через максимальное значение). В этом случае

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{(\omega L'_{1h})^2 + r_\kappa^2}} [e^{-\alpha_\kappa t} - \cos \omega t]. \quad (4a)$$

Пик тока получится при $t = \frac{\pi}{\omega}$ и будет равен:

$$I_{1n} = \sqrt{2} I_1 [1 + e^{-\frac{\alpha_\kappa \pi}{\omega}}] = \sqrt{2} I_1 k_A, \quad (5)$$

где $\sqrt{2} I_1$ — амплитуда симметричного тока; $k_A = 1 + e^{-\alpha_\kappa \pi}$ — коэффициент асимметричной составляющей.

При малых значениях $\alpha = \frac{r_\kappa}{\omega L'_{1h}}$ получаем $e^{-\alpha_\kappa \pi} \approx 1 - \alpha_\kappa \pi$ и $k_A \approx 2 - \alpha_\kappa \pi$ (справедливо при $\alpha < 0,1$).

Согласно (4) пик вторичного тока будет:

$$I_{2n} = -\frac{M}{L_2} I_{1n} \quad (6)$$

и максимальное значение силы по (3)

$$F_h = I_{1n} I_{2n} \frac{\partial M}{\partial h} = I_{1n}^2 \frac{M}{L_2} \frac{\partial M}{\partial h} [\partial \mathcal{H} / \text{см}]. \quad (7)$$

Среднее значение силы во времени

$$F_{hcp} = (i_1)_{cp}^2 \frac{M}{L_2} \frac{\partial M}{\partial h} [\partial \mathcal{H} / \text{см}]. \quad (8)$$

Взаимная индуктивность M изменяется от максимального значения при $h=0$, когда обмотки симметричны, до минимального значения, когда асимметрия обмоток наибольшая. Уменьшение взаимной индуктивности получается вследствие возрастания поперечного потока рассеяния обмоток при их смещении. При симметричном положении результирующая н.с. по контурам поперечного рассеяния равна нулю. Имеются только продольный и внутренний поперечный потоки рассеяния между обмотками.

Продольный поток рассеяния вызывает радиальные силы, а внутренний поперечный поток рассеяния — аксиальные силы сжатия. При смещении обмоток, кроме продольного потокоцепления рассеяния, определяемого величиной $L'_{1h} = L_\kappa$, появляется дополнительное поперечное потокоцепление

$$L_q = L_{q1} + L_{q2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2$$

и полная индуктивность рассеяния станет равной:

$$L'_{1h} = L_1 - \frac{M^2}{L_2} = L_\kappa + L_q. \quad (9)$$

Формулы для силы (3), (7) можно теперь написать иначе. Полная электрокинетическая энергия при коротком замыкании вторичной обмотки может быть выражена через эквивалентную индуктивность первичной обмотки $L'_{1h} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$ в виде:

$$A = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2 = \frac{1}{2} L'_{1h} i_1^2.$$

При этом сила равна:

$$f_h = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L'_{1h}}{\partial h} \quad [\text{дж/см}]. \quad (10)$$

Как было указано, при увеличении асимметрии h эквивалентная индуктивность L'_{1h} возрастает вследствие уменьшения взаимной индуктивности M . Поэтому согласно (9) эквивалентную индуктивность можно представить в виде суммы индуктивности при $h=0$ (она равна L_κ) и дополнительной индуктивности от поперечного рассеяния, возникающего при $h \neq 0$.

Подставляя (9) в (10), получим силу

$$f_h = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_q}{\partial h} \quad [\text{дж/см}]; \quad (11)$$

при этом ток i_1 определяется по (4а). Пик силы определится пиком тока в соответствии с (5)

$$F_h = \frac{1}{2} I_{1n}^2 \frac{\partial L_q}{\partial h} = \frac{1}{2\omega} I_{1n}^2 \frac{\partial x_q}{\partial h} \quad [\text{дж/см}]. \quad (12)$$

Задача, следовательно, сводится к нахождению изменения реактивности поперечного рассеяния $x_q = \omega L_q$ при смещении обмоток h . Это изменение можно найти двумя методами. Первый подробно развит в [Л. 4] и сводится к определению выражения для x_q в функции смещения h и последующему его дифференцированию по h . Согласно этому методу находят эпюру результирующей н. с. вдоль обмотки при смещении (рис. 2). Эпюру напряженности поперечного поля рассеяния находят путем деления ординат н. с. на постоянную эффективную длину линий поперечного рассеяния, равную:

$$l_q = \frac{1}{2} (l_1 + l_2) + h + \frac{1}{2} \left(2c + \frac{5}{3} b_1 + \frac{2}{3} b_2 + \delta \right), \quad (13)$$

$l = \frac{1}{2} (l_1 + l_2)$ (все обозначения см. на рис. 2).

Зная напряженность поля рассеяния, получим магнитную энергию в объеме, занятом этим полем:

$$A_q = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V H^2 dV = \frac{1}{2} L_q i_1^2. \quad (14)$$

Отсюда

$$x_q = \omega L_q = \frac{\omega \mu_0 \int_V H^2 dV}{i_1^2}. \quad (15)$$

Элемент объема поперечного поля рассеяния равен средней длине витка, умноженной на l_q и на dx (для „приведенной“ картины поля)

$$dV = \pi D_{cp} l_q dx;$$

* Сложная картина действительного поперечного поля приводится к форме эпюры н. с. так же, как это делается для продольного поля.

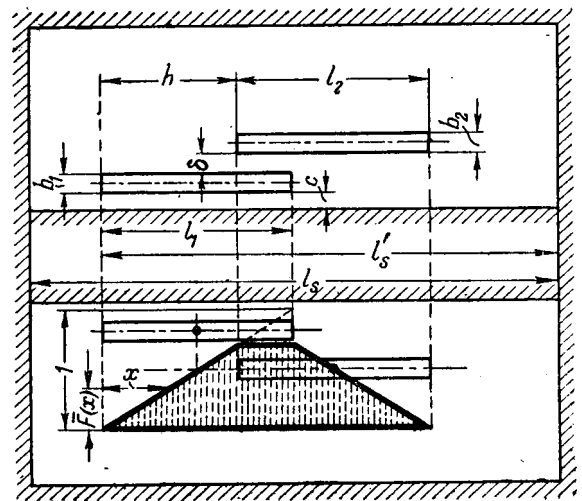


Рис. 2.

напряженность поля будет функцией x

$$H \equiv H(x) = \frac{F(x)}{l_q},$$

где $F(x)$ — эпюра результирующей н. с. двух обмоток в направлении x (рис. 2).

В относительных единицах

$$\bar{F}(x) = \frac{F(x)}{F_1} = \frac{F(x)}{i_1 \omega_1},$$

где $F_1 = i_1 \omega_1$.

Подставляя в формулу (15) dV и $[H(x)]^2$, получаем:

$$\begin{aligned} x_q &= \omega \mu_0 \omega_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \int_0^{l_2+h} [\bar{F}(x)]^2 dx = \\ &= \omega \mu_0 \omega_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} K(h), \end{aligned} \quad (16)$$

где $K(h) = \int_0^{l_2+h} [\bar{F}(x)]^2 dx$ — функция смещения обмоток h ;

при $h=0$ $K(h)=0$.

Для случая, представленного на рис. 2:

$$K(h) = \frac{h^2}{l} - \frac{1}{3} \frac{h^2}{l^2}. \quad (16a)$$

Аксиальная сила по (12) получится в виде:

$$\begin{aligned} f_h &= \frac{i_1^2}{2\omega} \frac{\partial x_q}{\partial h} = \frac{\mu_0}{2} (\omega_1 i_1)^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \frac{\partial K(h)}{\partial h} = \\ &= \frac{\mu_0}{2} (\omega_1 i_1)^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \left[\frac{2h}{l} - \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

При $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-8}$ гн/см сила получится в джоулях на сантиметр. Сила в килограммах равна $f_h [\kappa\Gamma] = 10,2 f_h [\text{дж/см}]$, или

$$f_h = 6,4 \cdot 10^{-8} (i_1 \omega_1)^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \left[\frac{2h}{l} - \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] [\kappa\Gamma]. \quad (17a)$$

Максимум силы будет при

$$i_1 = I_{1n} \text{ по (5).}$$

Предлагаемый ниже метод расчета силы основан непосредственно на уравнении (3). Рассмотрим обмотки, смещенные на расстояние h (рис. 1). Сила между первичной обмоткой и элементарным витком a - a вторичной обмотки равна:

$$df_x = i_1 s_2 b_2 \frac{\partial M}{\partial x} dx, \quad (18)$$

где s_2 — плотность тока во вторичной обмотке; b_2 — ширина меди без изоляции.

Полная сила найдется интегрированием (18) от $x=a$ до $x=b$, т. е.

$$f_h = i_1 s_2 b_2 \int_a^b \frac{\partial M}{\partial x} dx = i_1 \frac{i_2 w_2}{l_2} (M_b - M_a), \quad (19)$$

где M_b — взаимная индуктивность первичной обмотки с контуром b - b ;

M_a — взаимная индуктивность первичной обмотки с контуром a - a .

Разность $M_b - M_a$ равна сумме потокоцеплений от поперечного потока рассеяния первичной обмотки при $i_1 = 1$, связанных со вторичной на ее высоте l_2 (рис. 1), т. е. равна заштрихованной площади кривой поперечного голя рассеяния, созданного первичной катушкой при токе во вторичной, равном нулю. По (13) можно принять эффективную длину линии поперечного поля рассеяния:

$$l_q \approx \frac{l_1 + l_2}{2\pi} + \frac{1}{2} (D_2 - D). \quad (19a)$$

Далее, так как при $h = l'_s - \frac{l}{2}$ поперечное поле рассеяния равно нулю, а при $h = \frac{l}{2}$ оно имеет максимальное значение, то эпюра поля получается в виде треугольника, приведенного на рис. 1. Заштрихованная часть площади S этого треугольника пропорциональна величине аксиальной силы на единицу тока. Мы рассматриваем общий случай, когда высота окна l_s много больше высоты обмоток. Для случаев, когда высота обмотки l близка к l_s , смещение h может быть весьма малым.

Легко определить, как изменяется площадь S при изменении h (высота треугольника равна единице). Для пределов $0 < h < l$ при равных длинах обмоток $l_1 = l_2 = l$

$$S = 2h - h^2 \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{2l'_s - l} \right). \quad (20)$$

Для больших значений h

$$l < h < l'_s - \frac{l}{2},$$

могущих иметь место в соленоидах

$$S = l \left[1 + \frac{2h - l}{2l'_s - l} \right]. \quad (21)$$

Подставляя в формулу (19) значение площади S , получим силу

$$f_h = \frac{10,2\mu_0}{2} (i_1 w_1 i_2 w_2) \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \frac{S}{l_2} [\kappa\Gamma] \quad (22)$$

или

$$f_h = \frac{10,2\mu_0}{2} (i_1 w_1 i_2 w_2) \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \times \left[\frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2} \left(1 + \frac{l}{2l'_s - l} \right) \right] (\kappa\Gamma). \quad (23)$$

Максимум силы во времени получится при

$$(i_1 w_1 i_2 w_2) = (I_{1n} w_1)^2. \quad (24)$$

Сравнивая полученную формулу для силы с формулой (17), видим, что результаты получаются практически одинаковыми, но расчет по последнему методу является более простым. Точность расчета зависит от точности определения эффективной длины l_q . Формула (13), данная в [Л. 4], является результатом тщательных измерений. Тем не менее этот вопрос заслуживает специального рассмотрения и опытной проверки на моделях.

Ток в формулах (22) и (23) найдется аналогично (4а) и (5). Поперечная реактивность x_q найдется интегрированием выражения $\frac{\partial x_q}{\partial h}$, т. е.

$$x_q = \mu_0 \omega w_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \int \frac{S(h)}{l_2} dh = \mu_0 \omega w_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \left[\frac{h^2}{l} - \frac{1}{3} \frac{h^3}{l^2} \right] \quad (25)$$

(для пределов $0 < h < l$; $l_2 \approx l$).

Формула (22) для аксиальной силы получится также из следующего простого рассуждения. Заштрихованная площадь пропорциональна потоку поперечного рассеяния на высоте вторичной обмотки, а средняя ее ордината равна среднему значению индукции

$$B_{cp} = \frac{\mu_0 i_1 w_1 S}{l_q l_2}. \quad (26)$$

Аксиальная сила на вторичную обмотку по закону Био-Савара равна:

$$f_h = B_{cp} \pi D_{cp} i_2 w_2 = \mu_0 i_1 w_1 i_2 w_2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \frac{S}{l_2} [\partial \mathcal{H} / \text{см}], \quad (27)$$

т. е. получаем формулу (21), площадь S по (20).

Аксиальные силы при неравных длинах обмоток. В случае, когда $l_1 \neq l_2$, могут быть положения обмоток, указанные на рис. 3. Для рис. 3, а получаем:

$$K(h) = \int_0^h [\bar{F}_1(x)]^2 dx + \int_0^{l-h} [\bar{F}_2(x)]^2 dx = \int_0^h \left(\frac{x}{l_1} \right)^2 dx + \int_0^{l-h} \frac{h^2 x^2 dx}{l_1^2 (l_1 - h)^2} = \frac{1}{3} \frac{h^2}{l_1},$$

индуктивность

$$x_q = \omega \mu_0 w_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} K(h) \quad (28)$$

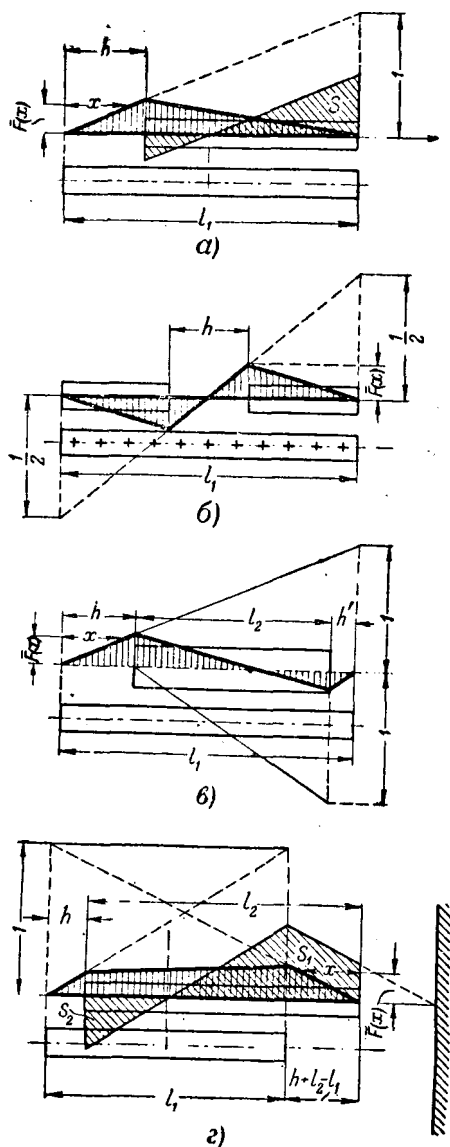


Рис. 3.

и сила

$$f_h = \frac{i_1^2}{2\omega} \frac{\partial x_q}{\partial h} = \frac{i_1^2}{2} \mu_0 \omega_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \cdot \frac{\partial K(h)}{\partial h}$$

или

$$f_h = 5,1 \mu_0 (\omega_1 i_1)^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \frac{2}{3} \frac{h}{l_1} [\kappa \Gamma]. \quad (29)$$

Для случая, представленного на рис. 3, б, получаем:

$$K(h) = \frac{1}{12} \frac{h^2}{l_1}; \quad \frac{dK(h)}{dh} = K'(h) = \frac{1}{6} \frac{h}{l_1}. \quad (30)$$

Полная сила на обе части подразделенной обмотки

$$f_h = 5,1 \mu_0 (i_1 \omega_1)^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \cdot \frac{1}{6} \frac{h}{l_1} [\kappa \Gamma], \quad (31)$$

на одну часть

$$f'_h = \frac{1}{2} f_h. \quad (31a)$$

Случай асимметрии, представленный на рис. 3, в, приводится к рис. 3, а. При малых значениях $l_1 - l_2 - x$ можно принять:

$$K(h) = \frac{1}{3} \frac{h^2}{l_1} \text{ и } K'(h) = \frac{2}{3} \frac{h}{l_1}.$$

Для общего случая асимметрии (рис. 3, г) при незначительной разнице $l_2 - l_1$ получается результат, близкий к (16а), т. е.

$$K(h) = \frac{h^2}{l} - \frac{1}{3} \frac{h^3}{l^2}; \quad l \approx \frac{1}{2} (l_1 + l_2)$$

и

$$K'(h) = 2 \frac{h}{l} - \left(\frac{h}{l}\right)^2.$$

Выражение силы через относительные параметры короткого замыкания. Если ввести широко распространенные формулы для относительных параметров трансформатора:

1) относительной реактивности короткого замыкания

$$x_k = x_{*k} = U_{*p} = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{1N} \omega_1 l_w \delta''}{\Phi_N l}, \quad (32)$$

где

$$\delta'' = \delta' \cdot k_R; \quad l_w = \pi D_{cp} = \frac{1}{2} \pi (D_1 + D_2);$$

2) относительного активного сопротивления короткого замыкания

$$r_k = U_{*a} = \frac{I_{1N} r_{k(ом)}}{U_{1N}}; \quad (32a)$$

3) полного сопротивления короткого замыкания

$$z_{*k} = U_{*k}, \quad (32б)$$

то по (5) и (31) получим при смещении $h = 0$ пик тока

$$I_{1n} = \sqrt{2} I_{1N} \cdot \frac{k_A}{z_{*k}} = \sqrt{2} I_{1N} \frac{k_A}{U_{*k}}. \quad (32в)$$

Относительная величина поперечной реактивности по (16), (25), (28), (30) будет:

$$x_q = x_{q(ом)} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = \mu_0 \omega_1^2 \frac{\pi D_{cp}}{l_q} \cdot K(h) \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}}, \quad (33)$$

при $U_{1N} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Phi_N \cdot \omega_1$

$$x_q = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{1N} \omega_1 \pi D_{cp} K(h)}{\Phi_N l_q}. \quad (34)$$

Сравнивая с относительной величиной x_k по формуле (32), видим, что

$$x_q = x_k \cdot \varphi(h); \quad \varphi(h) = K(h) \frac{l}{l_q \delta''}. \quad (35)$$

Значения $K(h)$ и $K'(h)$ согласно формулам (16) и (30) сведены в таблице.

Случай асимметрии, рисунки	$K(h)$	$K'(h)$	Примечание
2	$\frac{h^2}{l} - \frac{1}{3} \frac{h^3}{l^2}$	$\frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2}$	Максимум осевой силы
3,а	$\frac{1}{3} \frac{h^2}{l_1}$	$\frac{2}{3} \frac{h}{l_1}$	
3,б	$\frac{1}{12} \frac{h^2}{l_1}$	$\frac{1}{6} \frac{h}{l_1}$	Минимум осевой силы
3,в	$\frac{1}{3} \frac{h^2}{l_1}$	$\frac{2}{3} \frac{h}{l_1}$	При малых значениях $l_1 - l_2 = h$
3,г	$\frac{h^2}{l} - \frac{1}{3} \frac{h^3}{l^2}$	$\frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2}$	При малом раз- личии l_1 и $l_2; l = \frac{1}{2}(l_1 + l_2)$

Пик тока при смещении обмоток ($h \neq 0$)

$$I_{1n} = I_{1n(h=0)} \sqrt{\frac{x_k^2 + r_k^2}{(x_k + x_q)^2 + r_k^2}} = \sqrt{2} I_{1n} \cdot \frac{k_A}{U'_k}, \quad (36)$$

где

$$U'_k = U_k \sqrt{\frac{(x_k + x_q)^2 + r_k^2}{x_k^2 + r_k^2}}. \quad (36a)$$

Подставляя это выражение в формулу (17), получим:

$$F_h = \frac{I_{1n}^2}{2\omega} \frac{\partial x_q}{\partial h} = \frac{1}{\omega} \left(\frac{I_{1n}^2}{\sqrt{2} I_{1n}} \right)^2 \frac{m I_{1n} U_{1n}}{m} x_k \varphi'(h), \quad (37)$$

где m — число фаз и x_k — в долях единицы.

$$\varphi'(h) = \frac{\partial \varphi(h)}{\partial h} = \frac{\partial K(h)}{\partial h} \frac{l}{l_q \delta''}. \quad (38)$$

Значения $\frac{\partial K(h)}{\partial h}$ даны в таблице. Подставляя $\frac{I_{1n}}{\sqrt{2} I_{1n}}$ по (32в), получим, например, для самого неблагоприятного случая асимметрии (рис. 2):

$$F_h = \frac{10,2}{2\pi f} \left(\frac{k_A}{U'_k} \right)^2 \frac{P_N}{m} U_p \left(\frac{2h - \frac{h^2}{l}}{l_q \delta'} \right)^{**} [\kappa \Gamma], \quad (39)$$

где $\frac{P_N}{m}$ — мощность на фазу, *вт*.

Аксиальные силы сжатия при симметричном расположении обмоток. При симметричном расположении обмоток или при небольшой асимметрии аксиальные силы от тока в обмотке 1 стремятся растянуть обмотку 2, а аксиальные силы собственного тока обмотки 2 стремятся сжать ее. Поскольку н. с. обеих обмоток одинаковы, эти силы компенсируют друг друга, и остаются лишь аксиальные силы сжатия от соб-

ственных потоков рассеяния обмоток 1 и 2. Сила сжатия на обе обмотки равна:

$$F_l = \frac{\partial A}{\partial l} = \frac{1}{2\omega} I_{1n}^2 \frac{\partial x_k}{\partial l} = - \frac{1}{2\omega} I_{1n}^2 \frac{x_k(ом)}{l} [\partial \mathcal{H}/\text{см}] \quad (40)$$

или

$$F_l = \frac{10,2}{2\omega} I_{1n}^2 \frac{x_k(ом)}{l} [\kappa \Gamma]. \quad (40a)$$

На каждую обмотку, следовательно, будет:

$$F'_l = \frac{1}{2} F_l. \quad (40б)$$

Односторонняя сила будет равна:

$$F''_l = \frac{1}{2} F'_l = \frac{1}{4} F_l. \quad (40в)$$

Подставляя в (40а) вместо x_k в омах величину x_{**} в долях единицы, получим в соответствии с (32) и (36):

$$F_l = \frac{10,2}{2\pi f} \left(\frac{k_A}{U'_k} \right)^2 \frac{P_N}{m} \frac{U_p}{l} [\kappa \Gamma]. \quad (41)$$

Среднее сжимающее напряжение

$$\sigma'_l = \frac{F'_l}{S} = \frac{F_l}{4S},$$

где S — поверхность изоляционных прокладок.

Максимальное значение сжимающего напряжения на одну обмотку получится в ее центре; оно примерно равно удвоенному среднему значению

$$\sigma_{l \max} = 2\sigma'_l = F_l \cdot \frac{1}{2S}. \quad (42)$$

При рассмотрении распределения напряжений принимаем, что силы отдельных витков суммируются.

Радиальные силы. Вопрос о радиальных силах подробно исследован. Здесь мы приведем более точный метод их расчета.

Силы на внешнюю обмотку действуют в радиальном направлении, т. е. стремятся увеличить ее диаметр и разорвать катушку в поперечном сечении. Внутренняя обмотка (средний диаметр D_1) испытывает приблизительно равные радиальные сжимающие силы. Общая радиальная сила на внешнюю обмотку определится как частная производная от запаса электрокинетической энергии по среднему диаметру внешней обмотки D_2^{***}

$$F_R = \frac{\partial A}{\partial D_2} = \frac{1}{2\omega} I_{1n}^2 \frac{\partial x_k(ом)}{\partial D_2} [\partial \mathcal{H}/\text{см}] \quad (43)$$

или

$$F_R = \frac{10,2}{2\omega} I_{1n}^2 \frac{\partial x_k(ом)}{\partial D_2} [\kappa \Gamma]. \quad (44)$$

Суммарная разрывающая сила в сечении обмотки равна:

$$F_Q = \frac{1}{2\pi} F_R \quad (45)$$

*** Обычно производная берется по приведенному зазору δ' , что неправильно.

** Формула (39) была проверена на опыте [Л. 4].

и среднее по сечению растягивающее напряжение внешней обмотки равно F_Q , деленной на общее поперечное сечение меди обмотки:

$$\sigma_{Rcp} = \frac{F_Q}{Q_{Cu}} = \frac{F_R}{2\pi Q_{Cu}} \quad (46)$$

где $Q_{Cu} = \omega q_{Cu2}$;

ω_2 — число витков;

q_{Cu2} — сечение меди витка.

При определении частной производной $\frac{\partial x_k}{\partial D_2}$ необходимо учитывать как изменение D_2 , так и изменение приведенного зазора δ' . Выразим δ' через D_2 и D_1 :

$$\delta' = \frac{1}{3}(b_1 + b_2) + \frac{1}{2}(D_2 - D_1) - \frac{1}{2}(b_1 + b_2). \quad (47)$$

Подставляя в (43) или (44) вместо x_k величину x_{*k} по (32), получим:

$$F_R = \frac{10,2}{2\pi f} \left(\frac{I_{1n}}{\sqrt{2} I_{1n}} \right)^2 \cdot \frac{P_N}{m} \frac{\partial x_k}{\partial D_2} [\kappa\Gamma], \quad (48)$$

где

$$\frac{I_{1n}}{\sqrt{2} I_{1n}} = \frac{k_A}{U'_k} \text{ по (32в).}$$

При осевых смещениях $U'_k > U_k$ и рассчитывается по (36а). Беря частную производную от x_k по D_2 , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_k}{\partial D_2} &= \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{1n} \omega_1 k_R}{\Phi_N l} \cdot \frac{\partial}{\partial D_2} \left[\frac{\pi(D_1 + D_2)}{2} \delta' \right] = \\ &= x_k \left[\frac{0,5}{\delta'} + \frac{1}{D_1 + D_2} \right]. \end{aligned} \quad (49)$$

Подставляя (49) в (48), получим:

$$F_R = \frac{10,2}{2\pi f} \frac{P_N}{m} \left(\frac{k_A}{U'_k} \right)^2 U_p \left(\frac{0,5}{\delta'} + \frac{1}{D_1 + D_2} \right) [\kappa\Gamma] \quad (50)$$

(в мощных трансформаторах $U_p \approx U_k$ при смещениях $h=0$).

Сила, вычисленная по формуле (50), и напряжение на разрыв, вычисленное по (46), представляют собой среднее значение по сечению обмоток. Максимальное значение напряжения приходится на внешние слои обмотки и равно приблизительно удвоенному среднему значению (при рассмотрении распределения напряжений по сечению принимаем, что радиальные силы отдельных витков суммируются), т. е. в соответствии с (45) и (46):

$$\sigma_{Rmax} \approx 2\sigma_{Rcp} = \frac{1}{\pi} \frac{F_R}{\omega_2 q_{Cu2}} [\kappa\Gamma/\text{см}^2]. \quad (51)$$

Сравнение с обычно применяемыми формулами [Л. 1, 2 и др.] показывает, что средняя радиальная сила получается меньше, а максимальное напряжение больше. Причина заключается в том, что частная производная обычно берется по δ' , тогда как она должна быть взята по D_2 , и что не учитывается распределение сил по сечению.

**** Максимальное значение σ_{Rmax} см. ниже.

Уточнение расчета механических сил требует постановки такого эксперимента на моделях или опытных трансформаторах, при котором измерились бы не только средние силы, но и распределение механических напряжений по обмотке. Расчетные напряжения являются условными, так как не учитывают деформации обмотки. Кроме того, при расчете обычно принимается максимальный пик тока с учетом быстро затухающей асимметричной составляющей при замыкании на зажимах и сети бесконечной мощности.

Действительный ток и соответствующие напряжения должны быть значительно меньше.

Пример. Трансформатор $P_N = 3200 \text{ кВа}$, $m = 3$, $U_k = 0,07$, $U_a = 0,118$, $\delta' = 5,03 \text{ см}$, $Q_{Cu} = 72,5 \text{ см}^2$, $l = 58,7 \text{ см}$,

$S = 100 \text{ см}^2$, $\delta'' = \delta' \cdot k_R = 4,8 \text{ см}$, $k_A = 1 + e^{-\frac{U_a}{U_p}} = 1,6$, $D_1 = 43,3 \text{ см}$, $D_2 = 55,7 \text{ см}$.

Полная радиальная сила на внешнюю обмотку по уравнению (50) при $U_p \approx U_k$

$$\begin{aligned} F_R &= \frac{10,2}{314} \cdot \frac{3200 \cdot 10^3}{3} \cdot \frac{1,6^2}{0,07} \times \\ &\times \left(\frac{0,5}{5,03} + \frac{1}{55,7 + 43,3} \right) \approx 125000 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Среднее напряжение в сечении обмотки

$$\sigma_{cp} = \frac{125000}{2\pi \cdot 72,5} = 276 \text{ кг/см}^2.$$

Максимальное напряжение $\sigma_{max} \approx 2\sigma_{cp} = 552 \text{ кг/см}^2$. Средняя осевая сила при отсутствии смещения обмотки по (40 в) (41) и (50)

$$F'_l = F_R \cdot \frac{\delta'}{2l} = 125000 \cdot \frac{5,03}{2 \cdot 58,7} = 5360 \text{ кг}.$$

Среднее сжимающее напряжение

$$\sigma'_l = \frac{5360}{100} = 53,6 \text{ кг/см}^2.$$

Максимальное сжимающее напряжение в центре обмотки при отсутствии смещения $\sigma_l = 2\sigma'_l = 107,2 \text{ кг/см}^2$. Дополнительная осевая сила при смещении обмотк h [см] по (39), (40в) и (41) при $h=1 \text{ см}$ и в самом неблагоприятном случае двустороннего сдвига

$$F_h = 4F'_l \cdot \frac{2hl - h^2}{l_q \delta''} = 21400 \cdot \frac{2 \cdot 58,7 - 1}{24,8 \cdot 4,8} = 21000 \text{ кг};$$

$$\begin{aligned} l_q &\approx \frac{l}{\pi} + \frac{1}{2}(D_2 - D_1) = \frac{58,7}{\pi} + \\ &+ \frac{1}{2}(55,7 - 43,3) = 24,8 \text{ см}. \end{aligned}$$

Суммарное сжимающее напряжение при такой асимметрии было бы равно:

$$\sigma_l + \sigma_h = \frac{2F'_l + F_h}{S} = 107,2 + 210 = 317,2 \text{ кг/см}^2,$$

т. е. было бы абсолютно недопустимым.

Соответствующие значения по общепринятой методике равны:

$$F_R = 250000 \text{ кг} \quad F_l = 10720 \text{ кг}, \quad \sigma_{cp} = 552 \text{ кг/см}^2.$$

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины, спец. часть. Госэнергоиздат, 1949.
2. Н. И. Булгаков. Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1950.
3. Рихтер. Электрические машины. Ч. III. ОНТИ, 1935.
4. W. Кнааск. Аксиальные силы в смещенных обмотках трансформаторов. ETZ-A, т. 76, № 6, 1955.

[21.12. 1956]



Электромеханические переходные процессы в синхронных машинах

Кандидат техн. наук А. А. ЯНКО-ТРИНИЦКИЙ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Уравнения переходных процессов. При изменении режимов работы синхронных двигателей возникают переходные электромагнитные и механические процессы. Если эти процессы существенно влияют друг на друга и не могут быть рассчитаны независимо один от другого, то ниже такие процессы называются электромеханическими.

Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханические переходные процессы, всегда нелинейны, так как они содержат произведения искомых величин. Так в уравнения напряжений входят генераторные э. д. с., представляющие собой произведения искомых магнитных потоков и искомой скорости вращения, а уравнение моментов содержит электромагнитный момент, в который входят произведения искомых токов и магнитных потоков.

Для нелинейных дифференциальных уравнений не найдены пути интегрирования в общем виде, численные же методы громоздки. В статье показано, как применить к исследованию нелинейных уравнений переходных процессов в синхронной машине методы качественной теории дифференциальных уравнений.

Для пояснения метода сначала рассматривается простой случай — синхронная машина без демпферных клеток, соединенная линией передачи с шинами мощной системы. Принимаются ограничения, лежащие в основе уравнений Парка и Горева [Л. 1] и следующее допущение:

$$\psi_d = U \cos \theta; \psi_q = U \sin \theta, \quad (1)$$

где ψ_d и ψ_q — потокосцепления обмотки статора по осям d и q ;

U — напряжение на шинах мощной системы;

θ — рабочий угол машины.

Это допущение строго справедливо, когда активное сопротивление цепи статора, включая линию передачи, равно нулю и когда в ней не происходит коммутаций, но оно может применяться приближенно и при наличии коммутаций, если пренебречь дополнительным вращающим моментом, вызванным неравными потоками в цепи статора.

Предполагается, что активное сопротивление цепи возбуждения, все реактивные сопротивления, приложенные напряжения и механический момент могут внезапно измениться, чем и вызывается переходный процесс, но во время переходного процесса эти величины сохраняют свои значения. Примерами подобных процессов могут служить внезапное увеличение нагрузки синхронного двигателя и некоторые аварийные процессы в электрических системах.

Естественно, что значения величин, описывающих переходный процесс в машине, не соответствуют этим величинам в новом установившемся режиме, а несколько отклоняются от них. Эти

отклонения ниже именуются возмущениями. Необходимо определить область начальных возмущений, при которых можно гарантировать динамическую устойчивость, а также дать простой приближенный путь расчета переходного процесса.

При указанных выше условиях уравнения электромеханического переходного процесса имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= s; \quad \frac{ds}{dt} = \frac{1}{H} [M - m(\theta, i_f)]; \\ \frac{di_f}{dt} &= \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \frac{U}{x_{ad}} s \sin \theta + \\ &+ \frac{1}{x'_f} (U_f - r_f i_f), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$m(\theta, i_f) = \frac{U x_{ad} i_f}{x_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\theta; \quad (3)$$

U_f, i_f, r_f и x'_f — напряжение, ток, активное и переходное реактивное сопротивление цепи возбуждения;

x_d, x_q, x'_d и x_{ad} — синхронные реактивные сопротивления по осям d и q , переходное реактивное сопротивление по оси d и сопротивление реакции статора по оси d ;

M, m — внешний и электромагнитный моменты машины;

H — момент инерции синхронной машины и сочлененных с нею механизмов;

s — скольжение.

Уравнения нового установившегося режима или так называемого невозмущенного движения могут быть записаны следующим образом:

$$\theta = \theta_0 = \text{const}; \quad s = 0; \quad i_f = I_{f0} = \frac{U_f}{r_f} = \text{const};$$

$$M = m(\theta_0, I_{f0}) \quad (4)$$

и, следовательно, уравнения возмущенного движения принимают такой вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\Delta\theta)}{dt} &= s, \quad \frac{ds}{dt} = \frac{1}{H} [m(\theta_0, I_{f0}) - \\ &- m(\theta_0 + \Delta\theta; I_{f0} + \Delta i_f)]; \\ \frac{d(\Delta i_f)}{dt} &= \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \frac{U}{x_{ad}} s \sin(\theta_0 + \Delta\theta) - \frac{r_f}{x'_f} \Delta i_f, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0;$$

$$\Delta i_f = i_f - I_{f0}.$$

Для уменьшения числа независимых параметров можно ввести следующие подстановки:

$$\left. \begin{aligned} M_{ma} &= \frac{U x_{ad} I_{f0}}{x_d}, \quad M_{mp} = \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q}; \\ \Omega_0 &= \sqrt{\frac{M_{ma}}{H}}; \\ \xi &= \frac{M_{mp}}{M_{ma}}; \quad M_1 = \frac{M}{M_{ma}}, \quad \eta^2 = \frac{(x_d - x'_d) U}{x'_d x_{ad} I_{f0}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{i_f}{\eta I_{f0}}; \quad t_1 = \Omega_0 t \\ s_1 &= \frac{s}{\Omega_0}; \quad \alpha_1 = \frac{r_f}{x_f \Omega_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В дальнейшем индекс 1 опускается и после преобразований уравнения (5) и (3) получают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\Delta\theta)}{dt} &= s; \quad \frac{ds}{dt} = m(\theta_0, I_0) - m(\theta_0 + \Delta\theta; I_0 + \Delta i); \\ \frac{d(\Delta i)}{dt} &= \eta s \sin(\theta_0 + \Delta\theta) - \alpha \cdot (\Delta i); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$m(\theta, i) = \eta i \sin \theta + \xi \sin 2\theta, \quad (9)$$

где

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta; \quad i = I_0 + \Delta i; \quad I_0 = \frac{1}{\eta}.$$

Эти уравнения можно трактовать как уравнения переходного процесса, выраженные в специальных единицах, связанных с относительными единицами при помощи уравнений (7).

При рассмотрении генераторных режимов должны быть изменены знаки у θ , s , M и m . Поскольку приведенные выше уравнения при этом не изменяются, то они в равной степени соответствуют как двигательным, так и генераторным режимам, хотя предлагаемые методы и рассчитаны главным образом на двигательные режимы.

Функция Ляпунова и ее применение. Суждение о динамической устойчивости машины может быть получено на основании анализа уравнений (8). Для проведения такого анализа вводится функция Ляпунова

$$V = A + K + W, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \int_0^{\Delta\theta} [m(\theta_0 + \Delta\theta, I_0) - m(\theta_0, I)] d(\Delta\theta); \\ K &= \frac{s^2}{2}; \quad W = \frac{(\Delta i)^2}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

и ее производная

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha \cdot (\Delta i)^2. \quad (12)$$

Поверхности $V = \text{const}$ в пространстве $\Delta\theta$, s , Δi могут быть найдены путем вращения их следов в плоскости $\Delta\theta$, Δi вокруг оси $\Delta\theta$ (рис. 1). Поверхность $V = \text{const}$ становится поверхностью вращения лишь при применении специальных

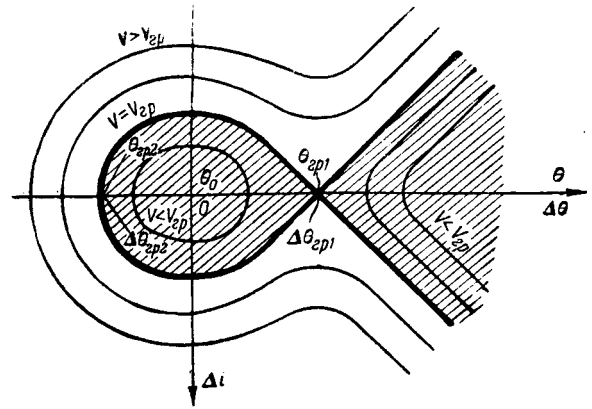


Рис. 1. Следы поверхностей $V = \text{const}$ в плоскости $\Delta\theta$, Δi при $M < M_{\text{макс.ст.}}$.

единиц, что является одним из преимуществ этих единиц.

Функция V определенно положительна во всем пространстве, за исключением деформированной конусообразной части, правее $(\Delta\theta)_{2p1}$, где она может быть меньше, чем нуль. Производная этой функции по времени знакоотрицательна и обращается в нуль на плоскости $\Delta i = 0$, однако легко проверить, что на этой плоскости нет траекторий системы уравнений (8), за исключением особых точек: фокуса $(0, 0, 0)$ и седла $[(\Delta\theta)_{2p1}, 0, 0]$.

На основании теории устойчивости движения [Л. 2 и 3] и несложных подсчетов можно сделать следующие выводы:

1. Если начальная точка в пространстве $\Delta\theta$, s , Δi , лежит внутри замкнутой части поверхности $V = V_{2p}$ (рис. 1) или на ней, но не в точке $(\Delta\theta)_{2p1}$, т. е. если

$$V_{\text{нач}} \leq V_{2p} \text{ и } (\Delta\theta)_{2p1} \leq (\Delta\theta)_{\text{нач}} < (\Delta\theta)_{2p1}, \quad (13)$$

то движение асимптотически устойчиво, т. е. через некоторый промежуток времени система придет к установившемуся режиму, характеризующемуся уравнениями

$$\Delta\theta = 0; \quad s = 0; \quad \Delta i = 0.$$

2. Если начальная точка лежит внутри конусообразной части поверхности $V = V_{2p}$, правее $(\Delta\theta)_{2p1}$, т. е. если

$$V_{\text{нач}} \leq V_{2p}, \quad (\Delta\theta)_{\text{нач}} > (\Delta\theta)_{2p1}, \quad (14)$$

то движение неустойчиво, т. е. система не приходит к установившемуся режиму.

3. Если начальная точка лежит в области $V > V_{2p}$, то движение может быть либо устойчивым, либо неустойчивым и для выяснения его характера требуется дополнительный анализ. Таким образом, условия (13) и (14) являются достаточными, но не являются необходимыми.

4. Если выполнены условия (13), то изображающая точка не выйдет за пределы замкнутой поверхности $V = V_{\text{нач}}$, т. е.

$$(\Delta\theta)_{n2} < \Delta\theta < (\Delta\theta)_{n1}; \quad \frac{s^2}{2} < V_{\text{нач}}, \quad \frac{(\Delta i)^2}{2} < V_{\text{нач}},$$

где $(\Delta\theta)_{\kappa 2}$ и $(\Delta\theta)_{\kappa 1}$ — углы, при которых поверхность $V=V_{нач}$ пересекает ось $\Delta\theta$.

5. Чтобы изображающая точка не вышла за границы заданной области M , лежащей внутри замкнутой части поверхности $V=V_{зр}$, достаточно найти минимальное значение $V_{мин}$ на границе области M , построить поверхность $V=V_{мин}$ и потребовать, чтобы начальные возмущения не выходили за эту поверхность.

6. Скорость убывания функции V , а следовательно, и скорость затухания процесса внутри замкнутой части поверхности $V=V_{зр}$ тем больше, чем больше величина $\alpha(\Delta i)^2$.

7. Если при условии $(\Delta i)_{нач}=0$ анализ, проведенный по методу площадей с использованием статической характеристики, показывает устойчивость системы, то это гарантирует асимптотическую устойчивость системы при отсутствии регулирования (с учетом переходных токов в роторе).

8. Область начальных возмущений (13), при которых имеется асимптотическая устойчивость, значительна, но недостаточно с точки зрения практики. Например, если двигатель с гладким ротором, работавший вхолостую, принимает внезапно нагрузку и эта нагрузка длительно удерживается, то согласно условиям (13) устойчивость гарантируется лишь при нагрузках, не превышающих 0,725 от максимума статической характеристики [Л. 4]. Практика работы и результаты исследований [Л. 5, 6 и 7] дают основания полагать, что при увеличении нагрузки почти до максимума статической характеристики система будет оставаться устойчивой.

9. Анализ динамической устойчивости, производимый методом последовательных интервалов, можно прекращать, когда траектория изображающей точки доходит до поверхности $V=V_{зр}$, так как дальше об устойчивости можно судить в соответствии с пп. 1 и 2.

10. Если одновременно с увеличением нагрузки форсируется напряжение цепи возбуждения, то рассматриваемый метод может охватить большую часть области устойчивости, чем указано в п. 8, так как при определении устойчивости можно оперировать новым напряжением возбуждения, хотя ток возбуждения примет новое значение лишь через некоторое время. При этом, однако, начальное возмущение тока возбуждения не равно нулю.

Функция потока. Нулевое приближение. Для углубления анализа электромеханического процесса, описываемого системой уравнений (8), вводится функция потока, линейно связанная с потокосцеплениями цепи возбуждения:

$$\Psi = \Delta i + \eta \cos \theta; \quad (15)$$

ее полная производная по времени в силу уравнений (8) равна:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\alpha \cdot (\Delta i). \quad (16)$$

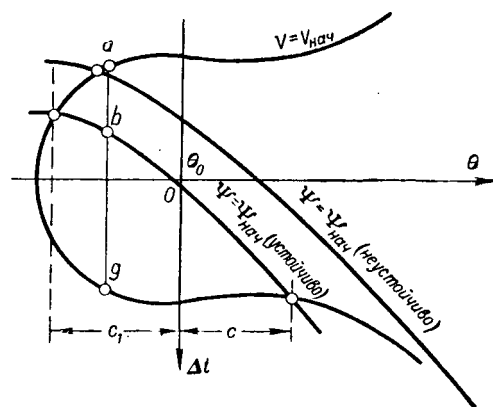


Рис. 2. Следы траекторий в плоскости $\Delta\theta$, Δi при $\alpha=0$.

Решение системы уравнений (8) в нулевом приближении находится из условия постоянства потокосцеплений цепи возбуждения:

$$\Psi = \Psi_{нач} = \text{const}; \quad \alpha=0. \quad (17)$$

При этом из равенства (12) следует, что

$$V = V_{нач} = \text{const} \quad (18)$$

и траектория движения изображающей точки в пространстве $\Delta\theta$, s , Δi находится как пересечение поверхностей (17) и (18). При этом может возникнуть либо устойчивое периодическое движение — следы поверхностей (17) и (18) пересекаются, либо неустойчивое аperiodическое движение — следы этих поверхностей не пересекаются (рис. 2).

Координаты $\Delta\theta$ и Δi непосредственно определяются из рис. 2, а s — по формуле

$$s = \sqrt{ab \cdot bg}. \quad (19)$$

Таким образом, для периодических замкнутых траекторий, устойчивых в нулевом приближении, определяются наибольшие значения $\Delta\theta$, s и Δi , причем для всех точек траектории можно произвести контрольный подсчет в соответствии с уравнениями (10), (11) и (15)...(18).

Пренебрегая высшими гармониками в кривой $\Delta\theta(t)$, можно вычислить период качаний по формуле

$$T \approx \frac{\pi [(\Delta\theta)_{\max} - (\Delta\theta)_{\min}]}{s_{\max}}. \quad (20)$$

Расчет периодического движения в нулевом приближении. В нулевом приближении, т. е. при $\alpha=0$, из (17), (15) и (9) следует:

$$\begin{aligned} m &= (1 + \eta \Psi_{нач}) \sin \theta - \left(\frac{\eta^2}{2} - \xi \right) \sin 2\theta = \\ &= C_1 \sin \theta - C_2 \sin 2\theta, \end{aligned} \quad (21)$$

после чего система уравнений (8) упрощается и принимает следующий вид:

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = s; \quad \frac{ds}{dt} = C_1 (\sin \theta_0 - \sin \theta) -$$

$$- C_2 (\sin 2\theta_0 - \sin 2\theta) \approx \sum_{k=1}^n a_k \cdot (\Delta\theta)^k, \quad (22)$$

где θ_0 находится по уравнениям (21) при $m=M$.

Для системы уравнений (22) по методу Ляпунова [Л. 2] вычисляются период и изменение $\Delta\theta$ и s во времени в виде рядов от $(\Delta\theta)_{\max} = c$ (рис. 2). Период и угловая частота имеют вид:

$$T = T_0(1 + h_2c^2 + h_3c^3 + h_4c^4 + \dots);$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{-a_1}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (23)$$

Если отсчитывать время с момента наибольшего положительного значения угла $\Delta\theta$, равного c , то

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 \approx f_0 + \sum_{k=1}^n f_k \cos k\omega t; \quad (24)$$

$$s = \frac{d(\Delta\theta)}{dt} \approx -\omega \sum_{k=1}^n k f_k \sin k\omega t. \quad (25)$$

Коэффициенты, входящие в уравнения (23)... (25), определяются с точностью до c^4 следующим образом:

$$b_k = \frac{a_k}{-a_1}; \quad h_2 = \frac{5}{12} b_2^2 + \frac{3}{8} b_3;$$

$$h_3 = -\left(\frac{5}{18} b_2^3 + \frac{1}{4} b_2 b_3\right);$$

$$h_4 = \frac{385}{576} b_2^4 + \frac{275}{192} b_2^2 b_3 + \frac{57}{256} b_3^2 +$$

$$+ \frac{7}{8} b_2 b_4 + \frac{5}{16} b_5;$$

$$f_0 = \frac{1}{2} b_2 c^2 - \frac{1}{3} b_2^2 c^3 +$$

$$+ \left(\frac{25}{48} b_2^3 + \frac{21}{32} b_2 b_3 + \frac{3}{8} b_4\right) c^4;$$

$$f_1 = c - \frac{1}{3} b_2 c^2 + \left(\frac{29}{144} b_2^2 + \frac{1}{32} b_3\right) c^3 -$$

$$- \left(\frac{119}{432} b_2^3 + \frac{35}{96} b_2 b_3 + \frac{1}{5} b_4\right) c^4;$$

$$f_2 = -\frac{1}{6} b_2 c^2 + \frac{1}{9} b_2^2 c^3 -$$

$$- \left(\frac{2}{9} b_2^3 + \frac{1}{3} b_2 b_3 + \frac{1}{6} b_4\right) c^4;$$

$$f_3 = \left(\frac{1}{48} b_2^2 - \frac{1}{32} b_3\right) c^3 -$$

$$- \left(\frac{1}{48} b_2^3 - \frac{1}{32} b_2 b_3\right) c^4;$$

$$f_4 = -\left(\frac{1}{432} b_2^3 - \frac{1}{96} b_2 b_3 + \frac{1}{120} b_4\right) c^4.$$

В большинстве случаев удается ограничиться меньшим количеством членов, чем в уравнениях (23)... (25), но при приближении к границе устойчивости, легко определяющейся по правилу площадей по динамической характеристике (21), период становится значительно большим, чем T_0 , и приведенные ряды сходятся медленно.

При $\alpha = 0$, т. е. в нулевом приближении, при помощи уравнений (15) и (17) можно найти Δi ,

а следовательно, и Δi_f как функции угла, и зная, что

$$\Delta\psi_d = x_d \cdot (\Delta i_d) + x_{ad} \cdot (\Delta i_f);$$

$$\Delta\psi_q = x_q \cdot (\Delta i_q),$$

используя допущения (1), получить также приращения токов статора по осям d и q , т. е. Δi_d и Δi_q как функции времени.

Первое приближение. За основу берется нулевое приближение, а затем в предположении, что период мало изменится от наличия затухания, определяется первое приближение — поправки к функциям V и Ψ . Приращения этих функций за период согласно (12) и (16) равны:

$$(\Delta V)_T \approx -\alpha \int_0^T (\Delta i)^2 dt = -\alpha [(\Delta i)^2]_{cp} T;$$

$$(\Delta \Psi)_T \approx -\alpha \int_0^T (\Delta i) dt = -\alpha (\Delta i)_{cp} T.$$

Эти приращения можно вычислить также графически, для чего им удобно придать следующий вид:

$$(\Delta V)_T \approx -2\alpha \int_{\theta_{нач}}^{\theta_{T/2}} \frac{(\Delta i)^2}{s} d\theta;$$

$$(\Delta \Psi)_T \approx -2\alpha \int_{\theta_{нач}}^{\theta_{T/2}} \frac{\Delta i}{s} d\theta.$$

Приближенное определение приращений производится без учета высших гармоник в кривой тока. Тогда

$$(\Delta i)_{cp} \approx \frac{1}{2} [(\Delta i)_{\max} + (\Delta i)_{\min}];$$

$$(\Delta i)_{ампл} \approx \frac{1}{2} [(\Delta i)_{\max} - (\Delta i)_{\min}];$$

$$[(\Delta i)^2]_{cp} \approx [(\Delta i)_{cp}]^2 + \frac{1}{2} [(\Delta i)_{ампл}]^2.$$

Зная приращения функций V и Ψ , легко определить значения, которые эти функции принимают через период колебаний

$$V_T = V_{нач} + (\Delta V)_T, \quad \Psi_T = \Psi_{нач} + (\Delta \Psi)_T.$$

Тем самым будет определена и новая траектория, на которую перейдет изображающая точка через один период. Точно так же производятся вычисления для второго и последующих периодов колебаний. Для повышения точности можно вычислять поправки за половину периода. При этом, если сначала изображающая точка находилась в крайнем левом положении, то через половину периода на новой траектории она будет находиться в крайнем правом положении (рис. 3). Через несколько полупериодов изображающая точка попадет либо в область заведомой устойчивости (13), либо в область заведомой неустой-

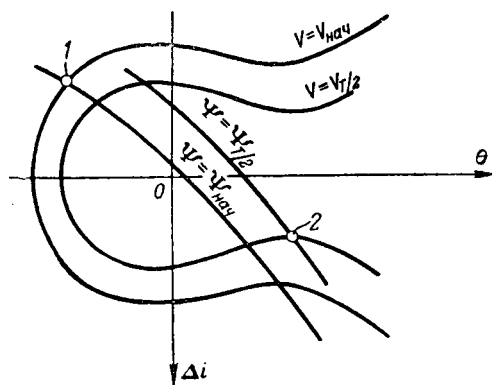


Рис. 3. Определение траекторий в нулевом и первом приближениях.

чивости (14). Этот путь позволяет решить задачу об устойчивости системы при $V_{нач} > V_{z.p}$ и приближенно определить траекторию движения.

Повторные возмущения. Выше предполагалось, что во время переходного процесса внешний момент, напряжения и сопротивления сохраняются постоянными до конца процесса. На практике часты случаи, когда через некоторое время после начала переходного процесса происходит повторное нарушение режима, сопровождающееся скачкообразным изменением указанных величин, после чего они остаются постоянными до конца переходного процесса.

Например, в приводе прокатного стана двигатель работает сначала почти вхолостую, далее в валки стана поступает слиток и нагрузочный момент резко возрастает, после прохода слитка момент вновь уменьшается. Аналогичные повторные возмущения встречаются и в электрических системах при аварийных нарушениях режима.

Для расчета устойчивости системы по предлагаемому методу необходимо, хотя бы приближенно, знать начальные условия после второго возмущения, т. е. необходимо найти значения $\Delta\theta$, s и Δi в конце первого переходного процесса. Это может быть сделано, как показано выше.

При кратковременном увеличении нагрузки, превышающем максимум статической характеристики, угол θ_0 не существует, и потому естественно оперировать углом θ , а не углом $\Delta\theta$.

При этом система уравнений (8) получает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= s; \\ \frac{ds}{dt} &= M - m(\theta, I_0 + \Delta i); \\ \frac{d(\Delta i)}{dt} &= \eta s \sin \theta - \alpha \cdot (\Delta i), \end{aligned} \right\}$$

а величину A в формуле (11) следует выражать в виде неопределенного интеграла:

$$A = \int [m(\theta, I_0) - M] d\theta.$$

Формулы (12), (15) и (16) при этом сохраняются.

Учет демпферных обмоток. Функция Ляпунова может быть обобщена и на случай машины с демпферными обмотками. Влияние демпферных обмоток учитывается следующим образом.

К правой части второго уравнения (8) прибавляется демпферный момент, выражающийся приближенно в виде [Л. 8]:

$$m_d = (a \cos^2 \theta + b \sin^2 \theta) s = \varphi(\theta) s.$$

Сохраняя функцию V в прежнем виде, легко найти, что

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha (\Delta i)^2 - \varphi(\theta) s^2.$$

Функция Ψ и ее производная по-прежнему определяются по уравнениям (15) и (16). Нулевое приближение находится из условий

$$\alpha = 0; \varphi(\theta) = 0.$$

Первое приближение находится так же, как это было указано выше, но при подсчете ΔV за половину периода в нем появляется слагаемое

$$-\int_{\theta_{нач}}^{\theta_{T/2}} \varphi(\theta) s d\theta,$$

определяющееся графически по рис. 3.

При учете демпферных обмоток (при том же изменении Ψ) функция V затухает более интенсивно, что указывает на положительное влияние демпферных обмоток на устойчивость машины в данном случае.

Пример. Увеличение нагрузки синхронного двигателя при одновременном форсировании возбуждения.

Рассматривается двигатель типа ВДС-213 34-12, имеющий следующие паспортные данные: $P_n = 1700$ кВт; $U_n = 6,3$ кВ; $\cos \varphi_n = 0,9$; $n_n = 500$ об/мин.

Параметры двигателя и привода в относительных единицах следующие:

$$x_d = 1,196; x_{ad} = 1,07; x_f = 1,315; x_q = 0,676;$$

$$k = \frac{x_{ad}^2}{x_d x_f} = 0,727;$$

$$\sigma = 1 - k = 0,273; \tau = \frac{\sigma}{k} = 0,375;$$

$$x'_d = \sigma x_d = 0,327; x'_f = \sigma x_f = 0,359;$$

$$a'_f = \frac{r_f}{x'_f} = 0,00770; H_{\partial\theta} = 700;$$

$$H = 1,5 H_{\partial\theta} = 1050.$$

В результате расчета номинального режима получено:

$$U = 1; I = 1; \theta = 25^\circ 10'; \varphi = -25^\circ 50';$$

$$E_d = 1,834; I_f = 1,715; M = 0,90.$$

При указанных значениях U и E_d уравнение статической характеристики в относительных единицах записывается следующим образом:

$$M_{cm} = 1,535 \sin \theta + 0,322 \sin 2\theta; M_{max.cm} = 1,66.$$

Момент двигателя в установившемся режиме составлял $0,4 M_n = 0,4 \cdot 0,9 = 0,36$, чему соответствует начальный угол $\theta_{нач} = 9,5^\circ$.

Увеличение нагрузки двигателя происходит до $M = 1,85$, т. е. $M > M_{\text{макс.ст.}}$. Одновременно повышается напряжение возбуждения на 50%, т. е.

$$E_{d0} = 1,5E_d = 2,751.$$

Переход к специальным единицам дает:

$$M_{\text{ма}} = \frac{UE_{d0}}{x_d} = 2,30; M_{\text{мп}} = 0,322;$$

$$\xi = \frac{M_{\text{мп}}}{M_{\text{ма}}} = 0,140;$$

$$M_1 = \frac{M}{M_{\text{ма}}} = 0,805; \Omega_0 = \sqrt{\frac{M_{\text{ма}}}{H}} = 0,0467;$$

$$\eta = \sqrt{\frac{U}{\epsilon E_{d0}}} = 0,984; \alpha = \frac{\alpha'_i}{\Omega_0} = 0,1645.$$

Новая статическая характеристика, выраженная в специальных единицах, записывается следующим образом:

$$M = \sin \theta + 0,140 \sin 2\theta.$$

Из этой характеристики следует, что $\theta_0 = 42^\circ$ и $\theta_{zp1} = 114,5^\circ$.

Согласно уравнению (11) находится:

$$A = M_1 \frac{\pi}{180} (\theta_0^\circ - \theta^\circ) + (\cos \theta_0 - \cos \theta) + \frac{1}{2} \xi (\cos 2\theta_0 - \cos 2\theta).$$

Из этой зависимости, изображенной на рис. 4, следует что $\theta_{zp1} = 114,5^\circ$; $\theta_{zp2} = 6,5^\circ$; $A_{\text{нач}} = 0,1545$; $A_{zp} = V_{zp} = 0,1925$.

Начальное значение функции Ляпунова определяется следующим образом:

$$K_{\text{нач}} = \frac{s_{\text{нач}}^2}{2} = 0;$$

$$I_0 = \frac{1}{\eta} = 1,018; i_{\text{нач}} = \frac{I_0}{1,5} = 0,678;$$

$$(\Delta i)_{\text{нач}} = i_{\text{нач}} - I_0 = -0,340;$$

$$W_{\text{нач}} = \frac{(\Delta i)_{\text{нач}}^2}{2} = 0,0578;$$

$$V_{\text{нач}} = A_{\text{нач}} + K_{\text{нач}} + W_{\text{нач}} = 0,2123.$$

Поскольку $V_{\text{нач}} > V_{zp}$, то гарантировать устойчивость системы по критерию (13) нельзя и необходимо произвести более подробный анализ электромеханического процесса.

Поверхности $V = V_{\text{нач}}$ и $\Psi = \Psi_{\text{нач}}$ заданы на рис. 4, своими следами в плоскости $\Delta\theta$ и Δi , найденными по уравнениям (10), (11) и (15). Пересечение этих поверхностей дает траекторию движения изображающей точки при $\alpha = 0$, причем $\theta_{\text{мин}} = \theta_{\text{нач}} = 9,5^\circ$; $\theta_{\text{макс}} = 80^\circ$. Наибольшее скольжение находится по формуле (19):

$$s_{\text{макс}} = 1 - 0,70 \cdot 0,60 = 0,649.$$

Оно имеет место при $\theta = 47^\circ$.

Приближенное значение периода качаний находится в соответствии с формулой (20)

$$T = \frac{\pi^2 (\theta_{\text{макс}} - \theta_{\text{мин}})}{180 \cdot s_{\text{макс}}} = 5,93,$$

что соответствует 0,406 сек.

Ток Δi меняется в пределах от $-0,340$ до $0,455$ и, следовательно, $(\Delta i)_{cp} \approx 0,0575$, $[(\Delta i)^2]_{cp} \approx 0,0824$.

Приращение функций V и Ψ за половину периода и их новые значения через полупериод будут:

$$(\Delta V)_{T/2} \approx -\alpha \frac{T}{2} [(\Delta i)^2]_{cp} = -0,0404;$$

$$(\Delta \Psi)_{T/2} \approx -\alpha \frac{T}{2} (\Delta i)_{cp} = -0,0282;$$

$$V_{T/2} = V_{\text{нач}} + (\Delta V)_{T/2} = 0,1719;$$

$$\Psi_{T/2} = \Psi_{\text{нач}} + (\Delta \Psi)_{T/2} = 0,6018.$$

Согласно уравнениям (10) и (11) след поверхности $V = V_{T/2}$ определяется по формуле

$$\Delta i = \pm \sqrt{2(V_{T/2} - A)}.$$

След поверхности $\Psi = \Psi_{T/2}$ находится путем поднятия всех точек следа поверхности $\Psi = \Psi_{\text{нач}}$ на величину $-(\Delta \Psi)_{T/2} = 0,028$ (рис. 4). Пересечение следов новых поверхностей при $t = T/2$ дает: $\theta = 77,5^\circ$; $s = 0$; $\Delta i = 0,380$.

Считая этот момент начальным, легко убедиться в асимптотической устойчивости системы в соответствии с критерием (13), записав его в виде:

$$V_{T/2} < V_{zp}; \theta_{zp2} < \theta_{T/2} < \theta_{zp1},$$

что и удовлетворяется в данном случае.

Расчет произведен без учета демпферных обмоток, но выше было указано, что они лишь повышают устойчивость.

Заключение. До сих пор единственным удовлетворительным методом расчета электромеханических переходных процессов являлся один из методов численного интегрирования уравнений — метод последовательных интервалов.

В целях сравнения предлагаемого в статье метода с методом последовательных интервалов автором произведены многочисленные расчеты различных переходных электромеханических процессов синхронных машин обоими указанными методами.

Расчеты показали, что во всех практических случаях можно ограничиться двумя приближениями: нулевым и первым. Можно отметить, что известный и широко применяемый метод расчета динамической устойчивости «при постоянстве э. д. с. за переходным реактансом» соответствует нулевому приближению предлагаемого метода.

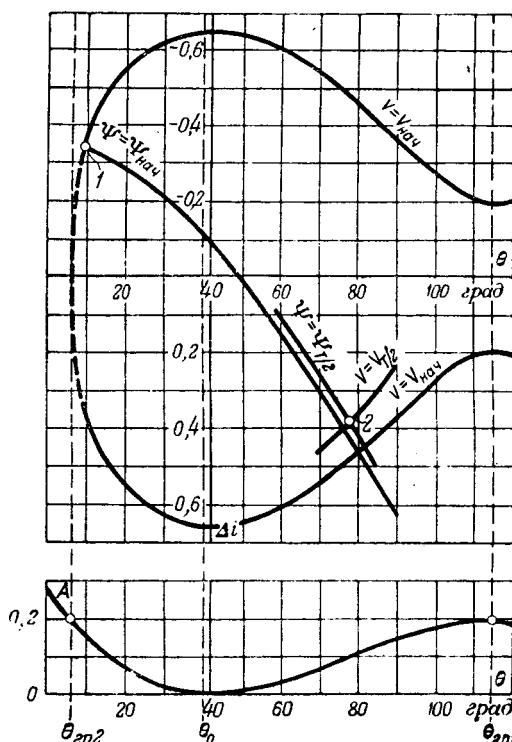


Рис. 4. Построение следа траектории.

Формулы преобразования активных многоузловых звезд в эквивалентные многоугольники

Кандидат техн. наук П. А. ЮНКИН

Московский энергетический институт

При расчете и исследовании разветвленных электрических цепей очень часто пользуются формулами преобразования многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник. Для получения этих формул достаточно из системы уравнений узловых потенциалов исключить потенциал общей узловой точки. Полученной в результате этого системе уравнений будет удовлетворять новая схема в виде эквивалентного многоугольника [Л. 1]. Точно так же сравнительно просто могут быть получены формулы для преобразования двухузловых, трехузловых и четырехузловых звезд в эквивалентные многоугольники. Применение таких формул во многих случаях значительно облегчает расчет и анализ разветвленных цепей с большим числом ветвей и узлов.

На рис. 1 изображена схема, которую будем в дальнейшем называть полной двухузловой звездой. Уравнения узловых потенциалов, определяющие электрическое состояние этой схемы, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_a Y_{aa} - \dot{\varphi}_b Y_{ab} - \dot{\varphi}_1 Y_{1a} - \dots - \dot{\varphi}_6 Y_{6a} &= \sum_a \dot{E} Y; \\ -\dot{\varphi}_a Y_{ab} + \dot{\varphi}_b Y_{bb} - \dot{\varphi}_1 Y_{1b} - \dots - \dot{\varphi}_6 Y_{6b} &= \sum_b \dot{E} Y; \\ -\dot{\varphi}_a Y_{1a} - \dot{\varphi}_b Y_{1b} + \dot{\varphi}_1 (Y_{1a} + Y_{1b}) &= -\dot{E}_{1a} Y_{1a} - \dot{E}_{1b} Y_{1b} + \dot{I}_1; \\ -\dot{\varphi}_a Y_{2a} - \dot{\varphi}_b Y_{2b} + \dot{\varphi}_2 (Y_{2a} + Y_{2b}) &= -\dot{E}_{2a} Y_{2a} - \dot{E}_{2b} Y_{2b} + \dot{I}_2, \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$Y_{aa} = Y_{ab} + Y_{1a} + \dots + Y_{6a};$$

$$Y_{bb} = Y_{ab} + Y_{1b} + \dots + Y_{6b};$$

$$\sum_a \dot{E} Y = \dot{E}_{1a} Y_{1a} + \dots + \dot{E}_{6a} Y_{6a} - \dot{E}_{ab} Y_{ab} \text{ и}$$

$$\sum_b \dot{E} Y = \dot{E}_{1b} Y_{1b} + \dots + \dot{E}_{6b} Y_{6b} + \dot{E}_{ab} Y_{ab}.$$

Для получения формул преобразования полной двухузловой звезды в эквивалентный многоугольник, выразим из первых двух уравнений (1) потенциалы $\dot{\varphi}_a$ и $\dot{\varphi}_b$ через потенциалы остальных

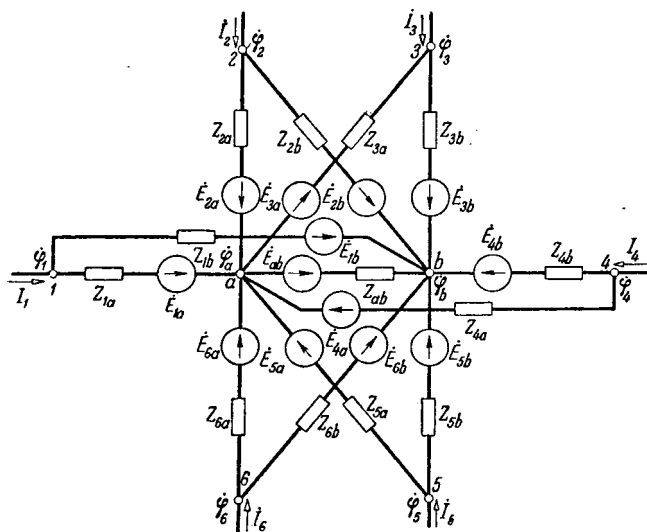


Рис. 1.

Предлагаемый метод дает достаточную для практики точность. Если при расчете пользоваться логарифмической линейкой, а также таблицами тригонометрических величин и квадратных корней, то ошибка в величине рабочего угла θ не превышает $1 \dots 2^\circ$ за один полный период качаний машины. Затрата времени при расчетах по предлагаемому методу существенно меньше, чем при расчетах по методу последовательных интервалов.

Дополнительным преимуществом рассматриваемого метода перед методом последовательных интервалов является возможность одновременного рассмотрения совокупности ряда режимов с различными начальными условиями. Так, например, можно сразу найти целую область начальных возмущений, при которых имеет место динамическая устойчивость или неустойчивость.

Литература

1. А. А. Горев. Переходные процессы синхронной машины. Госэнергоиздат, 1950.
2. А. М. Ляпунов. Общая задача об устойчивости движения. ОНТИ, 1935.
3. Е. А. Барбашин и Н. Н. Красовский. Об устойчивости движения в целом. Доклады АН СССР, т. 86, № 3, 1952.
4. Н. М. Крылов и Н. Н. Боголюбов. О колебаниях синхронных машин. ОНТВУ, 1932.
5. В. М. Матюхин. Динамическая устойчивость синхронных двигателей. ВЭП, № 7, 1939.
6. И. М. Постников. К вопросу о перегрузочной способности синхронного двигателя при толчкообразных нагрузках. Труды ЛИИ, № 2, 1939, раздел электротехники, вып. 1.
7. И. С. Рогачев. Динамическая устойчивость синхронных двигателей. Электричество, № 7, 1940.
8. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, 1948.

[5.1 . 1957]

узлов и подставим их значения, например, в третье уравнение. Для первого узла в результате преобразований получим:

Значения э. д. с. в других ветвях выражаются аналогичными формулами. Отметим, что эти формулы не определяют однозначно э. д. с. эквива-

$$\begin{aligned}
 & (\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2) \left(\frac{Y_{1a}Y_{2a}Y_{bb} + Y_{1b}Y_{2b}Y_{aa} + Y_{1a}Y_{2b}Y_{ab} + Y_{1b}Y_{2a}Y_{ab}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2} \right) + \dots + \\
 & + (\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_6) \left(\frac{Y_{1a}Y_{6a}Y_{bb} + Y_{1b}Y_{6b}Y_{aa} + Y_{1a}Y_{6b}Y_{ab} + Y_{1b}Y_{6a}Y_{ab}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2} \right) = \\
 & = \frac{(\dot{E}_{2a} - \dot{E}_{1a})Y_{1a}Y_{2a}Y_{bb} + \dots + (\dot{E}_{3a} - \dot{E}_{1a})Y_{1a}Y_{6a}Y_{bb}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2} + \\
 & + \frac{(\dot{E}_{2b} - \dot{E}_{1b})Y_{1b}Y_{2b}Y_{aa} + \dots + (\dot{E}_{3b} - \dot{E}_{1b})Y_{1b}Y_{6b}Y_{aa}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2} + \\
 & + \frac{(\dot{E}_{2a} + \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1b})Y_{1b}Y_{2a}Y_{ab} + \dots + (\dot{E}_{3a} + \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1b})Y_{1b}Y_{6a}Y_{ab}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2} + \\
 & + \frac{(\dot{E}_{2b} - \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1a})Y_{1a}Y_{2b}Y_{ab} + \dots + (\dot{E}_{6b} - \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1a})Y_{1a}Y_{6b}Y_{ab}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2} - I_1, \quad (2)
 \end{aligned}$$

Аналогичные уравнения можно получить для узлов 2 ... 6. Из уравнения (2) непосредственно следует, что шести уравнениям такого вида соответствует эквивалентная схема в виде шестиугольника (рис. 2). Проводимость ветви шестиугольника, соединяющей, например, точки 1 и 2, определяется следующей зависимостью:

$$Y_{12} = \frac{Y_{1a}Y_{2a}Y_{bb} + Y_{1b}Y_{2b}Y_{aa} + Y_{1a}Y_{2b}Y_{ab} + Y_{1b}Y_{2a}Y_{ab}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2}, \quad (3)$$

т. е. представляет собой сумму проводимостей четырех параллельно соединенных ветвей. Первое и второе слагаемые числителя — это произведения трех проводимостей: проводимостей ветвей звезды, по которым можно перейти по незамкнутому контуру из точки 1 в точку 2, проходя каждый раз только через один из узлов звезды (а или b), и суммарной проводимости ветвей, присоединенных к узлу, не затрагиваемому при таком переходе. Третье и четвертое слагаемые числителя — это произведения проводимостей ветвей, по которым можно перейти по незамкнутому контуру из точки 1 в точку 2, проходя через оба узла (а и b) двухузловой звезды. Знаменатель проводимости Y_{12} представляет собой определитель, составленный из коэффициентов при $\dot{\psi}_a$ и $\dot{\psi}_b$ в первых двух уравнениях системы уравнений (1). Указанное правило применимо для нахождения проводимостей любой ветви шестиугольника.

Электродвижущая сила в ветви шестиугольника, соединяющей точки 1 и 2, определяется по формуле:

$$\dot{E}_{21} = \frac{(\dot{E}_{2a} - \dot{E}_{1a})Y_{1a}Y_{2a}Y_{bb} + (\dot{E}_{2b} - \dot{E}_{1b})Y_{1b}Y_{2b}Y_{aa} + (\dot{E}_{2b} - \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1a})Y_{1a}Y_{2b}Y_{ab} + (\dot{E}_{2a} + \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1b})Y_{1b}Y_{2a}Y_{ab}}{Y_{1a}Y_{2a}Y_{bb} + Y_{1b}Y_{2b}Y_{aa} + Y_{1a}Y_{2b}Y_{ab} + Y_{1b}Y_{2a}Y_{ab}}. \quad (4)$$

лентного многоугольника, что, однако, не мешает пользоваться ими для расчета цепей.

Из формулы (4) видно, что э. д. с. \dot{E}_{21} эквивалентна э. д. с., действующим в четырех параллельных ветвях, сумма проводимостей которых

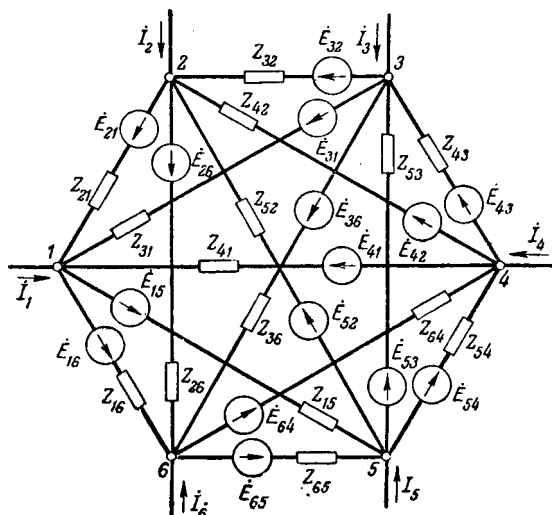


Рис. 2.

определяется формулой (3). В свою очередь, э. д. с. в каждой из этих параллельных ветвей равна геометрической сумме э. д. с., входящих в тот незамкнутый контур звезды, который соответствует этой ветви. Отметим здесь, что общее число незамкнутых контуров между любыми двумя точками 1 ... 6 двухузловой звезды равно четырем, что и определяет число слагаемых в фор-

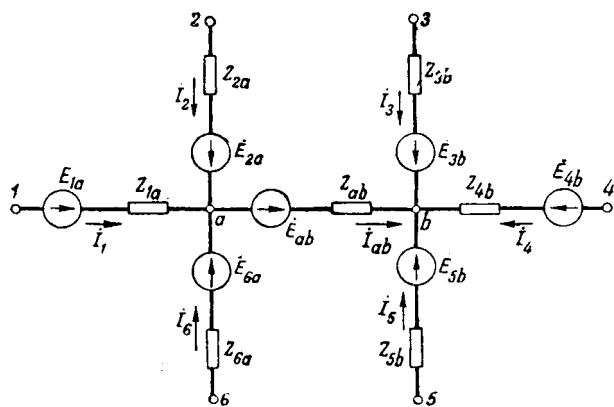


Рис. 3.

мулах (3) и (4). Если же число внешних ветвей, присоединенных к узлам a и b , больше шести, то выражения (3) и (4) остаются такими же, изменятся лишь значения суммарных проводимостей Y_{aa} и Y_{bb} , и увеличится общее число ветвей эквивалентного многоугольника.

Формулы преобразования неполной двухузловой активной звезды (рис. 3) в эквивалентный многоугольник имеют сравнительно простой вид и получаются из формул (3) и (4) при подстановке в них

$$Y_{1b} = Y_{2b} = Y_{3a} = Y_{4a} = Y_{5a} = Y_{6b} = 0 \text{ и}$$

$$E_{1b} = E_{2b} = E_{3a} = E_{4a} = E_{5a} = E_{6b} = 0.$$

Таким образом,

$$Y_{12} = \frac{Y_{1a}Y_{2a}Y_{bb}}{Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2}; \quad (5)$$

$$E_{21} = E_{2a} - E_{1a}. \quad (6)$$

Для остальных ветвей формулы имеют аналогичный вид.

На рис. 4 изображена полная трехузловая активная звезда, в которой каждая точка 1, 2, 3 соединена с каждым из узлов a, b, c . В целях упрощения не будем учитывать ветви, изображенные пунктиром. В этом случае уравнения узловых потенциалов запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_a Y_{aa} - \dot{\varphi}_b Y_{ab} - \dot{\varphi}_c Y_{ac} - \dot{\varphi}_1 Y_{1a} - \dot{\varphi}_2 Y_{2a} - \\ - \dot{\varphi}_3 Y_{3a} = \sum_a \dot{E}Y; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\dot{\varphi}_a Y_{ba} + \dot{\varphi}_b Y_{bb} - \dot{\varphi}_c Y_{bc} - \dot{\varphi}_1 Y_{1b} - \\ - \dot{\varphi}_2 Y_{2b} - \dot{\varphi}_3 Y_{3b} = \sum_b \dot{E}Y; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\dot{\varphi}_a Y_{ca} - \dot{\varphi}_b Y_{cb} + \dot{\varphi}_c Y_{cc} - \dot{\varphi}_1 Y_{1c} - \\ - \dot{\varphi}_2 Y_{2c} - \dot{\varphi}_3 Y_{3c} = \sum_c \dot{E}Y; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\dot{\varphi}_a Y_{1a} - \dot{\varphi}_b Y_{1b} - \dot{\varphi}_c Y_{1c} + \dot{\varphi}_1 (Y_{1a} + Y_{1b} + Y_{1c}) = \\ = -\dot{E}_{1a} Y_{1a} - \dot{E}_{1b} Y_{1b} - \dot{E}_{1c} Y_{1c} + I_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\dot{\varphi}_a Y_{2a} - \dot{\varphi}_b Y_{2b} - \dot{\varphi}_c Y_{2c} + \dot{\varphi}_2 (Y_{2a} + Y_{2b} + Y_{2c}) = \\ = -\dot{E}_{2a} Y_{2a} - \dot{E}_{2b} Y_{2b} - \dot{E}_{2c} Y_{2c} + I_2; \\ -\dot{\varphi}_a Y_{3a} - \dot{\varphi}_b Y_{3b} - \dot{\varphi}_c Y_{3c} + \dot{\varphi}_3 (Y_{3a} + Y_{3b} + Y_{3c}) = \\ = -\dot{E}_{3a} Y_{3a} - \dot{E}_{3b} Y_{3b} - \dot{E}_{3c} Y_{3c} + I_3, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Y_{aa}, Y_{bb}, Y_{cc}, \sum_a \dot{E}Y, \sum_b \dot{E}Y$ и $\sum_c \dot{E}Y$ имеют такой же смысл как и в уравнениях (1).

Исключая из этих уравнений потенциалы $\dot{\varphi}_a, \dot{\varphi}_b$ и $\dot{\varphi}_c$, получим систему уравнений, которой соответствует эквивалентный активный треугольник, у которого проводимость ветви между точками 1 и 2 определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} Y_{12} = \frac{1}{\Delta} [Y_{1a}Y_{2a}(Y_{bb}Y_{cc} - Y_{bc}^2) + \\ + Y_{1b}Y_{2b}(Y_{aa}Y_{cc} - Y_{ca}^2) + Y_{1c}Y_{2c}(Y_{aa}Y_{bb} - Y_{ab}^2) + \\ + Y_{1b}Y_{2c}Y_{bc}Y_{aa} + Y_{1c}Y_{2b}Y_{bc}Y_{aa} + \\ + Y_{1a}Y_{2c}Y_{ca}Y_{bb} + Y_{1c}Y_{2a}Y_{ca}Y_{bb} + Y_{1a}Y_{2b}Y_{ab}Y_{cc} + \\ + Y_{1b}Y_{2a}Y_{ab}Y_{cc} + Y_{1a}Y_{2c}Y_{ab}Y_{bc} + Y_{1c}Y_{2a}Y_{ab}Y_{bc} + \\ + Y_{1a}Y_{2b}Y_{bc}Y_{ca} + Y_{1b}Y_{2a}Y_{bc}Y_{ca} + Y_{1b}Y_{2c}Y_{ca}Y_{ab} + \\ + Y_{1c}Y_{2b}Y_{ca}Y_{ab}], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta = \begin{vmatrix} Y_{aa} - Y_{ab} - Y_{ac} \\ -Y_{ba} & Y_{bb} - Y_{bc} \\ -Y_{ca} - Y_{cb} & Y_{cc} \end{vmatrix}$ — определитель, составленный из проводимостей, являющихся сомножителями при потенциалах $\dot{\varphi}_a, \dot{\varphi}_b$ и $\dot{\varphi}_c$ в первых трех уравнениях системы уравнений (7) (см. приложение).

Формулы проводимостей двух других ветвей эквивалентного треугольника имеют аналогичную структуру.

Из формулы (8) следует, что проводимость ветви эквивалентного треугольника равна сумме

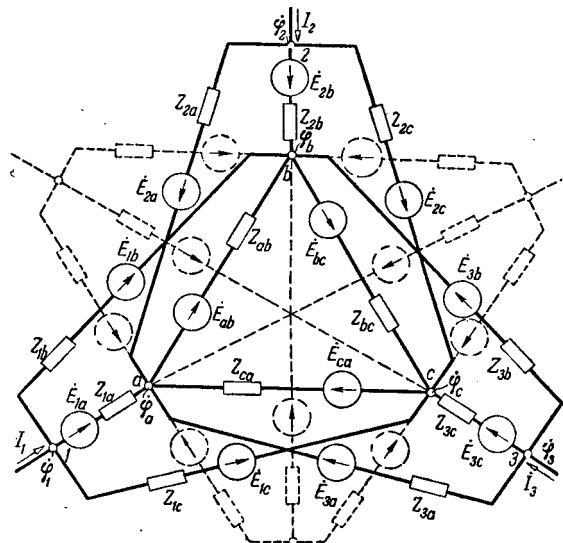


Рис. 4.

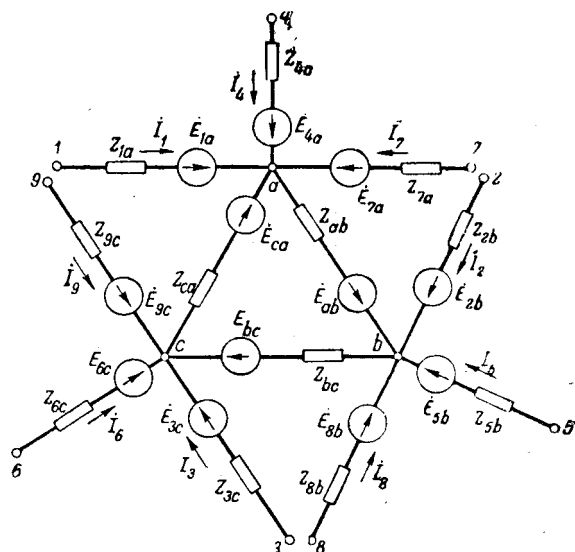


Рис. 5.

проводимостей 15 параллельно включенных ветвей. Такое число параллельных ветвей, так же как и в случае преобразования двухузловой звезды, равно числу возможных незамкнутых контуров, по которым можно перейти из точки 1 в точку 2 схемы. В соответствии с тремя различными видами этих контуров имеются три различных вида выражений, определяющих проводимости параллельных ветвей.

Если переход из точки 1 в точку 2 происходит только через один из узлов, то в каждом из трех таких случаев (три первых слагаемых) числитель соответствующей проводимости равен произведению проводимостей двух ветвей, по которым совершается переход, умноженным на разность произведений суммарных проводимостей ветвей, присоединенных к двум другим узлам, не затронутым этим переходом, и квадрата проводимости ветви, соединяющей эти узлы. Для других шести незамкнутых контуров между точками 1 и 2, проходящих через два узла звезды (шесть следующих слагаемых), соответствующее значение числителя проводимости равно произведению проводимостей трех ветвей звезды, по которым происходит переход из точки 1 в точку 2, на суммарную проводимость ветвей, присоединенных к узлу, не затронутому при таком переходе. И, наконец, если незамкнутый контур проходит через все три узла звезды (шесть последних слагаемых), то числитель эквивалентной проводимости равен произведению проводимостей четырех ветвей, по которым производится переход из точки 1 в точку 2.

Можно показать, что так же, как и для случая преобразования двухузловой звезды, э. д. с. в каждой из 15 параллельных ветвей, образующих одну ветвь треугольника, равны геометрическим суммам э. д. с. в тех ветвях трехузловой звезды, которым соответствует данная параллельная ветвь. Величина э. д. с. в эквивалентной ветви треугольника определяется по правилу сложения э. д. с. в параллельных ветвях.

Необходимо особо подчеркнуть, что выражения, определяющие проводимости и э. д. с. ветвей эквивалентного многоугольника, остаются такими же и в том случае, когда число ветвей, присоединенных к каждому из узлов a , b и c , больше пяти (см., например, пунктирные линии на рис. 4). В этом случае изменяются лишь суммарные проводимости Y_{aa} , Y_{bb} , Y_{cc} и увеличится число эквивалентных ветвей многоугольника. Однако число параллельных ветвей между каждой парой узлов эквивалентного многоугольника будет по-прежнему равно 15, так как число незамкнутых контуров между любыми двумя точками 1, 2... остается без изменения.

Значительно проще получаются формулы преобразования неполной трехузловой звезды (рис. 5), в которой каждый узел 1...9 соединен только с одним из узлов a , b , c . В этом случае, так же как для полной трехузловой звезды, имеется три вида незамкнутых контуров, по которым может быть осуществлен переход между двумя узлами из числа 1...9. Так, например, для перехода из первого узла в четвертый имеется только один путь — по ветвям с проводимостями Y_{1a} и Y_{4a} . Поэтому соответствующая эквивалентная проводимость записывается следующим образом:

$$Y_{14} = Y_{1a} Y_{4a} \left(\frac{Y_{bb} Y_{cc} - Y_{bc}^2}{\Delta} \right),$$

а э. д. с. в этой ветви равна:

$$\dot{E}_{41} = \dot{E}_{4a} - \dot{E}_{1a}.$$

Переход из узла 1 в узел 2 возможен двумя путями, и поэтому эквивалентная проводимость ветви многоугольника между этими узлами следующая:

$$Y_{12} = \frac{1}{\Delta} (Y_{1a} Y_{ab} Y_{2b} Y_{cc} + Y_{1a} Y_{ca} Y_{bc} Y_{2b}),$$

а э. д. с., соответствующие первому и второму слагаемым в этом выражении, равны $(\dot{E}_{2b} - \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1a})$ и $(\dot{E}_{2b} + \dot{E}_{bc} + \dot{E}_{ca} - \dot{E}_{1a})$. Таким же путем находятся проводимости и э. д. с. всех ветвей эквивалентного многоугольника.

Аналогичным способом можно получить формулы преобразования как для полных, так и для неполных активных звезд с числом узлов больше трех. Однако для практического применения пригодны лишь формулы преобразования для неполных четырехузловых звезд, так как при большем числе ветвей и узлов формулы преобразования становятся чрезвычайно громоздкими.

При преобразовании неполной четырехузловой звезды (рис. 6) в эквивалентный многоугольник (рис. 7) проводимость ветви, соединяющей точки 1 и 2 многоугольника, будет равной:

$$Y_{21} = \frac{Y_{1a} Y_{2b}}{\Delta} [Y_{ab} (Y_{cc} Y_{dd} - Y_{cd}^2) + Y_{bd} Y_{da} Y_{cc} + Y_{bc} Y_{ca} Y_{dd} + Y_{bc} Y_{cd} Y_{da} + Y_{bd} Y_{cd} Y_{ca}], \quad (9)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} Y_{aa} - Y_{ab} - Y_{ac} - Y_{ad} \\ -Y_{ba} & Y_{bb} - Y_{bc} - Y_{bd} \\ -Y_{ca} - Y_{cb} & Y_{cc} - Y_{cd} \\ -Y_{da} - Y_{db} - Y_{dc} & Y_{dd} \end{vmatrix}$$

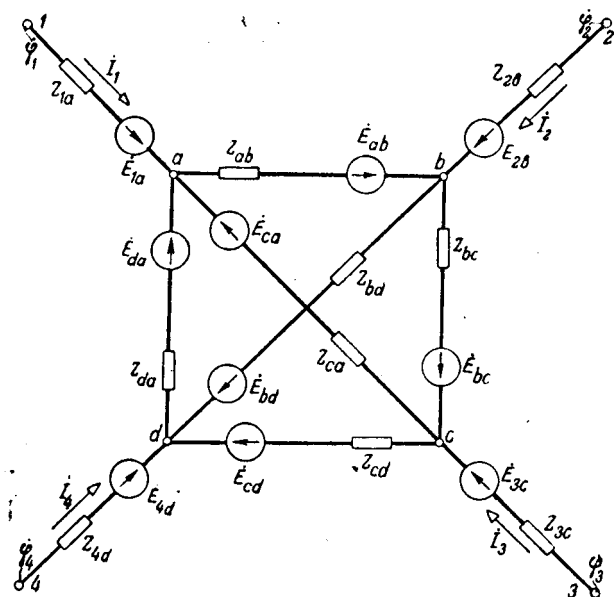


Рис. 6.

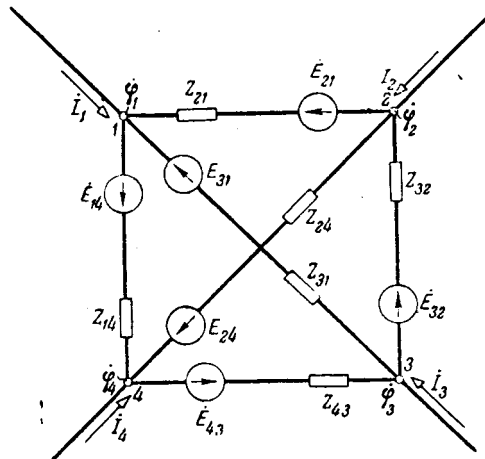


Рис. 7.

Таким образом, каждая ветвь многоугольника образуется из пяти параллельных ветвей, проводимости которых определяются так же, как и в случае трехузловой звезды. Значения э. д. с. в этих ветвях определяются тем же способом;

пяти слагаемым в формуле (9) соответствуют следующие пять значений э. д. с.:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{2b} - \dot{E}_{ab} - \dot{E}_{1a}; \quad \dot{E}_{2b} + \dot{E}_{bd} + \dot{E}_{da} - \dot{E}_{1a}; \\ \dot{E}_{2b} + \dot{E}_{bc} + \dot{E}_{ca} - \dot{E}_{1a}; \\ \dot{E}_{2b} + \dot{E}_{bd} + \dot{E}_{cd} + \dot{E}_{da} - \dot{E}_{1a}, \\ \dot{E}_{2b} + \dot{E}_{bd} - \dot{E}_{cd} + \dot{E}_{ca} - \dot{E}_{1a}. \end{aligned}$$

Значение эквивалентной э. д. с. в ветви многоугольника по-прежнему определяется по правилу сложения э. д. с. в параллельных ветвях.

Приложение. Для случая полной трехузловой звезды рассмотрим определитель, составленный из проводимостей, являющихся сомножителями при потенциалах φ_a , φ_b и φ_c в первых трех уравнениях системы уравнений (7)

$$\Delta = \begin{vmatrix} Y_{aa} & -Y_{ab} & -Y_{ac} \\ -Y_{ba} & Y_{bb} & -Y_{bc} \\ -Y_{ca} & -Y_{cb} & Y_{cc} \end{vmatrix}$$

Запишем определитель в раскрытой форме. С этой целью представим проводимость каждого узла трехузловой звезды в виде суммы проводимостей двух ветвей треугольника, присоединенных к соответствующему узлу, и суммарной проводимости всех остальных ветвей, присоединенных к тому же узлу, т. е.

$$\begin{aligned} Y_{aa} &= Y_{ab} + Y_{ca} + \Sigma Y_{ka}; \\ Y_{bb} &= Y_{ba} + Y_{bc} + \Sigma Y_{kb} \text{ и} \\ Y_{cc} &= Y_{ca} + Y_{cb} + \Sigma Y_{kc}, \end{aligned}$$

где применительно к рис. 4 (при отсутствии ветвей, отмеченных пунктиром)

$$\begin{aligned} \Sigma Y_{ka} &= Y_{1a} + Y_{2a} + Y_{3a}; \\ \Sigma Y_{kb} &= Y_{1b} + Y_{2b} + Y_{3b}; \\ \Sigma Y_{kc} &= Y_{1c} + Y_{2c} + Y_{3c}. \end{aligned}$$

Подставляя значения Y_{aa} , Y_{bb} и Y_{cc} в раскрытое выражение определителя, после элементарных преобразований имеем:

$$\begin{aligned} \Delta &= (Y_{ab} Y_{bc} + Y_{bc} Y_{ca} + Y_{ca} Y_{ab}) (\Sigma Y_{ka} + \Sigma Y_{kb} + \Sigma Y_{kc}) + \\ &+ Y_{ab} (\Sigma Y_{ka} + \Sigma Y_{kb}) \Sigma Y_{kc} + Y_{bc} (\Sigma Y_{kb} + \Sigma Y_{kc}) \Sigma Y_{ka} + \\ &+ Y_{ca} (\Sigma Y_{kc} + \Sigma Y_{ka}) \Sigma Y_{kb} + \Sigma Y_{ka} \cdot \Sigma Y_{kb} \cdot \Sigma Y_{kc}. \end{aligned}$$

Полученная раскрытая форма определителя третьего порядка без отрицательных членов значительно облегчает определение проводимостей ветвей эквивалентного многоугольника.

Литература

1. Под ред. К. А. Круга. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1952.
2. Г. Г. Белоногов. О методах расчета линейных электрических схем. Электричество, № 1, 1955.
3. А. Н. Милых. Обобщенный метод трансформации электрических цепей. Электричество, № 9, 1939.

[8. 2. 1957]



Электрогидропривод как объект регулирования

Кандидат техн. наук Л. П. ШИНИБЕРОВ

Ленинград

Во многих силовых синхронно-следящих системах в качестве основного усилителя применяется гидравлический регулятор скорости ротационно-пространственного типа или, как его часто называют, гидромuftа. Гидрорегулятор состоит из гидронасоса с регулируемой производительностью и работающего от него гидродвигателя. Входной вал гидрорегулятора получает вращение от двигателя постоянного или переменного тока, скорость которого не регулируется. Блок, состоящий из приводного двигателя, гидрорегулятора и объекта, в дальнейшем будем называть электрогидроприводом.

В большинстве работ, посвященных системам дистанционного управления с гидромuftой, считают, что переходный процесс в силовой части системы определяется только переходным процессом в гидрорегуляторе, причем решение о том или ином представлении переходного процесса принимается часто без учета специфики всего электрогидропривода.

Пренебрегать изменением скорости приводного двигателя при изменении нагрузки на его валу можно только в случае очень жесткой характеристики двигателя, т. е. при установке, например, мощного синхронного двигателя. Однако обычно в качестве приводного двигателя ставится либо асинхронный короткозамкнутый двигатель, либо двигатель постоянного тока, т. е. такие типы двигателей, у которых рабочие характеристики имеют значительный наклон. Так как эти двигатели обладают большими моментами инерции, то электромеханические постоянные времени их будут также значительными, и их влияние необходимо учитывать в переходных процессах. В таблице приведены рассчитанные по номинальным данным электромеханические постоянные времени некоторых типов приводных двигателей.

Значения электромеханических постоянных времени приводных двигателей

Род тока	Тип	Напряжение, в	Мощность, кВт	Скорость, об/мин	Электромеханическая постоянная времени, сек
Постоянный	ПН-5	220	0,52	1 450	0,063
Постоянный	ПН-10	220	1,00	1 420	0,048
Постоянный	ПН-17,5	220	1,75	1 450	0,035
Постоянный	ПН-28,5	220	2,80	1 500	0,047
Переменный	МАП-21-4/12	380	3,60	1 500	0,030
Переменный	МАП-21-6/12	380	2,20	1 000	0,024
Переменный	МАП-21-4	380	2,20	1 500	0,011
Переменный	МАП-31-4	380	5,00	1 500	0,011

Из таблицы видно, что значения постоянных времени колеблются от 0,01 до 0,06 сек, т. е. порядок величины их такой же, какой может быть у других постоянных времени системы и пренебрегать ими нельзя.

Таким образом, при расчете переходных процессов в системе автоматического управления с гидромuftой возникает необходимость в более точном представлении объекта регулирования этой системы, а именно — электрогидропривода, что и является целью данной работы.

Электрогидропривод и некоторые характеризующие его величины изображены на рис. 1, для которых приняты следующие обозначения:

ω — скорость вращения вала электродвигателя;

ω_A — скорость вращения вала генераторной части А гидрорегулятора;

ω_B — скорость вращения вала двигательной части В гидрорегулятора;

ω_s — скорость вращения объекта;

$K_A = \frac{\omega}{\omega_A}$, $K_B = \frac{\omega_B}{\omega_s}$ — передаточные коэффициенты;

η_A, η_B — к. п. д. передач.

Соотношение скоростей ω_A и ω_B определяется установкой угла поворота φ управляющего органа гидрорегулятора (шпинделя гидромuftы), т. е.

$$\frac{\omega_B}{\omega_A} = \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} = \varphi_d^*,$$

где φ_{\max} — максимально возможный угол поворота управляющего органа.

В [Л. 1 и 2] предлагается построение механических характеристик основных типов электрогидроприводов с позиций теории электропривода. Механические характеристики электрогидропривода выведены в этих работах с учетом скольжения как гидравлической, так и электрической частей привода и представляют собой довольно сложные выражения.

Как известно, уравнения механических характеристик описывают лишь установившееся движение привода, и естественно, что применительно к динамике электрогидропривода выражения должны оказаться еще более громоздкими. Например, скорость выходного вала гидрорегулятора является нелинейной функцией, так как зависит от произведения двух переменных: ω и φ :

$$\omega_B = \frac{\varphi_d \omega}{K_A}. \quad (1)$$

Следовательно, если необходимо описать переходный процесс, который всегда характеризуется наличием ускорения, то ускорение вала В (рис. 1) придется выразить через частные производные $\frac{\partial \varphi_d}{\partial t}$ и $\frac{\partial \omega}{\partial t}$, а переменные φ_d, ω следующим образом:

$$\frac{d\omega_B}{dt} = \frac{\varphi_d}{K_A} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\omega}{K_A} \frac{\partial \varphi_d}{\partial t}. \quad (1a)$$

* Индекс ∂ означает, что переменная берется в отнесенных единицах.

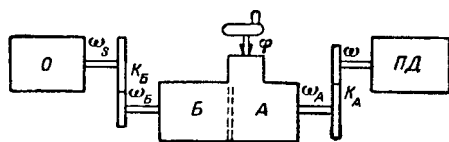


Рис. 1. Система электрогидропривода.

О—объект; Б—двигательная часть гидрорегулятора (гидродвигатель);
А—генераторная часть гидрорегулятора (гидронасос);
ПД—приводной двигатель.

Однако эти затруднения можно обойти, если воспользоваться методикой описания сложных динамических систем, известной в теории автоматического регулирования. Найдем передаточную функцию электрогидропривода, т. е. линейное приближение по существу нелинейной динамической системы. Предположим, что рабочая характеристика приводного двигателя известна и подобна изображенной на рис. 2. Работа дви-

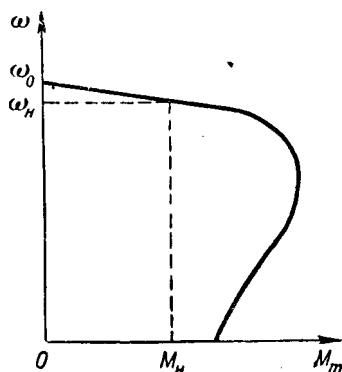


Рис. 2. Рабочая характеристика приводного двигателя.

гателя в режиме слежения происходит на прямолинейном участке характеристики, уравнение которого будет:

$$M_m = \alpha \omega_0 - \alpha \omega, \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{M_n}{\omega_0 - \omega_n}$;

ω_n — номинальная скорость двигателя;

M_n — вращающий момент двигателя.

Вращающий момент на валу А гидрорегулятора M_{mA} будет:

$$M_{mA} = \eta_A K_A (\alpha \omega_0 - \alpha \omega), \quad (3)$$

где $\eta_A = \eta'_A \eta''_A$;

η'_A — к. п. д. зубчатой передачи (если она имеется);

$\eta''_A = \frac{P_1}{P_c - \Delta P_g}$ — механический к. п. д. двигателя;

P_1 — полезная мощность на валу двигателя;
 P_c — мощность, потребляемая двигателем из сети;

ΔP — электрические потери в двигателе.

С другой стороны, из основного уравнения движения электропривода следует, что

$$M_{mA} = M_A + J_A \frac{d\omega_A}{dt}, \quad (4)$$

где J_A — суммарный момент инерции ротора приводного двигателя и части А гидрорегулятора, приведенный к валу А;

M_A — момент нагрузки на валу А.

Для гидрорегулятора можно написать следующее соотношение моментов;

$$\eta_z M_A \omega_A = M_B \omega_B, \quad (5)$$

где η_z — полный к. п. д. регулятора;

M_B — момент нагрузки на валу Б.

Считая, что механические характеристики собственно гидрорегулятора при различных углах поворота φ остаются параллельными друг другу, можно зависимость $M_B = f(\omega_B)$ представить в таком же виде, как и $M_m = f(\omega)$, т. е.

$$M_B = \alpha_z \varphi_0 \omega_A - \alpha_z \omega_B, \quad (6)$$

где $\alpha_z = \frac{M_{Bn}}{\omega_{B0} - \omega_{Bn}}$;

ω_{B0} — пограничная скорость механической характеристики, соответствующая установке φ_0 ($\omega_{B0} = \varphi_0 \omega_A$);

M_{Bn} и ω_{Bn} — номинальные момент и скорость на валу Б.

Вращающий момент на валу гидродвигателя, приведенный к валу объекта M_{Bs} , должен в переходных процессах уравнивать момент нагрузки и динамический момент объекта, т. е.

$$M_{Bs} = M_s + J_s \frac{d\omega_s}{dt}, \quad (7)$$

где J_s — суммарный момент инерции объекта и части Б гидродвигателя, приведенный к валу объекта;

M_s — момент нагрузки на валу объекта.

Таким образом движение электрогидропривода в переходных процессах описывается системой из шести дифференциальных уравнений (2) ... (7). Если решить эту систему уравнений относительно переменных φ_0 и ω_s , то получим следующее соотношение:

$$(M_s + J_s p \omega_s) \left(1 + \frac{\frac{\alpha_z K_B}{\alpha K_A^2 \eta_A \eta_z} \varphi_0^2}{1 + \frac{T_g}{\eta_A} p} \right) = \frac{\omega_{0A} \alpha_z \eta_B K_B \varphi_0}{1 + \frac{T_g}{\eta_A} p} - \alpha_z K_B^2 \eta_B \omega_s, \quad (8)$$

где T_g — электромеханическая постоянная времени.

Соотношение (8) представляет собой нелинейное уравнение, так как в нем имеется произведение переменных величин. Линейное приближение его можно найти, разлагая переменные в ряд

Тэйлора и отбрасывая члены второго порядка малости и нелинейные остатки. Практически первое приближение проще всего получить, заменив переменные через сумму установившихся значений координат в равновесном состоянии и отклонений от этого состояния.

Подставив в (8) значения

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\partial} &= \varphi_{\partial y} + \Delta \varphi_{\partial}; \\ \omega_B &= \omega_{By} + \Delta \omega_B, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $\varphi_{\partial y}$, ω_{By} — установившиеся значения координат;

$\Delta \varphi_{\partial}$, $\Delta \omega_B$ — отклонения координат от установившихся значений.

Учитывая, что

$$\frac{d\omega_B}{dt} = \Delta \omega_B' \text{ и } \varphi_{\partial}^2 = \varphi_{\partial y}^2 + 2\varphi_{\partial y} \Delta \varphi_{\partial}, \quad (10)$$

и исключив члены, соответствующие равносному состоянию системы, для случая постоянной нагрузки на валу объекта получим:

$$\frac{\Delta \omega_{\partial}}{\Delta \varphi_{\partial}} = \frac{\frac{\omega_0}{K_A K_B} - \frac{2\varphi_{\partial y}}{\alpha \eta_A \eta_B \eta_c K_A^2 K_B^2} M_s}{\left(1 + \frac{T_{\partial}}{\eta_A} p\right) \left(1 + \frac{T_z}{\eta_B} p\right) + \frac{T_c}{\eta_A \eta_c \eta_B} p}, \quad (11)$$

где $T_z = \frac{J_s}{\alpha_2 K_B^2}$ — гидромеханическая постоянная времени привода;

$$T_c = \frac{J_s \varphi_{\partial y}^2}{\alpha K_A^2 K_B^2}.$$

При регулировании с небольшими отклонениями регулирующего органа от нулевого положения в пределах (0,2 ... 0,3) φ_{\max} [т. е. при $T_c = (0,04 \dots 0,09) T_{\max}$] членом с T_c можно пренебречь.

Если обозначить

$\eta_0 = \eta_A \eta_c \eta_B$ — к. п. д. передачи от двигателя к объекту;

$$\Delta \omega_s = p \cdot \Delta \theta_s;$$

θ_s — угол поворота выходного вала объекта;

$$\omega_{0s} = \frac{\omega_0}{K_A K_B}, \text{ то}$$

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta \varphi_{\partial}} = \frac{\omega_{0s} \left(1 - \frac{2\varphi_{\partial y}}{\alpha \eta_0 K_A K_B \omega_0} M_s\right)}{p \left[\frac{T_{\partial} T_z}{\eta_A \eta_B} p^2 + \left(\frac{T_{\partial}}{\eta_A} + \frac{T_z}{\eta_B} + \frac{T_c}{\eta_0}\right) p + 1 \right]}. \quad (12)$$

Уравнение (12) характеризует электрогидропривод в общем случае как цепочку звеньев третьего порядка.

В зависимости от значений величин $\frac{T_{\partial}}{\eta_A}$, $\frac{T_z}{\eta_B}$,

$\frac{T_c}{\eta_0}$ степень знаменателя передаточной функции может быть понижена. Например, если можно пренебречь скольжением электродвигателя, то

получим передаточную функцию звена второго порядка вида:

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta \varphi_{\partial}}(p) = \frac{\omega_{0s}}{p \left(1 + \frac{T_z}{\eta_B} p\right)}. \quad (13)$$

Если можно не учитывать скольжение гидро-регулятора, т. е. считать, что $\frac{T_z}{\eta_B} = 0$, то передаточная функция имеет вид:

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta \varphi_{\partial}}(p) = \frac{\omega_{0s} \left(1 - \frac{2\varphi_{\partial y}}{\omega_0 \alpha \eta_0 K_A K_B} M_s\right)}{p \left[1 + \left(\frac{T_{\partial}}{\eta_A} + \frac{T_c}{\eta_0}\right) p\right]}. \quad (14)$$

В приближенных расчетах в качестве передаточной функции электрогидропривода может быть принято выражение

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta \varphi_{\partial}} = \frac{\omega_{0s}}{p(1 + T_n p)}, \quad (15)$$

где

$$T_n = \frac{T_{\partial}}{\eta_A} + \frac{T_z}{\eta_B} + \frac{T_c}{\eta_0}. \quad (16)$$

Если при рассмотрении системы автоматического регулирования можно пренебречь всеми постоянными электрогидропривода, его можно рассматривать как интегрирующее звено с передаточной функцией

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta \varphi_{\partial}}(p) = \frac{\omega_{0s}}{p}. \quad (17)$$

В общем случае нагрузка на валу объекта является переменной, т. е. $M_s = M_{sy} + \Delta M_s$ и передаточная функция электрогидропривода по отношению к возмущению на выходе будет иметь вид:

$$\frac{\Delta \theta_s}{\Delta M_s}(p) = \frac{-\left(\frac{1}{\alpha_2 K_B^2 \eta_B} + \frac{\varphi_{\partial y}^2}{\alpha \eta_0 K_A^2 K_B^2} + \frac{T_{\partial}}{\eta_A \eta_B \alpha_2 K_B^2} p\right)}{p \left[\left(1 + \frac{T_{\partial}}{\eta_A} p\right) \left(1 + \frac{T_z}{\eta_B} p\right) + \frac{T_c}{\eta_0} p \right]}. \quad (18)$$

Зависимости (12) ... (18) являются передаточными функциями для электрогидропривода как единого целого. Они дают возможность судить о динамических свойствах электрогидропривода как объекта регулирования и позволяют более обоснованно подходить к расчету всей следящей системы. Для подтверждения выведенных соотношений было проведено экспериментальное исследование переходных процессов на установке, изображенной на рис. 3. Электрогидропривод состоял из асинхронного приводного двигателя ПД с короткозамкнутым ротором, гидрорегулятора УРС-5 раздельного типа с короткими трубопроводами и тормозного генератора ТГ типа ПН-100. Статоры приводного двигателя и тормозного генера-

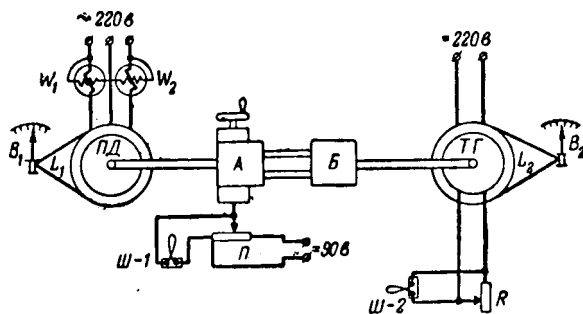


Рис. 3. Схема экспериментальной установки гидропривода.

тора не прикреплены к фундаменту и могут свободно поворачиваться под действием моментов соответствующих машин. Для определения величин этих моментов к статорам прикреплены рычаги, которые своими концами упираются на чаши весов B_1 и B_2 . Реостат R служит для регулирования величины нагрузки тормозного генератора. Подвижной контакт потенциометрического датчика связан с управляющим органом гидрорегулятора, и поэтому с датчика $П$ снимается напряжение, пропорциональное углу поворота φ ; $Ш-1$ и $Ш-2$ — вибраторы осциллографа.

Данные установки:

$$J_A = 0,1 \text{ кгм} \cdot \text{сек}^2; \sigma_{\text{эп}} = 0,028; \omega_{0A} = 52,31 \text{ /сек};$$

$$\sigma_{\text{эп}} = 0,03; J_B = 0,049 \text{ кгм} \cdot \text{сек}^2;$$

$$\omega_{0B} = 53,1 \text{ /сек}; M_{A\kappa} = M_{B\kappa} = 7 \text{ кгм}.$$

Электромеханическая постоянная времени

$$T_{\text{в}} = \frac{J \omega_{0A} \sigma_{\text{эп}}}{M_{A\kappa}} = \frac{0,1 \cdot 52,3 \cdot 0,028}{7} = 0,021 \text{ сек};$$

гидромеханическая постоянная времени

$$T_z = \frac{J_B \omega_{0B} \sigma_{\text{эп}}}{M_{B\kappa}} = \frac{0,049 \cdot 53 \cdot 0,03}{7} = 0,011 \text{ сек}.$$

На рис. 4 приведены кривые к. п. д. двигателя η_A и к. п. д. гидрорегулятора η_z при различных установках регулирующего органа.

При выбранном способе учета потерь путем включения их в неявном виде в к. п. д. применение формулы (12) возможно лишь при наличии опытных кривых к. п. д. конкретной исследуемой установки. Ввиду нелинейного закона изменения кривых к. п. д. формула (12) дает наиболее точные результаты при исследовании процессов, возникающих при небольших колебаниях регулирующего органа. Если необходимо рассчитать процесс, происходящий при полной перестановке управляющего органа из нулевого в максимальное положение, то необходимо весь диапазон изменения φ разбить на 4...5 участков и к ним применить формулу (12).

В электрогидроприводе невозможно осуществить задание типового сигнала в виде единичного толчка на входе, так как это потребовало бы огромных механических ускорений задающего

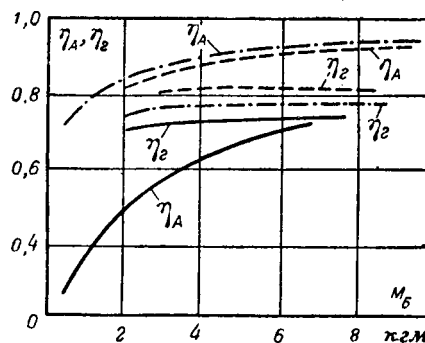


Рис. 4. Кривые к. п. д. двигателя η_A и к. п. д. гидрорегулятора η_z при различных установках регулирующего органа.

— при $\varphi=5^\circ$; — — — при $\varphi=15^\circ$;
- - - - - при $\varphi=20^\circ$.

устройства, и поэтому в данном опыте изменение угла поворота φ управляющего органа осуществлялось по экспоненциальной и линейной зависимостям. Реакцию системы на входной экспоненциальный или линейный сигналы всегда можно пересчитать на реакцию ее по отношению к любому другому сигналу.

Рассмотрим три случая поведения электрогидропривода в переходных процессах и применим к ним выведенные формулы.

Случай 1. Электрогидропривод вращается со скоростью $n_B = 385 \text{ об/мин}$ при $\varphi = 15^\circ$. Сопротивление R выведено. В этом положении произведен толчок управляющего органа от $\varphi = 15^\circ$ до $\varphi_{\text{макс}} = 20^\circ$ и записан переходный процесс при помощи осциллографа.

Из осциллограмм рис. 5 видно, что характер изменения φ можно считать экспоненциальным с постоянной времени экспоненты $T_\varphi = 0,12 \text{ сек}$.

Уравнение движения системы при экспоненциальном входном сигнале, преобразованное по Лапласу, имеет вид:

$$n_s(p) = \frac{n_{0s} \Delta \varphi_\partial}{p(1 + T_\varphi p) \left[p^2 \frac{T_s T_z}{\eta_A \eta_B} + \left(\frac{T_s}{\eta_A} + \frac{T_z}{\eta_B} + \frac{T_c}{\eta_0} \right) p + 1 \right]} \quad (19)$$

Используя таблицы операторов [Л.3], найдем оригинал выражения (19):

$$n_s(t) = \frac{n_{0s} \Delta \varphi_\partial}{T_\varphi \frac{T_s T_z}{\eta_A \eta_B}} \times \frac{\frac{b-c}{a} (e^{-at} - 1) + \frac{c-a}{b} (e^{-bt} - 1) + \frac{a-b}{c} (e^{-ct} - 1)}{(a-b)(b-c)(c-a)}, \quad (20)$$

где $a = \frac{1}{T_\varphi}$, b и c — корни знаменателя передаточной функции электрогидропривода.

Так как в данном случае $\Delta\varphi_d = 1/4$, $\varphi_{dy} = 3/4$, $n_{0s} = 536 \text{ об/мин}$, $\eta_A = 0,8$, $\eta_z = 0,73$, $\alpha = 6,66$, $b = 125,3$, $c = 27,7$, то

$$n_s(t) = 126(1 - 1,53e^{-8,3t} + 0,554e^{-27,7t} - 0,025e^{-125,3t}). \quad (21)$$

По уравнению (21) на рис. 5 построена пунктирная кривая, хорошо совпадающая с кривой истинного переходного процесса, что свидетельствует о правильном определении постоянных времени. Несовпадение, наблюдаемое в верхней части кривых, объясняется главным образом отклонением кривой $\varphi = f(t)$ в верхней части от экспоненты.

Случай 2. При тех же начальных условиях, что и в предыдущем случае, была осуществлена линейная перестановка управляющего органа. Как видно из осциллограммы рис. 5 (кривая б), угол φ изменяется линейно до момента времени $t_y = 0,32 \text{ сек}$ и далее остается постоянным.

Изменение скорости на выходе системы, преобразованное по Лапласу, для подобного входного сигнала будет иметь следующий вид:

$$n_s(p) = \frac{n_{0s} \Delta\varphi_d (1 - e^{-t_y p})}{t_y p^2 \left[p^2 \frac{T_s T_z}{\eta_A \eta_B} + \left(\frac{T_s}{\eta_A} + \frac{T_z}{\eta_B} + \frac{T_c}{\eta_0} \right) p + 1 \right]}. \quad (22)$$

Оригинал этого изображения

$$\begin{aligned} n_s(t) = & \frac{n_{0s} \Delta\varphi_d}{t_y} \left[-\frac{T_1^2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \right. \\ & \left. + \frac{T_2^2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} - (T_1 + T_2) + t \right] - \\ & - \frac{n_{0s} \Delta\varphi_d}{t_y} \left[-\frac{T_1^2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \right. \\ & \left. + \frac{T_2^2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t_1}{T_2}} - (T_1 + T_2) + t_1 \right]. \quad (23) \end{aligned}$$

В уравнении (23) второй член в квадратных скобках следует учитывать только с момента $t = t_y$, причем $t_1 = t - t_y$. После подстановки численных значений величин в (23) получим:

$$\begin{aligned} n_s(t) = & 126 [(0,145e^{-27,7t} - 0,007e^{-125,3t} + \\ & + 3,1t - 0,138) - (0,145e^{-27,7t_1} - 0,007e^{-125,3t_1} + \\ & + 3,1t_1 - 0,138)], \quad (24) \end{aligned}$$

где $t_1 = t - 0,32 \text{ сек}$.

Построенная по (24) кривая, б на рис. 5 вполне удовлетворительно совпадает с осциллограммой переходного процесса.

Случай 3. Был осуществлен толчок управляющего органа от $\varphi = 0$ до $\varphi = 5^\circ$. Изменение φ происходило по экспоненте с постоянной времени $T_\varphi = 0,11 \text{ сек}$. Будем приближенно считать, что к. п. д. $\eta_A = 0,2$. Передаточную функцию электрогидропривода для этого случая можно определить по (15).

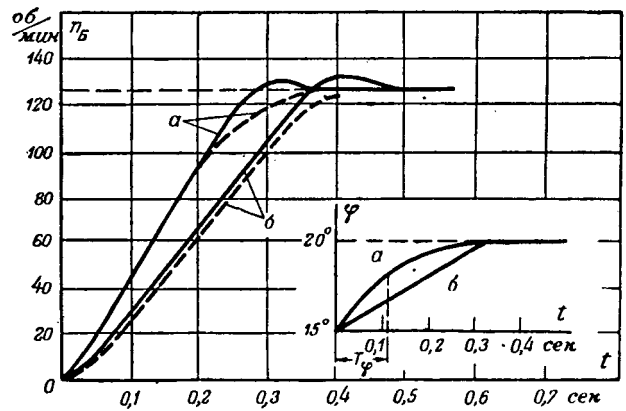


Рис. 5.

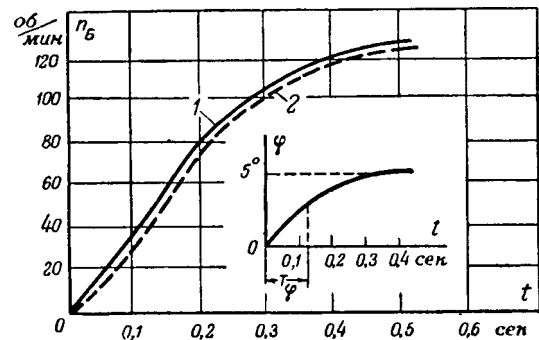


Рис. 6.

Тогда

$$n_s(p) = \frac{n_{0s} \Delta\varphi_d}{p(1 + T_\varphi p)(1 + T_n p)}. \quad (25)$$

Оригинал выражения (25) имеет вид:

$$\begin{aligned} n_s(t) = & n_{0s} \Delta\varphi_d \left(1 + \frac{T_\varphi}{T_n - T_\varphi} e^{-\frac{t}{T_\varphi}} + \right. \\ & \left. + \frac{T_n}{T_\varphi - T_n} e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (26) \end{aligned}$$

В соответствии с принятыми данными постоянная привода по (16) при $T_s = 0,021 \text{ сек}$, $\eta_A = 0,2$, $T_c = 0$, $\eta_B = 1$ будет:

$$T_n = \frac{0,021}{0,2} + 0,011 = 0,12 \text{ сек}.$$

Подставив численные значения в (26), найдем:

$$n_s(t) = 126(1 - 12e^{-8,35t} + 11e^{-9,1t}). \quad (27)$$

Кривая 2 на рис. 6 рассчитана по (27) и близка к опытной кривой 1.

Приведенные примеры показывают, что выражения (12) ... (18) вполне могут быть применены для описания движения электрогидропривода в переходных процессах.

Литература

1. М. Г. Чиликин и А. М. Корытин. Механические характеристики электрогидроприводов. Электричество, № 4, 1953.
2. М. Г. Чиликин, А. М. Корытин и В. Н. Прокофьев. Силовой электрогидропривод. Госэнергоиздат, 1955.
3. В. А. Диткин и П. И. Кузнецов. Справочник по операционному исчислению. ГИТТЛ, 1951.

[1.12. 1956]

Трансформаторные режимы сельсинов

Доктор техн. наук, проф. Г. И. ШТУРМАН

г. Рига

Однофазные индукционные сельсины в трансформаторных режимах нашли широкое применение в качестве контрольно управляющих органов разнообразных следящих систем.

Для правильного подбора элементов сельсинных схем и решения задач проектирования отдельных сельсинов требуются соответствующие методы расчетов. Основные количественные связи, характеризующие трансформаторные режимы сельсинов, выявляются общей теорией индукционных систем синхронной связи.

Результаты рассмотрения физических процессов в однофазных индукционных системах дали достаточно простые соотношения для расчета выходных напряжений U_g при бесконечно больших значениях выходных сопротивлений Z_g . Эти соотношения явились основанием к выбору рациональных конструктивных форм трансформаторных сельсинов (датчиков и приемников) и используются в инженерной практике при компоновке элементов индукционных систем синхронной связи.

Однако в ряде случаев предпосылка о бесконечно большом сопротивлении выходной цепи не соответствует действительности и часто возникает задача увеличения выходной мощности трансформаторных сельсинов. При повышенной выходной мощности сельсинов требуются меньшие коэффициенты усиления в остальных звеньях системы автоматического управления, что может приводить к рационализации устройств в целом. Для решения подобных задач необходимы простые методы расчета режимов трансформаторных сельсинов не только при холостом ходе ($Z_g = \infty$), но и под нагрузкой.

Впервые расчетные соотношения для режимов нагрузки трансформаторных сельсинов в компактном виде представлены в работе К. С. Бобова и И. С. Маркина. Отсутствие подобных результатов в трудах других авторов [Л. 1, 2 и 3] связано с относительной сложностью учета всех параметров системы в удобных для инженерной практики расчетных формулах. В связи с этим возникает задача выявления основных факторов, определяющих процессы в выходных цепях сельсинных схем и установления приближенных, но достаточно простых методов расчета. Последние должны с удовлетворяющей практикой точностью определять значения выходных токов и напряжений и приводить к общим выводам о рациональной компоновке сельсинных схем и конструктивном выполнении отдельных сельсинов. В дальнейшем иллюстрируются возможности подобных расчетов для типичных случаев использования трансформаторных сельсинов.

Однофазные индукционные сельсины являются разновидностью синусных или косинусных поворотных трансформаторов. С этой точки зрения методы количественного учета отдельных параметров в режимах трансформаторных сельсинов должны представить развитие аналогичных расчетов для поворотных трансформаторов.

Выходные токи и напряжения синусного трансформатора. Схема расположения и включения обмоток синусного поворотного трансформатора представлена на рис. 1. С целью сопоставления методов расчета в дальнейшем предусматривается наличие квадратурной обмотки и несимметричной магнитной системы с явно выраженными полюсами.

Электромагнитные процессы в функции угла поворота выходной обмотки θ для трансформатора на рис. 1 описываются двумя уравнениями магнитных связей по продольной и поперечной осям и тремя уравнениями электрических цепей:

$$\dot{\Phi}_d = G_d(I_1 w_1 k_1 + I_g w_g \sin \theta); \quad (1)$$

$$\dot{\Phi}_q = G_q(I_k w_k k_k + I_g w_g \cos \theta); \quad (2)$$

$$I_k Z_k = -j c_k \dot{\Phi}_q; \quad (3)$$

$$I_g Z_g = -j c_g (\dot{\Phi}_d \sin \theta + \dot{\Phi}_q \cos \theta); \quad (4)$$

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + j c_1 \dot{\Phi}_1. \quad (5)$$

Использованные в уравнениях (1) ... (5) обозначения приведены в конце статьи.

Основными величинами для поворотных трансформаторов являются значения выходных токов и напряжений. Последние нетрудно определить, рассматривая синусный поворотный трансформатор как четырехполюсник. В этом случае [Л. 4, 5 и 6] выходной ток в зависимости от выходного напряжения \dot{U}_1 и двух постоянных четырехполюсника \dot{A} и \dot{B} определится по формуле

$$\dot{I}_g = \frac{\dot{U}_1}{\dot{A} Z_g + \dot{B}}. \quad (6)$$

Постоянная \dot{A} соответствует отношению входного напряжения к выходному в режиме холостого хода четырехполюсника. Постоянная \dot{B} соответствует сопротивлению, по которому рассчитывается выходной ток в режиме короткого замыкания четырехполюсника.

Подстановка постоянных четырехполюсника \dot{A} и \dot{B} в общее соотношение (6) дает приведенные значения выходных токов для любых углов поворота θ и внешних сопротивлений Z_k :

$$\dot{I}'_g = \dot{I}_g \frac{w_g}{w_1 k_1} = -\dot{U}_1 \frac{\sin \theta}{Z_1 + j(\dot{Z}'_2 + \dot{Z}'_k) + (j\dot{Z}_q - Z_1) \cos^2 \theta}, \quad (7)$$

откуда приведенное значение выходного напряжения будет:

$$\dot{U}'_g = \dot{U}_g \frac{w_1 k_1}{w_g} = -\dot{U}_1 \frac{\dot{Z}'_k \sin \theta}{Z_1 + j\dot{Z}'_g + (j\dot{Z}_q - Z_1) \cos^2 \theta}, \quad (8)$$

где

$$j = \frac{Z_1 + Z_0}{Z_0}; \quad Z_q = \frac{Z'_{0q} Z'_k}{Z'_{0q} + Z'_k}.$$

Из (7) и (8) следует известное условие первичного симметрирования, при котором сохраняются синусоидальными зависимости от угла поворота выходных токов и напряжений для любых нагрузок [Л. 7 и 8]:

$$\dot{\sigma} Z_q = Z_1 = \sigma \frac{Z_{0q} Z'_k}{Z_{0q} + Z'_k}. \quad (9)$$

Синусно-косинусные поворотные трансформаторы обычно исполняются с равномерным зазором. При этом $Z_{0q} = Z_0$ и выполнение условия симметрирования (9) не встречает особых затруднений:

$$Z_1 = \dot{\sigma} \frac{Z_0 Z'_k}{Z_0 + Z'_k}. \quad (9a)$$

Постоянная четырехполюсника \dot{B} была ранее определена с учетом намагничивающих токов в режиме короткого замыкания. Для магнитных связей по продольной оси намагничивающие токи учитываются в (7) и (8) коэффициентом $\dot{\sigma} > 1$, а по поперечной оси — шунтированием сопротивления Z'_k сопротивлением Z_{0q} , что дает $Z_q < Z'_k$.

Нетрудно видеть, что расчет значения \dot{B} с упрощающей предпосылкой $Z_0 = Z_{0q} = \infty$ не нарушает условия симметрирования (9a) и приводит при его несоблюдении к незначительным погрешностям при расчетах выходных токов по приближенной формуле, имеющей вид:

$$I'_s = -\dot{U}_1 \frac{\sin \theta}{Z_1 + \dot{\sigma} Z'_s + (Z'_k - Z_1) \cos^2 \theta}. \quad (7a)$$

Четырехполюсник из каскада трансформаторных сельсинов. Принцип действия трансформаторных сельсинов базируется на известных закономерностях распределения токов в многофазных вторичных цепях однофазных индукционных машин при единичном скольжении. Эти закономерности нетрудно установить, ориентируя повороты в сельсине-датчике (рис. 2) углом γ между продольной осью индуктора и осью какой-либо из трех идентично выполненных, симметрично расположенных и одинаково нагруженных ($Z_A = Z_B = Z_C$) фаз вторичной обмотки. При ориентировке относительно фазы A и отсчете углов γ по порядку следования фаз можно получить значения для токов отдельных цепей в функции от γ :

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I \cos \gamma; \\ I_B &= I \cos (\gamma - 120^\circ); \\ I_C &= I \cos (\gamma + 120^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где I — максимально возможное из эффективных значений токов, имеющее место в той фазе, ось которой совпадает с осью индуктора и, следовательно, с осью первичной (входной) обмотки.

Суммарная н. с. вторичной реакции от токов I_A , I_B и I_C всегда действует по оси первичной обмотки и вне зависимости от угла γ сохра-

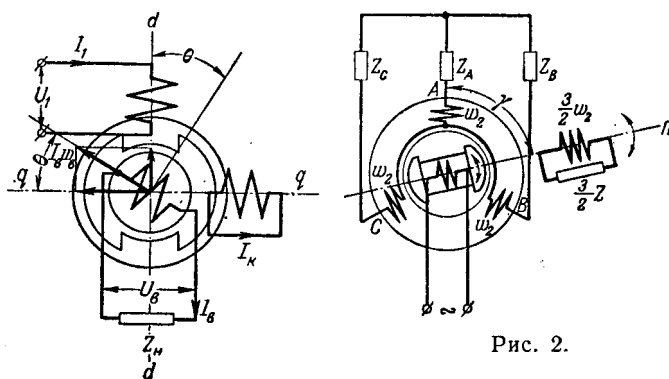


Рис. 1. Схема расположения и включения обмоток синусного поворотного трансформатора.

няет неизменным свое значение:

$$F = 0,9 \omega k I [\cos^2 \gamma + \cos^2 (\gamma - 120^\circ) + \cos^2 (\gamma + 120^\circ)] = 0,9 \frac{3}{2} \omega k I. \quad (11)$$

Отсюда следует, что выполнение вторичных цепей однофазной индукционной машины в виде группы симметрично распределенных обмоток с одинаковыми параметрами эквивалентно наличию во вторичной цепи, показанной на рис. 2, одной однофазной «поворотной» обмотки Π . Для трехфазной вторичной системы (рис. 2) однофазная «поворотная» обмотка при эквивалентности н. с. реакции должна согласно (11) иметь в 1,5 раза большее число витков и обладать в 1,5 раза большими значениями внутренних и внешних сопротивлений по сравнению с обмотками фаз A , B и C . Тогда значение I в (10) соответствует току в этой «поворотной» обмотке и определяется обычным расчетом вторичного тока в однофазном двухобмоточном трансформаторе.

Включение в фазы A , B и C сельсина-датчика вместо трех равных внешних сопротивлений $Z_A = Z_B = Z_C$ трех фаз обмотки статора сельсина-приемника или обмотки ротора дифференциального сельсина приводит, в свою очередь, к образованию и в этих машинах «поворотных» однофазных обмоток. Рассматриваемое выполнение сельсина-приемника с равномерным зазором сохраняет равенство внешних сопротивлений Z_A , Z_B и Z_C в фазах вторичных цепей сельсина-датчика.

Изложенное приводит к выводу об идентичности режимов работы сельсина-приемника в схеме рис. 3 режимам синусного или косинусного поворотного трансформатора (рис. 1). Повороты индуктора сельсина-датчика в системе рис. 3 эквивалентны при этом в устройстве рис. 1 механическим поворотам статора с расположенными на нем входной и квадратурной обмотками.

Изменения в пространственном расположении входной однофазной «поворотной» обмотки сельсина-приемника реализуются за счет описываемой уравнениями (10) и задаваемой угловыми положениями индуктора сельсина-датчика закономерности распределения токов в трех неподвижных фазах вторичных обмоток.

Контуры трех неподвижных фаз во вторичных цепях одновременно с «поворотами» входной обмотки сельсина-приемника создают также условия для аналогичного образования «поворотных» квадратурных однофазных обмоток.

Исходя из изложенных соображений, можно представленную на рис. 3 схему включения каскада из сельсина-датчика, дифференциального сельсина и сельсина-приемника заменить изображенной на рис. 4 реальной схемой действия этого же устройства. При этом все неподвижные трехфазные обмотки во входной и квадратурной вторичных цепях рассматриваемой сельсинной схемы заменяются однофазными «поворотными» обмотками, число витков и сопротивления которых в 1,5 раза увеличены по сравнению с таковыми каждой из фаз реальных обмоток.

Схема действия сельсинного каскада рис. 4 отличается от схемы синусного поворотного трансформатора наличием дополнительных магнитных связей по осям входных и квадратурных обмоток в дифференциальном сельсине и сельсине-датчике. Это увеличивает общее число магнитных связей с 2 на рис. 1 до 6 на рис. 4. Одновременно в сельсинном каскаде по сравнению с поворотным трансформатором число электрических контуров, подлежащих учету, возрастает с 3 до 6.

Пользуясь приведенными в конце статьи обозначениями, можно в следующем виде представить 12 уравнений, описывающих электромагнитные процессы в установившихся режимах синхронных поворотов рассматриваемого сельсинного каскада:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_d &= G_d \left(I_1 \omega_1 k_1 + \frac{3}{2} I_2 \omega_2 k_2 \right); \\ \Phi_{\partial d} &= G_{\partial d} \frac{3}{2} (I_2 \omega_{\partial 1} k_{\partial 1} + I_3 \omega_{\partial 2} k_{\partial 2}); \\ \Phi_{\partial n} &= G_n \left[I_{\partial} \omega_{\partial} \sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{3}{2} I_3 \omega_3 k_3 \right]; \\ -j(c_2 \dot{\Phi}_d + c_{\partial 1} \dot{\Phi}_{\partial d}) &= \frac{3}{2} I_2 Z_2; \\ -j(c_{\partial 2} \dot{\Phi}_{\partial d} + c_3 \dot{\Phi}_{\partial n}) &= \frac{3}{2} I_3 Z_3; \\ -j c_{\partial} [\dot{\Phi}_{\partial n} \sin(\theta_1 + \theta_2) + \dot{\Phi}_{\kappa n} \cos(\theta_1 + \theta_2)] &= I_{\partial} Z_{\partial}; \end{aligned} \right\} (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= I_1 Z_1 + j c_1 \dot{\Phi}_d; \\ \dot{\Phi}_{\kappa n} &= G_n \left[I_{\partial} \omega_{\partial} \cos(\theta_1 + \theta_2) + \frac{3}{2} I_3 \omega_3 k_3 \right]; \\ \dot{\Phi}_{\kappa \partial} &= G_{\partial d} \frac{3}{2} (I_3 \omega_{\partial 2} k_{\partial 2} + I_2 \omega_{\partial 1} k_{\partial 1}); \\ \dot{\Phi}_q &= \frac{3}{2} G_q I_2 \omega_2 k_2; \\ -j(c_2 \dot{\Phi}_q + c_{\partial 1} \dot{\Phi}_{\kappa \partial}) &= \frac{3}{2} I_2 Z_2; \\ -j(c_3 \dot{\Phi}_{\kappa n} + c_{\partial 2} \dot{\Phi}_{\kappa \partial}) &= \frac{3}{2} I_3 Z_3. \end{aligned} \right\} (13)$$

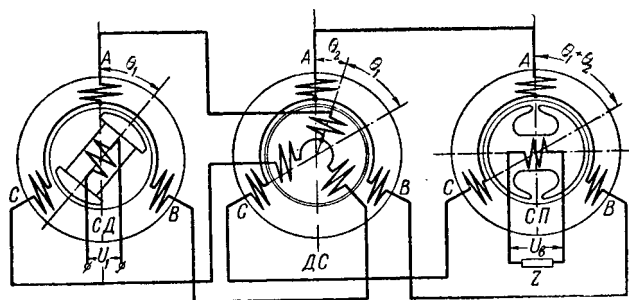


Рис. 3.

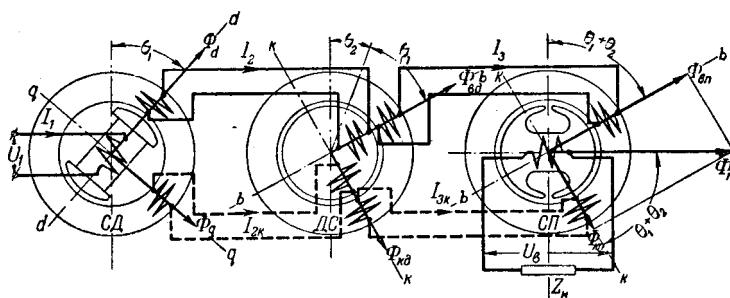


Рис. 4.

Простой путь получения из общей системы уравнений практически удобных способов расчета заключается в определении постоянных четырехполюсника, образуемого каскадом трансформаторных сельсинов. Основными показателями сельсинной схемы являются значения выходных токов и напряжений, оцениваемых согласно (6) постоянными A и B . Для режима холостого хода четырехполюсника надлежит, положив в системе уравнений (12) $I_{\partial} = 0$, определить намагничивающий входной ток сельсина-приемника I'_{30} . Используемая форма записи уравнений (12) и (13) выявляет в ходе их решения значения сопротивлений контуров намагничивания всех сельсинов и указанные в приложении коэффициенты приведения токов, напряжений и сопротивлений всех цепей схемы к первичной (входной) обмотке сельсина-датчика.

Приведенное значение входного тока сельсина приемника в режиме холостого хода будет:

$$I'_{30} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + \dot{c}_1 Z'_2 + \left(\frac{Z_1}{Z'_{\partial d}} + \dot{c}_1 \dot{c}_2 \right) (Z'_3 + Z'_{\partial n})}. \quad (14)$$

$$\text{Коэффициенты } \dot{c}_1 = \frac{Z_1 + Z_0}{Z_0} \text{ и } \dot{c}_2 = \frac{Z_2 + Z_{\partial d}}{Z_{\partial d}} \quad (15)$$

учитывают намагничивающие токи сельсина-датчика и дифференциального сельсина.

Намагничивающему току сельсина-приемника I'_{30} соответствует приведенное значение выходного напряжения в режиме холостого хода:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{\partial 0} &= I'_{30} Z'_{\partial n} \sin(\theta_1 + \theta_2) = \\ &= -\dot{U}_1 \frac{Z'_{\partial n} \sin(\theta_1 + \theta_2)}{Z_1 + \dot{c}_1 Z'_2 + \left(\frac{Z_1}{Z'_{\partial d}} + \dot{c}_1 \dot{c}_2 \right) (Z'_3 + Z'_{\partial n})}. \end{aligned} \quad (16)$$

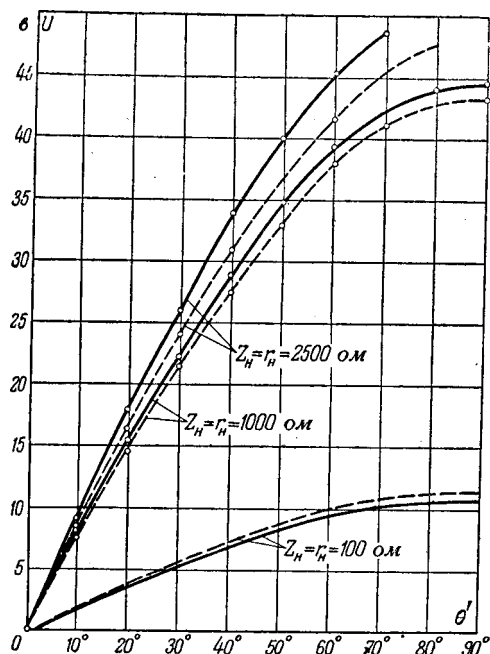


Рис. 5.

Уравнением (16) определяется одна из постоянных четырехполюсника:

$$A = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}'_{00}} = - \frac{Z_1 + \dot{\epsilon}_1 Z'_2 + \left(\frac{Z_1}{Z'_{00}} + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 \right) (Z'_3 + Z'_{0n})}{Z'_{0n} \sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (16a)$$

$$I'_s = \frac{\dot{U}_1}{AZ'_s + B} = - \dot{U}_1 \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\left[Z_1 + \dot{\epsilon}_1 Z'_2 + \left(\frac{Z_1}{Z'_{00}} + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 \right) (Z'_3 + Z'_{0n}) \right] \frac{Z'_s}{Z'_{0n}} + Z_1 + Z'_2 + Z'_3 + (Z'_q - Z_1) \cos^2(\theta_1 + \theta_2)}; \quad (20)$$

$$\dot{U}'_s = I'_s Z'_n = - \dot{U}_1 \frac{Z'_n \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\left[Z_1 + \dot{\epsilon}_1 Z'_2 + \left(\frac{Z_1}{Z'_{00}} + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 \right) (Z'_3 + Z'_{0n}) \right] \frac{Z'_s}{Z'_{0n}} + Z_1 + Z'_2 + Z'_3 + (Z'_q - Z_1) \cos^2(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (21)$$

Определение второй постоянной четырехполюсника требует оценки режима короткого замыкания, описываемого уравнениями (12) и (13) при $Z_s = 0$.

Как это ранее иллюстрировалось на примере синусного поворотного трансформатора, учет в данных условиях намагничивающих токов, внося численно незначительные коррективы в конечные результаты, резко осложняет расчетные соотношения. Для обладающих достаточной точностью приближенных расчетов вторую постоянную четырехполюсника можно определить без учета намагничивающих токов. При этом магнитные связи для режима короткого замыкания в системе уравнений (12), (13) приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} I_1 \omega_1 k_1 + \frac{3}{2} I_2 \omega_2 k_2 &= 0; \\ I_2 \omega_{01} k_{01} + I_3 \omega_{02} k_{02} &= 0; \\ I_s \omega_s \sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{3}{2} I_3 \omega_3 k_3 &= 0; \\ I_s \omega_s \cos(\theta_1 + \theta_2) + \frac{3}{2} I_{3k} \omega_3 k_3 &= 0; \\ I_{3k} \omega_{02} k_{02} + I_{2k} \omega_{01} k_{01} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Из уравнений (12), (13) при учете (17) следует приведенное значение выходного тока четырехполюсника в режиме короткого замыкания:

$$I'_{\kappa s} = - \dot{U}_1 \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{Z_1 + Z'_2 + Z'_3 + (Z'_q - Z_1) \cos^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (18)$$

откуда вторая постоянная четырехполюсника будет:

$$B = \frac{\dot{U}_1}{I'_{\kappa s}} = - \frac{Z_1 + Z'_2 + Z'_3 + (Z'_q - Z_1) \cos^2(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (18a)$$

Входной ток в режиме короткого замыкания и третья постоянная четырехполюсника, равная отношению входного тока к выходному при коротком замыкании, будут:

$$\begin{aligned} I_{\kappa 1} &= \dot{U}_1 \frac{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}{Z_1 + Z'_2 + Z'_3 + (Z'_q - Z_1) \cos^2(\theta_1 + \theta_2)} = \\ &= \dot{U}_1 \frac{0,5 [1 - \cos 2(\theta_1 + \theta_2)]}{Z_1 + Z'_2 + Z'_3 + 0,5 (Z'_q - Z_1) [1 + \cos 2(\theta_1 + \theta_2)]}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$D = \frac{I_{\kappa 1}}{I'_{\kappa s}} = - \sin(\theta_1 + \theta_2). \quad (19a)$$

Наличие значений всех постоянных четырехполюсника позволяет представить расчетные формулы для выходных токов и напряжений сельсинного каскада в следующем виде:

Выражения (20) и (21) дают возможность аналитически определить для каждого из углов рассогласования внешние характеристики сельсинного каскада, представляющие зависимости

$$U_s = f(I_s, \cos \varphi).$$

Для широкого диапазона изменений сопротивлений нагрузки от $Z_n = 0$ до $Z_n = \infty$ при неизменном коэффициенте мощности можно воспользоваться графическими методами расчета, построив по уравнениям (20) и (21) круговые диаграммы выходных токов и напряжений. Удобство последних заключается в иллюстрации абсолютных значений выходных токов и напряжений одновременно с их фазовыми сдвигами относительно входного напряжения \dot{U}_1 .

При отсутствии в схеме рис. 3 дифференциального сельсина выражение (21) упрощается и при учете $Z_{00} = \infty$, $Z_3 = 0$ и $\epsilon_2 = 1$ приобретает вид:

$$\dot{U}'_s = \dot{U}_1 \frac{Z'_n \sin \theta}{[Z_1 + \dot{\epsilon}_1 (Z'_2 + Z'_{0n})] \frac{Z'_s}{Z'_{0n}} + Z_1 + Z'_2 + (Z'_q - Z_1) \cos^2 \theta}. \quad (21a)$$

Сопоставление результатов расчета по формуле (21) с измеренными выходными напряжениями сельсинного каскада¹, включенного по схеме рис. 3, представлено кривыми рис. 5 (сплошные кривые — опытные, пунктирные — расчетные). Достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных при больших нагрузках в выходной цепи ($Z_k = 100 \text{ ом}$) подтверждает отсутствие заметных погрешностей в результате упрощения расчетных формул за счет недоучета намагничивающих токов в режимах короткого замыкания.

Из уравнений (20) и (21) следует условие симметрирования трансформаторных сельсинов, аналогичное первичному симметрированию синусных поворотных трансформаторов (9). В трансформаторных сельсинах задача симметрирования решается в основном за счет конструктивного выполнения сельсина-датчика путем практически возможного соблюдения равенства между собой параметров Z_1 и Z_q .

Потери в обмотках сельсинов. При проектировании сельсинов и их взаимной компоновке необходимы данные для суждения об условиях нагрева всех элементов системы. При этом существенную роль играют потери в первичных и вторичных обмотках каждого из сельсинов.

Для расчета входных токов сельсина-датчика можно воспользоваться обычным для четырехполюсников способом наложения соответствующих режимов холостого хода и короткого замыкания:

$$I_1 = I_{01} + I_{k1}. \quad (22)$$

Уравнения (19) и (19а) оценивают входные токи I_{k1} для режимов короткого замыкания при заданных значениях выходных токов I_a . Входные токи в режимах холостого хода при равномерном зазоре в сельсине-приемнике не зависят от угла рассогласования и определяются соотношением

$$I_0 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + \frac{Z_0 Z'_{II}}{Z_0 + Z'_{II}}}, \quad (23)$$

где

$$Z'_{II} = Z'_2 + \frac{Z'_{02}(Z'_3 + Z'_{0n})}{Z'_{02} + Z'_3 + Z'_{0n}}.$$

Подлежащий учету в (22) ток холостого хода I_{01} для заданного выходного напряжения $\dot{U}_a = I_a Z_k$ при отсутствии насыщений равен:

$$I_{01} = I_0 \frac{\dot{U}_a}{\dot{U}_{a0}}. \quad (24)$$

Наличие значений входных и выходных токов позволяет по приближенным уравнениям магнитных связей (17) или по точным соотношениям (12) и (13) определить токи входных и квадратурных цепей во всех остальных контурах сельсинного каскада.

Для учета потерь в трехфазных обмотках

сельсинов следует иметь в виду закономерность распределения по фазам системы квадратурных однофазных токов. Эта закономерность характеризуется следующей зависимостью токов в отдельных фазах от угла γ между осью поворотной однофазной входной обмотки и осью фазы А:

$$\left. \begin{aligned} I_{A\kappa} &= I_\kappa \sin \gamma; \\ I_{B\kappa} &= I_\kappa \sin (\gamma - 120^\circ); \\ I_{C\kappa} &= I_\kappa \sin (\gamma + 120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Распределение по фазам системы входных однофазных токов определяется уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} I_{A\epsilon} &= I_\epsilon \cos \gamma; \\ I_{B\epsilon} &= I_\epsilon \cos (\gamma - 120^\circ); \\ I_{C\epsilon} &= I_\epsilon \cos (\gamma + 120^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где I_κ и I_ϵ — максимально возможные из эффективных значений токов в отдельных фазах или токи в расчетных „поворотных“ обмотках схемы действия сельсинов рис. 4.

Если через ϵ обозначить временной угол сдвига по фазе между векторами I_ϵ и I_κ , то квадраты абсолютных значений токов в фазах будут:

$$\left. \begin{aligned} I_A^2 &= (I_\epsilon \cos \gamma + I_\kappa \cos \epsilon \sin \gamma)^2 + \\ &\quad + I_\kappa^2 \sin^2 \epsilon \sin^2 \gamma; \\ I_B^2 &= [I_\epsilon \cos (\gamma - 120^\circ) + I_\kappa \cos \epsilon \sin (\gamma - 120^\circ)]^2 + \\ &\quad + I_\kappa^2 \sin^2 \epsilon \sin^2 (\gamma - 120^\circ); \\ I_C^2 &= [I_\epsilon \cos (\gamma + 120^\circ) + I_\kappa \cos \epsilon \sin (\gamma + 120^\circ)]^2 + \\ &\quad + I_\kappa^2 \sin^2 \epsilon \sin^2 (\gamma + 120^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Из (27) следует, что сумма квадратов абсолютных значений токов во всех фазах не зависит ни от пространственных углов γ , ни от временных сдвигов по фазе ϵ , так как

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 = \frac{3}{2} (I_\epsilon^2 + I_\kappa^2). \quad (28)$$

Таким образом, определение потерь в обмотках трех фаз, учитывающее своеобразие распределения и взаимного наложения двух систем однофазных токов, может производиться расчетом потерь во входных и квадратурных «поворотных» обмотках схемы действия сельсинов рис. 4.

$$(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) r = \frac{3}{2} (I_\epsilon^2 + I_\kappa^2) r. \quad (29)$$

Выводы. 1. На базе элементарных соотношений общей теории четырехполюсников получены практические методы расчета выходных и входных данных для основных видов каскадов из трансформаторных сельсинов.

2. Показана достаточная точность расчетов по конечным формулам, резко упрощенным за счет недоучета намагничивающих токов в параметрах короткого замыкания.

3. Иллюстрируются возможности расчета всех

¹ Экспериментальные данные и параметры сельсинов КС-1, КС-2 и ДС-1, подвергнутых испытанию, заимствованы из диссертационной работы И. С. Маркина; расчеты произведены Г. Б. Афанасьевым.

электрических и магнитных связей, включая учет потерь в трехфазных обмотках по параметрам схемы действия сельсинного каскада с однофазными входными и квадратурными «поворотными» обмотками во вторичных цепях.

4. Показана идентичность физических процессов и условий симметрирования в трансформаторных сельсинах и синусных или косинусных поворотных трансформаторах.

Приложение. Приведение к входной обмотке сельсина-датчика сопротивлений, токов и напряжений цепей сельсинного каскада:

$$\begin{aligned} Z'_s &= \left(\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \right)^2 \left(\frac{w_{\partial 1} k_{\partial 1}}{w_{\partial 2} k_{\partial 2}} \right)^2 \left(\frac{w_3 k_3}{w_s} \right)^2 Z_s; \\ Z'_3 &= \frac{2}{3} \left(\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \right)^2 \left(\frac{w_{\partial 1} k_{\partial 1}}{w_{\partial 2} k_{\partial 2}} \right)^2 Z_3; \\ Z'_{0n} &= \frac{2}{3} \left(\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \right)^2 \left(\frac{w_{\partial 1} k_{\partial 1}}{w_{\partial 2} k_{\partial 2}} \right)^2 Z_{0n}; \\ Z'_2 &= \frac{2}{3} \left(\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \right)^2 Z_2; \\ Z'_{0\partial} &= \frac{2}{3} \left(\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \right)^2 Z_{0\partial}; \\ Z'_q &= \frac{2}{3} \left(\frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \right)^2 Z_q = j4,44 G_q (w_1 k_1)^2 f \quad (\text{при } Z_k = \infty). \\ i'_2 &= i_2 \frac{3}{2} \frac{w_2 k_2}{w_1 k_1}; \quad i'_{2k} = i_{2k} \frac{3}{2} \frac{w_2 k_2}{w_1 k_1}; \\ i'_3 &= i_3 \frac{3}{2} \frac{w_2 k_2}{w_1 k_1} \frac{w_{\partial 2} k_{\partial 2}}{w_{\partial 1} k_{\partial 1}}; \quad i'_{3k} = i_{3k} \frac{3}{2} \frac{w_2 k_2}{w_1 k_1} \frac{w_{\partial 2} k_{\partial 2}}{w_{\partial 1} k_{\partial 1}}; \\ i'_s &= i_s \frac{w_2 k_2}{w_1 k_1} \frac{w_{\partial 2} k_{\partial 2}}{w_{\partial 1} k_{\partial 1}} \frac{w_s}{w_3 k_3}; \\ \dot{U}'_s &= \dot{U}_s \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2} \frac{w_{\partial 1} k_{\partial 1}}{w_{\partial 2} k_{\partial 2}} \frac{w_3 k_3}{w_s}. \end{aligned}$$

Принятые обозначения:

Φ_d, Φ_q — потоки по осям входной и квадратурной обмотки поворотного трансформатора или по продольной и поперечной осям сельсина-датчика;
 $\Phi_{\partial d}, \Phi_{\partial n}$ — потоки по осям поворотных входных обмоток дифференциального сельсина и сельсина-приемника;
 Φ_{kd}, Φ_{kn} — потоки по осям поворотных квадратурных обмоток дифференциального сельсина и сельсина-приемника;
 G_d, G_q — магнитные проводимости для потоков, соответствующих первым гармоникам в кривых распределения индукций зазоров, по продольной и поперечной осям сельсина-датчика или по осям входной и квадратурной обмоток поворотного трансформатора;
 G_{∂}, G_n — магнитные проводимости симметричных магнитных систем дифференциального сельсина и сельсина-приемника;
 w_1, w_k, w_s и k_1, k_k — числа витков и обмоточные коэффициенты входной, квадратурной и выходной обмоток. Для выходной обмотки, как сосредоточенной и диаметральной, коэффициент полагается равным единице;
 $w_2, w_{\partial 1}, w_{\partial 2}, w_3$ и $k_2, k_{\partial 1}, k_{\partial 2}, k_3$ — числа витков и обмоточные коэффициенты для каждой из фаз трехфазных обмоток на статоре сельсина-датчика, роторе и статоре дифференциального сельсина и статоре сельсина-приемника;

$c_1, c_k, c_s, c_2, c_{\partial 1}, c_{\partial 2}, c_3$ — коэффициенты пропорциональности между потоками и э. д. с., наводимыми в соответствующих обмотках. Для однофазных обмоток $c = 4,44 w k f$, где f — частота; для расчетных „поворотных“ обмоток $c = 4,44 \frac{3}{2} w k f$.

i_1, i_k, i_s — токи в цепях входной, квадратурной и выходной обмоток;
 i_2, i_3 — токи в контурах поворотных однофазных обмоток во входной цепи сельсинного каскада, соответствующие максимально возможным значениям токов в фазах реальных обмоток;
 $i_{10}, i_{10}, i_{20}, i_{30}$ — токи входной и однофазных поворотных обмоток при разомкнутой выходной цепи;
 i_{k1}, i_{ks} — входной и выходной ток в режиме короткого замыкания при $Z_s = 0$;
 i_{2k}, i_{3k} — токи в контурах квадратурных поворотных однофазных обмоток;
 Z_1, Z_k — комплексные значения сопротивлений входной и квадратурной обмоток;
 $Z_s = Z_k + Z_{0s}$ — комплексное значение сопротивления выходного контура, равное сумме сопротивлений нагрузки и выходной обмотки;
 Z_2 — сумма комплексных значений сопротивлений одной фазы обмотки статора сельсина-датчика и одной фазы обмотки ротора дифференциального сельсина;
 Z_3 — сумма комплексных значений сопротивлений одной фазы обмотки статора дифференциального сельсина и одной фазы обмотки статора сельсина-приемника;
 \dot{E}_s — э. д. с. выходной обмотки;
 \dot{U}_s — напряжение выходной обмотки;
 $\dot{E}_{s0} = \dot{U}_{s0}$ — напряжение выходной обмотки в режиме холостого хода;
 \dot{U}_1 — напряжение входной обмотки;
 $Z_0 = jx_0 = j c G_d w_1 k_1 = j4,44 G_d (w_1 k_1)^2 f$ — сопротивление намагничивающего контура входной цепи сельсина-датчика;
 $Z_{0\partial} = jx_{0\partial} = j c_{\partial 1} G_d w_{\partial 1} k_{\partial 1} = j4,44 G_{\partial} \frac{3}{2} (w_{\partial 1} k_{\partial 1})^2 f$ — сопротивление намагничивающего контура входной цепи дифференциального сельсина;
 $Z_{0n} = jx_{0n} = j c_3 G_n w_3 k_3 = j4,44 G_n \frac{3}{2} (w_3 k_3)^2 f$ — сопротивление намагничивающего контура входной цепи сельсина-приемника;
 $Z_{0q} = jx_{0q} = j c_2 G_q w_2 k_2 = j4,44 G_q \frac{3}{2} (w_2 k_2)^2 f$ — сопротивление намагничивающего контура по поперечной оси сельсина-датчика.

Литература

1. А. Г. Иосифьян. О линейных преобразованиях токов электрических машин. Бюллетень ВЭИ, № 8, 1940.
2. А. Г. Иосифьян и В. М. Коган. Основы следящего привода. Госэнергоиздат, 1954.
3. Под редакцией А. Н. Ларионова. Основы электрооборудования самолетов и автомашин. Госэнергоиздат, 1955.
4. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники, ч. 2. Госэнергоиздат, 1948.
5. Р. А. Воронов. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. Госэнергоиздат, 1951.
6. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. Издательство Академии наук СССР, 1951.
7. Б. И. Станиславский. Основы теории электрических счетно-решающих устройств. Оборонгиз, 1948.
8. Электротехнический справочник, т. II. Госэнергоиздат, 1955.

[27. II. 1956]



Оптимальные параметры системы ионного самовозбуждения синхронных генераторов

Инж. А. А. ВИНОГРАДОВ

Всесоюзный заочный энергетический институт

Использование систем возбуждения с высокой форсировочной способностью является одним из эффективных средств повышения устойчивости параллельной работы электрических станций и нагрузки в единой электрической системе [Л. 1]. Однако обеспечение высокой скорости нарастания напряжения возбудителя при большом токе ротора мощного синхронного генератора связано со значительным усложнением машинной системы возбуждения и существенным увеличением ее стоимости.

Высокая скорость нарастания возбуждения при относительной простоте схемы установки может быть получена при использовании для возбуждения машины выпрямительной установки с управляемыми ртутными вентилями — системы ионного возбуждения [Л. 2 ... 4]. По способу питания выпрямительной установки системы ионного возбуждения можно разделить на системы независимого возбуждения и системы ионного самовозбуждения.

Основными преимуществами системы ионного самовозбуждения с серийными трансформаторами (рис. 1) по сравнению с системой независимого возбуждения являются меньшая стоимость установки и отсутствие вращающихся машин и соответствующее повышение надежности работы установки при меньших эксплуатационных расходах, связанных с ее обслуживанием.

Несмотря на известные преимущества системы ионного самовозбуждения, до настоящего време-

ни не уделялось достаточного внимания как вопросам исследования переходных процессов в генераторах, имеющих систему ионного самовозбуждения, так и вопросам выбора оптимальных параметров ионных возбудителей.

Выражения для отдельных параметров ионного возбудителя, полученные с учетом искажения формы кривых напряжения и тока статора при коммутации вентилей, являются весьма сложными [Л. 5, 6] и не связаны с величиной расчетной мощности серийных трансформаторов при заданной величине форсирования возбуждения при трехфазном коротком замыкании в цепи статора.

В настоящей статье рассматривается методика выбора оптимальных параметров ионного возбудителя, характеризующегося наименьшей возможной мощностью серийных трансформаторов. Методика базируется на анализе переходных процессов, возникающих при трехфазном коротком замыкании при различной начальной кратности напряжения возбуждения.

Характеристики и параметры ионного возбудителя рассматриваются применительно к двум наиболее целесообразным схемам выпрямления [Л. 4]: трехфазной мостовой схеме и схеме с однофазным уравнивающим реактором.

Переходные процессы при трехфазном коротком замыкании. Без учета трансформаторных э. д. с. статора [Л. 7] система дифференциальных уравнений генератора с успокоительными обмотками может быть представлена в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} x_{ad} i_s + x_d i_d + x_{ad} i_{1d} &= 0; \\ x_{ad} \frac{di_s}{d\tau} + x_d \frac{di_d}{d\tau} + x_{1d} \frac{di_{1d}}{d\tau} + r_{1d} i_{1d} &= 0; \\ x_s \frac{di_s}{d\tau} + x_{ad} \frac{di_d}{d\tau} + x_{ad} \frac{di_{1d}}{d\tau} + r_s i_s &= U_s, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где i_d — продольная составляющая тока статора,

i_{1d} — ток в успокоительной обмотке;

i_s — ток в обмотке возбуждения;

U_s — напряжение на обмотке возбуждения;

$\tau = \omega_c t$ (ω_c — синхронная круговая частота).

В этой системе уравнений все величины, относящиеся к успокоительной обмотке и обмотке возбуждения, приведены к цепи статора.

При анализе переходных процессов все величины выражаются в относительных единицах, причем за базисные единицы принимаются амплитудные значения номинального фазного напряжения и номинального тока статора.

В системе ионного самовозбуждения напряжение возбуждения определяется параметрами установки и величиной э. д. с. в цепи статора — внутренней э. д. с. ионного возбудителя, имеющей практически синусоидальный характер.

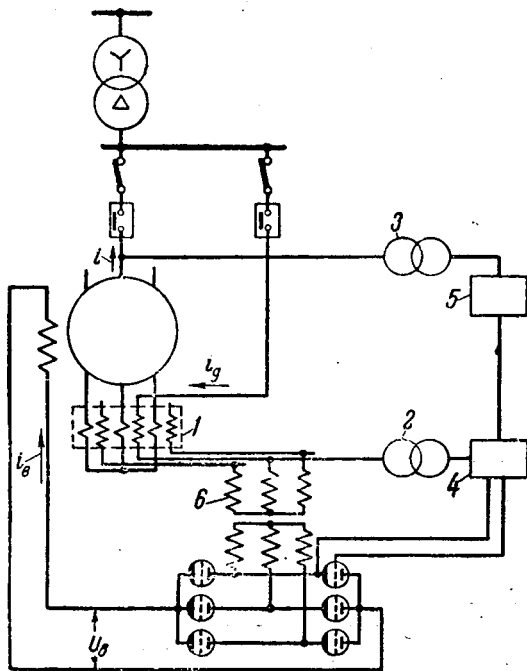


Рис. 1. Принципиальная схема системы ионного самовозбуждения.

1 — серийные трансформаторы; 2 — трансформатор собственных нужд выпрямителя; 3 — трансформатор напряжения; 4 — шкаф управления ртутным выпрямителем; 5 — автоматический регулятор возбуждения; 6 — анодный трансформатор.

Зависимость между напряжением U_s , внутренней э. д. с. ионного возбудителя E_1 , током i_s и падением напряжения в дуге вентилей ΔU может быть представлена уравнением внешней характеристики ионного возбудителя, записанным в относительных величинах. При углах коммутации вентилей $\gamma < \frac{\pi}{3}$ это уравнение имеет следующий вид:

$$U_s = \frac{k \cdot k_{cx}}{\sqrt{2} k_T} E_1 \cos \alpha + C_\kappa x_\kappa i_s - a \Delta U, \quad (2)$$

где $k = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{I_{sx}}{I_n} x_{ad0}$ — коэффициент приведения на-

пряжений в цепи возбуждения к цепи статора;

I_{sx} — ток возбуждения холостого хода, а;

I_n — номинальный ток генератора, а;

x_{ad0} — взаимное индуктивное сопротивление статора и обмотки возбуждения при холостом ходе генератора (в относительных единицах);

k_{cx} — коэффициент выпрямления ($k_{cx} = 2,34$ в мостовой схеме и $k_{cx} = 1,17$ в схеме с уравнительным реактором);

k_T — коэффициент трансформации анодного трансформатора;

α — угол запаздывания зажигания вентилей;

C_κ — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления ($C_\kappa = 3/\pi$ в мостовой схеме и $C_\kappa = 3/4\pi$ в схеме с уравнительным реактором);

x_κ — индуктивное сопротивление в цепи ионного возбудителя (в относительных единицах);

a — «тактность» схемы ($a = 2$ в мостовой схеме и $a = 1$ в схеме с уравнительным реактором).

Поскольку номинальная мощность возбуждения мала по сравнению с номинальной мощностью статора (при $S_n \geq 1200$ кВА $P_{сн} \leq 0,01 S_n$), то влияние токов выпрямителя на напряжение и ток генератора весьма мало. В связи с этим кривые напряжения и тока являются практически синусоидальными и мгновенное значение внутренней э. д. с. ионного возбудителя может быть определено следующим равенством:

$$e_1 = u + x_\kappa \frac{di}{d\tau} = u + e_{гII}, \quad (3)$$

где u и i — мгновенные значения напряжения и тока генератора;

x_κ — взаимное индуктивное сопротивление обмоток серийного трансформатора;

$e_{гII}$ — внутренняя э. д. с. вторичной обмотки серийного трансформатора.

Учитывая, что $u = U \sin \tau$ и $i = I \sin (\tau - \varphi)$, найдем из уравнения (3) эффективное значение

внутренней э. д. с. ионного возбудителя при установившемся режиме работы генератора:

$$E_1 = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + x_\kappa I)^2}. \quad (4)$$

Пренебрегая при переходном процессе влиянием производных амплитуд отдельных составляющих тока генератора на амплитуду внутренней э. д. с. ионного возбудителя, из равенства (4) найдем значение внутренней э. д. с. возбудителя при трехфазном коротком замыкании (в этом случае $U = -i_d x_{сн}$, $I \approx -i_d$, $\varphi \approx \pi/2$):

$$E_1 = -(x_{сн} + x_\kappa) i_d, \quad (5)$$

где $x_{сн}$ — внешнее сопротивление в цепи генератора (от выводов статора до места повреждения).

Форсирование возбуждения генератора осуществляется благодаря практически мгновенному полному открытию вентилей ($\alpha = 0$). В этом случае для трехфазного короткого замыкания уравнение (2) записывается в следующем виде:

$$U_s = -\frac{k \cdot k_{cx}}{\sqrt{2} k_T} \frac{(x_{сн} + x_\kappa) x_{ad}}{x_d} \frac{x_d}{x_{ad}} i_d - C_\kappa x_\kappa i_s - a \Delta U. \quad (6)$$

При совместном решении уравнений (1) и (6) автором получены следующие выражения для мгновенных значений токов генератора, постоянных времени T'_d , T''_d и начальных переходных токов ротора и статора I'_s , I'_d (с учетом влияния успокоительных контуров на T'_d , I'_s , I'_d):

$$i_s = -\frac{a \Delta U}{C r_s} + \left(I'_s + \frac{a \Delta U}{C r_s} \right) e^{\frac{\tau}{T'_d}} + I''_s e^{\frac{\tau}{T''_d}}; \quad (7)$$

$$T'_d = -\frac{1+q}{2C} a_T (T'_s + T'_{1d}); \quad T''_d = \frac{2\sigma'_p T'_s T'_{1d}}{a_T (1+q) (T'_s + T'_{1d})}; \quad (8)$$

$$I'_s = I_{s[0]} + \frac{T'_{1d} - T''_d}{T'_d + T''_d} \left(I_{s[0]} + \frac{a \Delta U}{C r_s} \right) + \frac{T'_{1d} + T'_d}{T'_d + \sigma_1 T'_{1d}} \frac{x_d - x'_{du}}{x_{ad}} \frac{U_{d[0]}}{x'_{du}}; \quad (9)$$

$$I'_d = I_{d[0]} + \frac{x_{ad}}{x_d} \frac{\sigma_1 T'_{1d} - T''_d}{T'_d + T''_d} \left(I_{s[0]} + \frac{a \Delta U}{C r_s} \right) + \frac{U_{d[0]}}{x'_{du}}. \quad (10)$$

В уравнениях (9), (10) обозначено:

$I_{s[0]}$ и $I_{d[0]}$ — ток возбуждения и продольная составляющая тока статора в режиме, предшествовавшем короткому замыканию;

$U_{d[0]}$ — продольная составляющая напряжения в расчетной точке цепи статора до короткого замыкания;

$T'_s = \sigma'_s T_s$, $T'_{1d} = \sigma'_1 T_{1d}$ — постоянные времени обмотки возбуждения и успокоительного контура при замкнутом статоре;

T_s и T_{1d} — то же при разомкнутом статоре;

$$C = 1 + C_\kappa \frac{x_\kappa}{r_s} - \frac{k \cdot k_{cx} (x_{sn} + x_m) x_{ad}}{\sqrt{2} k_T x_d};$$

$$q = \sqrt{1 - \frac{4C\sigma'_p T'_s T'_{1d}}{a_T^2 (T'_s + T'_{1d})^2}};$$

$$\sigma'_p = \frac{\sigma'_s \sigma_1 + \sigma'_1 \sigma_s - \sigma_1 \sigma_s}{\sigma'_s \sigma'_1};$$

$$\sigma_s = 1 - \frac{x_{ad}}{x_s}; \quad \sigma_1 = 1 - \frac{x_{ad}}{x_{1d}};$$

$$\sigma'_s = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_d x_s}, \quad \sigma'_1 = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_d x_{1d}};$$

$$a_T = 1 + \frac{T'_{1d}}{T_s + T'_{1d}} \left[\left(1 - \frac{\sigma_1}{\sigma'_1} \right) C_\kappa \frac{x_\kappa}{r_s} + \frac{\sigma_1}{\sigma'_1} (C - 1) \right].$$

В этих же уравнениях синхронное индуктивное сопротивление цепи статора при ионном самовозбуждении равно:

$$x'_{du} = \frac{2qa_T (T'_s + T'_{1d}) x_d x''_d}{a_T (q-1) (T'_s + T'_{1d}) (x_d + x''_d) + 2(T_s + a_1 T_{1d}) x''_d},$$

причем

$$a_1 = (1 - \sigma_1) \left(1 + C_\kappa \frac{x_\kappa}{r_s} \right) + \sigma_1 C.$$

Входящий в уравнения (7) ... (10) коэффициент C является весьма важной величиной, определяющей характер переходного процесса в зависимости от параметров ионного возбудителя и цепи статора.

В соответствии с уравнением (7) постоянно

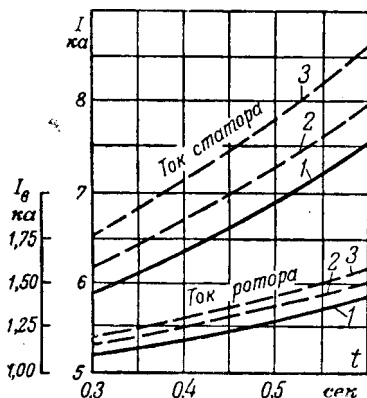


Рис. 2. Изменение токов гидрогенератора 55 Мвт в режиме самовозбуждения.

1 — опытные кривые; 2 — расчетные кривые с учетом полного сопротивления x_{gl} первичной обмотки серийного трансформатора; 3 — то же без учета x_{gl} .

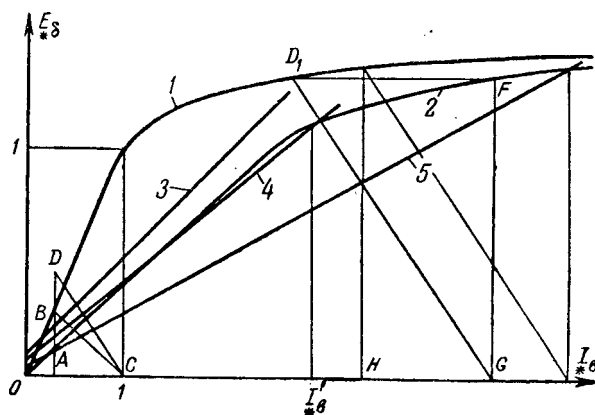


Рис. 3. Определение токов установившегося режима трехфазного короткого замыкания.

1 — характеристика холостого хода генератора; 2 — нагрузочная характеристика генератора; 3 — характеристика возбудителя при $kU < kU_{onm}$; 4 — то же при $kU = kU_{onm}$; 5 — то же при $kU > kU_{onm}$.

Построение нагрузочной характеристики: $AB = OKZ \cdot x_s$; $AD = OKZ (x_s + x_{sn})$; $C_1 D_1 \parallel CD$; F — точка нагрузочной характеристики.

Токи в установившемся режиме:

$$I_{s\infty} = OG; \quad I_{d\infty} = \frac{CH}{AC} \cdot OKZ.$$

переходного тока ротора обеспечивается при условии

$$I'_s + \frac{a \Delta U}{C r_s} = 0,$$

откуда находится соответствующее этому режиму оптимальное значение коэффициента C :

$$C_{onm} = - \frac{a \Delta U}{r_s I'_s}. \quad (11)$$

Для того чтобы после отключения короткого замыкания повысить динамическую устойчивость генераторов, целесообразно выбрать параметры ионного возбудителя таким образом, чтобы обеспечивалось постоянство или нарастание (режим самовозбуждения) переходного тока ротора и переходной э. д. с. генератора во время короткого замыкания в расчетной точке (в начале линии электропередачи — при соединении генератора в блок с повышающим трансформатором).

Режим самовозбуждения имеет место при $C < C_{onm}$, так как в этом случае

$$I'_s + \frac{a \Delta U}{C r_s} > 0, \quad T'_d > 0.$$

При $C > C_{onm}$ имеет место затухающий переходный процесс с уменьшением токов и э. д. с. генератора до нулевых значений, поскольку в данном случае напряжение возбуждения и энергия, передаваемая из цепи статора в цепь возбуждения, недостаточны для обеспечения постоянства токов машины.

Результаты расчета токов для гидрогенератора без успокоительных обмоток ($T_{1p} = 0$) мощностью 55 Мвт, установленного в системе Мосэнерго, достаточно близко совпадают с опытными

данными (рис. 2), определенными автором по осциллограмме переходного процесса этого гидрогенератора¹.

Предельные значения токов $I_{d\infty}$ и $I_{s\infty}$ в режиме самовозбуждения (без учета насыщения анодного и серийного трансформаторов) весьма просто определяются по точке пересечения нагрузочной характеристики генератора и характеристики возбудителя (рис. 3), из которых первая определяется по характеристике холостого хода при известных величинах ОКЗ, $x_{сн}$ и сопротивления рассеяния статора x_s , а вторая легко находится из уравнения (6) при следующей подстановке:

$$-i_d = \frac{E_{66}}{x_s + x_{сн}}; U_s = r_s i_s = r_s \frac{I_{*s}}{x_{ad0}}$$

(I_{*s} — отношение тока возбуждения к току возбуждения холостого хода).

Учитывая, что сверхпереходные составляющие токов ротора и статора затухают быстро, начальная кратность форсирования возбуждения k_U (отношение начального напряжения возбуждения при коротком замыкании к номинальному напряжению возбуждения) может быть определена из уравнения (6) при подстановке $-i_d = I'_d$ и $i_s = I'_s$. Принимая далее $C = C_{онм}$, $x_d I'_d = x_{ad} I'_s$, получим кратность форсирования возбуждения, при которой обеспечивается постоянство переходных токов ротора и статора:

$$k_{Uонм} = \frac{r_s I'_s}{r_{сн} I_{сн}} \approx \frac{I'_s}{I_{сн}}, \quad (12)$$

где $I_{сн}$ — номинальный ток возбуждения;

$r_{сн}$ — сопротивление обмотки возбуждения в номинальном режиме.

Следовательно, условие самовозбуждения может быть записано также в следующем виде:

$$k_U > k_{Uонм},$$

т. е. режим самовозбуждения при трехфазном коротком замыкании обеспечивается в том случае, если начальная кратность форсирования возбуждения больше отношения начального переходного тока ротора к номинальному току возбуждения.

Выбор оптимальных параметров ионного возбудителя. Для определения оптимальных параметров ионного возбудителя необходимо рассмотреть характер зависимости расчетных мощностей обмоток анодного и серийного трансформаторов от угла коммутации клапанов². Расчетная мощность обмотки определяется эффективным значением тока в обмотке при номинальном режиме генератора и расчетным напряжением, соответ-

ствующим заданной кратности форсирования возбуждения при трехфазном коротком замыкании.

Расчетные мощности первичной и вторичной обмоток анодного трансформатора и его типовая мощность определяются следующими выражениями:

$$S_{T1} = 3U_{T1} I_{1н} = 3G_1 U_{T2} I_{сн};$$

$$S_{T2} = m_2 U_{T2} I_{2н} = m_2 G_2 U_{T2} I_{сн};$$

$$S_T = \frac{1}{2}(S_{T1} + S_{T2}) = \frac{1}{2}(3G_1 + m_2 G_2) U_{T2} I_{сн}, \quad (13)$$

где U_{T1} , U_{T2} — расчетные номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток;

$I_{1н}$, $I_{2н}$ — эффективные значения токов трансформатора при номинальном токе возбуждения;

G_1 , G_2 — коэффициенты, связывающие эффективные значения токов в обмотках трансформатора с величиной выпрямленного тока (для трехфазной мостовой схемы $G_1 = G_2 = 0,817$, для схемы с уравнительным реактором $G_1 = 0,408$ и $G_2 = 0,289$);

m_2 — число фаз вторичной обмотки ($m_2 = 3$ и $m_2 = 6$ соответственно для рассматриваемых схем).

Расчетные мощности первичной и вторичной обмоток и типовая мощность серийного трансформатора (на одну фазу) следующие:

$$S_{g1} = U_{g1} I_{г} = \frac{1}{k_g} U_{g2} I_{г};$$

$$S_{g2} = U_{g2} I_{г} \approx U_{g2} I_{1н} = \frac{1}{k_T} G_1 U_{g2} I_{сн};$$

$$S_g = \frac{1}{2}(S_{g1} + S_{g2}) = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{г}}{k_g} + \frac{G_1 I_{сн}}{k_T} \right) U_{g2}, \quad (14)$$

где U_{g1} , U_{g2} — расчетные номинальные напряжения обмоток;

$I_{г}$ — эффективное значение тока во вторичной обмотке;

k_g — коэффициент трансформации.

В соответствии с равенствами (13) и (14) для определения зависимостей расчетных мощностей от угла коммутации γ необходимо найти соответствующие выражения расчетных номинальных напряжений U_{T2} , U_{g2} и коэффициентов трансформации k_T и k_g от угла γ .

В качестве расчетных номинальных напряжений обмоток целесообразно принять такие величины, которые связаны с амплитудой общего магнитного потока в сердечнике трансформатора так же, как и при синусоидальных кривых э. д. с. и потоков:

$$U = \pi \sqrt{2} f \omega \Phi_{макс}.$$

Как известно, токи клапанов несинусоидальны, а следовательно, э. д. с. и напряжения обмоток анодного и серийного трансформаторов также

¹ Испытания проводились работниками треста „Электропривод“, завода „Уралэлектрораппарат“, системы Мосэнерго и ЦНИЭЛ МЭС СССР в июне 1956 г.

² При выборе параметров возбудителя все величины выражаются в именованных единицах.

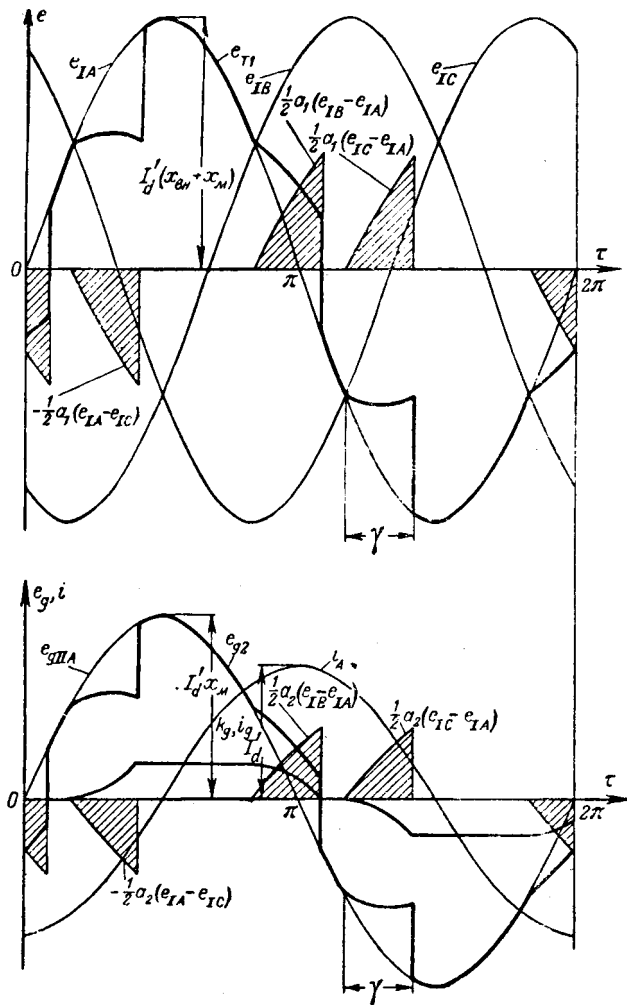


Рис. 4. Кривые действительных э. д. с. и токов в обмотках трансформаторов. Значения коэффициентов a_1 и a_2

$$a_1 = 1 - \frac{1}{2} \frac{x_T}{x_k}; \quad a_2 = \frac{k_g x_m}{k_T^2 x_k}.$$

имеют зависящую от угла коммутации несинусоидальную форму кривой, которая весьма просто может быть построена по синусоидам внутренней э. д. с. ионного возбудителя e_I и внутренней э. д. с. вторичной обмотки серийного трансформатора e_{gII} . Поскольку магнитный поток и э. д. с. связаны известным равенством

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -2\pi f w \frac{d\Phi}{d\tau},$$

то величина $f w \Phi_{\max}$, а следовательно, и расчетные напряжения обмоток могут быть выражены через соответствующую внутреннюю э. д. с. и угол коммутации.

В рассматриваемых схемах выпрямления кривая тока первичной обмотки анодного трансформатора симметрична относительно оси времени, поэтому кривые э. д. с. и магнитных потоков также симметричны, а амплитуда потока связана

со средним значением э. д. с. известным соотношением:

$$E_{cp} = 4f w \Phi_{\max}.$$

С учетом этого соотношения найдем, что

$$U = 1,11 E_{cp}.$$

Среднее значение э. д. с. первичной обмотки анодного трансформатора или вторичной обмотки серийного трансформатора определяется по кривым e_{T1} или e_{g2} (рис. 4). Например, для анодного трансформатора при $\gamma > \frac{\pi}{6}$ получим:

$$\begin{aligned} E_{cp} &= \frac{1}{\pi} \int_{\gamma - \frac{\pi}{6}}^{\pi + (\gamma - \frac{\pi}{6})} e_{T1} d\tau = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\gamma - \frac{\pi}{6}}^{\pi + (\gamma - \frac{\pi}{6})} e_{IA} d\tau - \right. \\ &\quad \left. - \frac{a_1}{2} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6} + \gamma} (e_{IA} - e_{IC}) d\tau + \frac{a_1}{2} \int_{\frac{5}{6}\pi}^{\frac{5}{6}\pi + \gamma} (e_{IB} - e_{IA}) d\tau \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\gamma - \frac{\pi}{6}}^{\pi + (\gamma - \frac{\pi}{6})} e_{IA} d\tau = 0,9 E_I \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right). \end{aligned}$$

Среднее значение э. д. с. серийного трансформатора определяется аналогично, но при замене e_{T1} , e_{IA} (для первого интеграла в квадратных скобках), E_I и коэффициента a_1 соответственно на e_{g2} , e_{gII} , E_{gII} и a_2 . Каждый из коэффициентов a_1 или a_2 является отношением сопротивления, определяющего падение напряжения во время коммутации вентилей, к полному сопротивлению x_k в фазе выпрямителя (величины a_1 и a_2 даны на рис. 4).

С учетом последнего равенства определяется общее выражение расчетного номинального напряжения через внутреннюю э. д. с. и угол γ :

$$U = E \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right),$$

где E — эффективное значение соответствующей внутренней э. д. с.

Принимая при расчете параметров возбудителя токи статора и обмотки возбуждения равными начальным переходным токам, вычисленным без учета влияния ионного возбудителя, получим в соответствии с равенством (5):

$$E_I = \frac{I'_d}{\sqrt{2}} (x_{sn} + x_m);$$

$$E_{gII} = \frac{I'_d}{\sqrt{2}} x_m,$$

и далее найдем расчетные номинальные напряжения обоих трансформаторов:

$$U_{T1} = \frac{I'_d}{\sqrt{2}} (x_{sn} + x_m) \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right); \quad U_{T2} = \frac{U_{T1}}{k_T}; \quad (15)$$

$$U_{g2} = \frac{I'_d}{\sqrt{2}} x_m \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right). \quad (16)$$

На основании зависимости между выпрямленным напряжением и углом коммутации [Л. 8, 9] находим коэффициент трансформации анодного трансформатора:

$$k_T = \frac{k_{cx} I'_d (x_{\text{вн}} + x_m) (1 + \cos \gamma)}{2 \sqrt{2} (k_U U_{\text{вн}} + a \Delta U)}. \quad (17)$$

Учитывая равенства (15) и (17), получим:

$$U_{T2} = \frac{2 (k_U U_{\text{вн}} + a \Delta U)}{k_{cx} (1 + \cos \gamma)} \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right). \quad (18)$$

Зависимость коэффициента трансформации серийного трансформатора от угла коммутации вентилей находится при совместном решении уравнения внешней характеристики ионного возбuditеля

$$K_U U_{\text{вн}} = \frac{k_{cx} I'_d (x_{\text{вн}} + x_m)}{\sqrt{2} k_T} - C_k x_k I'_s - a \Delta U,$$

равенства

$$x_k = \frac{(1 + \sigma_{g2}) k_g x_m}{k_T^2} + \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{T2}}{G_1 I_{\text{вн}}}$$

(σ_{g2} — коэффициент рассеяния вторичной обмотки серийного трансформатора) и зависимостей (17) и (18). В результате получим:

$$k_g = 0,72 \frac{[I'_d (x_{\text{вн}} + x_m)]^2}{x_m P_{\text{вн}} (k_U + a \Delta U / U_{\text{вн}}) (1 + \sigma_{g2})} \times \\ \times \left[\frac{I_{\text{вн}}}{I'_s} \sin^2 \gamma - \frac{u_k \%}{100} (1 + \cos \gamma) \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right) \right]. \quad (19)$$

При $\gamma < \frac{\pi}{6}$ в полученных выше выражениях множитель $\cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right)$ должен быть исключен.

С целью повышения надежности работы аппаратуры собственных нужд выпрямителя при коротком замыкании и возможного уменьшения угла запаздывания зажигания вентилей при номинальном режиме генератора целесообразно выбрать величину x_m таким образом, чтобы обеспечивалось равенство внутренних э. д. с. ионного возбuditеля в обоих режимах. В этом случае условием для расчета взаимного индуктивного сопротивления обмоток серийного трансформатора является равенство правых частей уравнений (4) и (5) при подстановке: $U = I = 1,0$; $\varphi = \varphi_k$; $-i_d = I'_d$.

При подстановке в (13) и (14) полученных выше выражений (15)...(19) определяются зависимости расчетных мощностей от угла коммутации при соответствующих начальных переходных токах и принятой кратности форсирования возбуждения. Для примера на рис. 5 приведены кривые мощностей и коэффициентов трансформации, построенные по результатам расчетов, выполненных автором применительно к установке ионного самовозбуждения для гидрогенератора мощностью 55 Мвт.

Анализ полученных выше зависимостей позволяет сделать следующие выводы. При увеличении угла γ коэффициент k_g резко увеличивается,

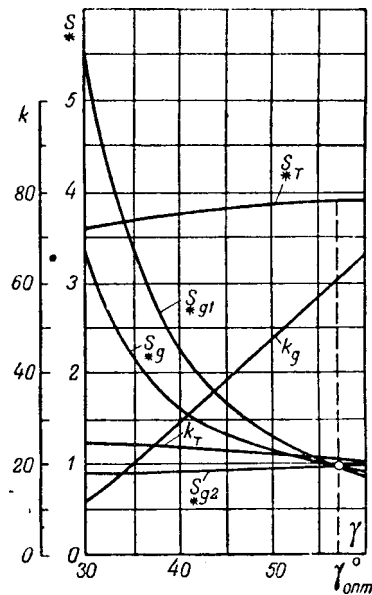


Рис. 5. Зависимость параметров ионного возбuditеля от угла коммутации вентилей. (Указанные значения мощностей, отнесенных к номинальной мощности возбуждения).

а следовательно, мощность первичной обмотки серийного трансформатора S_{g1} уменьшается. Мощность вторичной обмотки S_{g2} , наоборот, увеличивается незначительно. Расчетная мощность серийного трансформатора уменьшается с ростом угла γ и достигает наименьших значений вблизи предельного угла $\gamma_{\text{пред}} = \pi/3$. Расчетная мощность выпрямительного трансформатора незначительно увеличивается с ростом γ .

С целью уменьшения размеров серийного трансформатора и снижения стоимости установки в целом целесообразно определять параметры ионного возбuditеля при минимальной расчетной мощности серийного трансформатора либо при равенстве мощностей обмоток, если минимум расчетной мощности не имеет места при углах γ меньше предельного.

В результате определения угла $\gamma = \gamma_{\text{опт}}$, соответствующего наименьшей возможной мощности серийного трансформатора, однозначно определяются оптимальные параметры ионного возбuditеля: мощности, напряжения и сопротивления обмоток обоих трансформаторов.

Следует отметить, что для расчета магнитной цепи серийного трансформатора необходимо также знать амплитудное значение намагничивающего тока. Кривая намагничивающего тока определяется равенством

$$i_0 = i - k_g i_g,$$

а максимальное значение тока определяется из следующих соображений.

При трехфазном коротком замыкании и форсировании возбуждения окончание коммутации вентилей сдвинуто на угол $\gamma - \frac{\pi}{6}$ относительно

Об одном численном методе расчета некоторых электрических цепей

Инж. В. М. БОНДАРЕНКО и доктор техн. наук, проф. Г. Е. ПУХОВ
Таганрогский радиотехнический институт

В настоящее время методика расчета линейных электрических цепей разработана сравнительно хорошо. Все предложенные методы предполагают или составление и решение систем уравнений, или преобразование (свертывание) схемы, что затруднительно в случае сложных цепей. Ниже предлагается метод, позволяющий производить расчет определенного класса электрических цепей не только без совместного решения большой системы уравнений, но и без существенного преобразования цепи. Этим методом нельзя получить решение в общем виде, но зато можно просто найти численные значения токов.

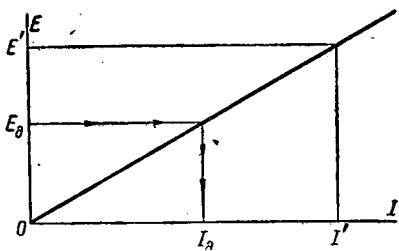


Рис. 1.

При расчете линейной цепи с одной э. д. с. выберем одну из ветвей, для которой зададимся произвольным значением тока I' . Для этого значения тока находим токи и напряжения в других ветвях и соответствующее им значение э. д. с. E' . Пусть эта величина окажется в k раз больше действительно приложенной э. д. с. E_0 . Ясно, что действительное значение тока I , в выбранной ветви будет в k раз меньше тока I' . Рис. 1 иллюстрирует это графически. Прямая $E = f(I)$ дает

зависимость необходимой э. д. с. от величины тока в ветви, по которой производится расчет. Точно так же для получения действительных значений токов в остальных ветвях их значения, найденные по току I' , должны быть уменьшены в k раз.

Такой метод пропорционального пересчета можно обобщить и на случай цепи с любым числом э. д. с. Пусть действительное значение одной из э. д. с. будет E_0 . Представим себе, что величина этой э. д. с. может изменяться. Поскольку рассматриваемая цепь линейна, то закон изменения тока в любой ветви в зависимости от вели-

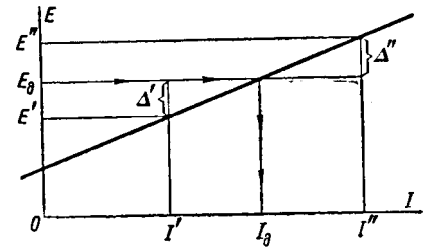


Рис. 2.

чины этой э. д. с. будет также линейным. Однако в отличие от случая с одной э. д. с. прямая $E = f(I)$ (рис. 2) не будет проходить через начало координат. Поэтому для решения задачи необходимо задаваться двумя произвольными значениями тока I' и I'' . Вычисляя для этих случаев сумму падений напряжений в контуре, содержащем рассматриваемую э. д. с., найдем фиктивные значения этой э. д. с. E' и E'' . На рис. 2 стрелками показано, как графически найти действительное значение тока I_0 .

максимума тока статора (рис. 4). Следовательно, при $i_d = -I'_d$ находим:

$$I_{0 \max} = I'_d \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right).$$

Учитывая, что при $\gamma < \frac{\pi}{3}$ значение $\cos \left(\gamma - \frac{\pi}{6} \right)$ мало отличается от единицы, при практических расчетах серийного трансформатора можно принимать амплитуду намагничивающего тока равной начальному переходному току статора.

Литература

1. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.
2. Е. Л. Эттингер. Возбуждение синхронных машин от управляемых ртутных выпрямителей. Бюллетень ВЭИ, № 1, 1940.

3. H. A. Langstaff, H. R. Vaughan, R. E. Lawrence. Application and Performance of Electronic Exciters for Large a. c. Generators. El. Eng., т. 65, стр. 246.
4. Е. Л. Эттингер, Г. В. Чалый и Е. М. Глух. Опытная установка ионного возбуждения на мощной гидростанции. Электричество, № 4, 1955.
5. М. Г. Шехтман. Работа генератора на выпрямительную нагрузку. Труды Ленинградского промышленного института, № 3, 1940.
6. И. А. Глебов. Исследование синхронного генератора с ионным преобразователем в цепи возбуждения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук, Л., 1949.
7. В. А. Веников и Л. А. Жуков. Переходные процессы в электрических системах. Госэнергоиздат, 1953.
8. М. П. Костенко, Л. Р. Нейман и Г. Н. Блудзевич. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Монография АН СССР, 1946.
9. Б. М. Шляпников. Игнитронные выпрямители, Госэнергоиздат, 1947.

[22. 3. 1957]



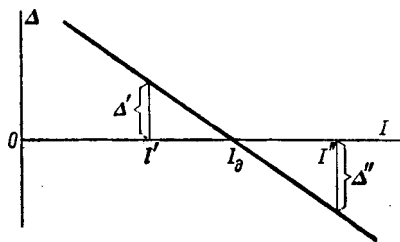


Рис. 3.

Нетрудно получить и аналитическое решение. Обозначим разность между действительным и фиктивным значениями следующим образом:

$$\Delta' = E_0 - E'; \quad (1)$$

$$\Delta'' = E_0 - E''. \quad (2)$$

Уравнение прямой ошибок $\Delta = f(I)$ (рис. 3) имеет вид:

$$\frac{I - I'}{\Delta - \Delta'} = \frac{I - I''}{\Delta - \Delta''}. \quad (3)$$

При $\Delta = 0$ ток равен действительному значению, т. е. $I = I_0$. Из уравнения (3) при $\Delta = 0$ получаем:

$$I_0 = \frac{\Delta' I'' - \Delta'' I'}{\Delta' - \Delta''}. \quad (4)$$

Выше при вычислении ошибки мы находили сумму падений напряжения по замкнутому контуру, содержащему э. д. с. В общем случае для этой цели можно определять как сумму падений напряжения в любом замкнутом контуре, так и сумму токов в любом узле, для которых при нахождении фиктивных токов не использовалось условие равенства нулю этой суммы. Это позволяет рассчитать любую цепь, конфигурация которой позволяет по известному току в одной из ветвей найти токи в остальных ветвях.

Для нелинейной цепи зависимость $\Delta = f(I)$ не будет линейной (рис. 4). Ее можно построить по нескольким точкам; точка пересечения с осью тока и будет решением задачи.

Аналитическое решение можно получить при помощи формулы (4). Если I' и I'' выбраны так, что Δ' и Δ'' имеют разные знаки, то найденное по формуле (4) третье значение I''' будет лежать между первыми двумя. Определив соответствующую ему ошибку Δ''' выберем два новых значения I' и I'' с ошибками разного знака. Эти пре-

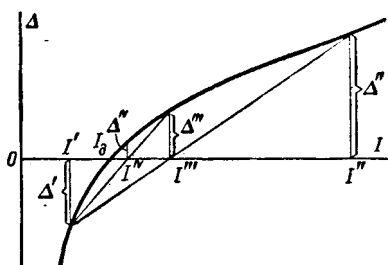


Рис. 4.

делы будут более узкие, чем в предыдущем случае. Этим же способом расчет повторяется многократно, а в пределе фиктивное значение тока стремится к действительному значению. Практически расчет прекращается, когда ошибка достигнет допустимых размеров. По величине последней ошибки можно судить о степени точности результата.

Изложенный расчет подобен нахождению корней уравнений высоких степеней по методу хорд и касательных [Л. 1]. В нашем случае невозможно провести касательную к кривой $\Delta = f(I)$, так как уравнение кривой неизвестно. Поэтому для расчета используются только хорды.

Несколько сходный по идее графический метод расчета цепей постоянного тока с нелинейными элементами предложен О. М. Богатыревым [Л. 2]. Однако настоящий метод является более совершенным, так как он позволяет получить аналитическое решение и, следовательно, добиться повышенной точности расчета.

Выше мы имели в виду цепи постоянного тока. Тем не менее изложенный метод в комплексном виде применим для расчета линейных цепей переменного тока, а также для приближенного расчета нелинейных цепей переменного тока в случае, когда формы кривых токов и напряжений близки к синусоидальным [Л. 5]. При расчете цепей переменного тока в формулу (4) следует подставлять комплексы соответствующих величин.

Пример 1. Спределим токи в схеме рис. 5, где $E = 230$ в; $r_1 = r_2 = 0,5$ ом; $r_3 = 8$ ом; $r_4 = 12$ ом; $r_5 = r_6 = 1$ ом; $r_7 = 2$ ом; $r_8 = 15$ ом; $r_9 = 10$ ом; $r_{10} = 20$ ом [Л.3].

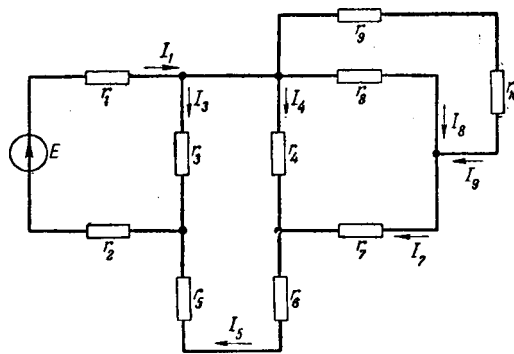


Рис. 5.

Задаемся $I_9' = 10$ а. Находим:

$$\begin{aligned} U_8' &= 300 \text{ в}; I_8' = 20 \text{ а}; I_7' = 30 \text{ а}; U_7' = 60 \text{ в}; U_4' = 360 \text{ в}; \\ I_4' &= 30 \text{ а}; I_5' = 60 \text{ а}; U_5' = 60 \text{ в}; U_6' = 60 \text{ в}; U_3' = 480 \text{ в}; \\ I_3' &= 60 \text{ а}; I' = 120 \text{ а}; U_1' = 60 \text{ в}; U_2' = 60 \text{ в}; E' = 600 \text{ в}; \end{aligned}$$

$$k = \frac{E'}{E} = \frac{600}{230} = 2,61.$$

Действительные значения получим, разделив на k найденные выше значения токов:

$$I_0 = 3,84 \text{ а}; I_8 = 7,67 \text{ а}; I_7 = 11,5 \text{ а}; I_4 = 11,5 \text{ а};$$

$$I_5 = 23 \text{ а}; I_3 = 23 \text{ а}; I = 46 \text{ а}.$$

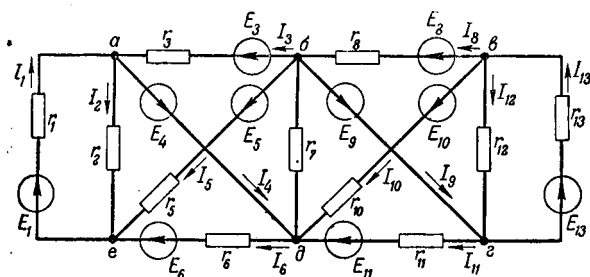


Рис. 6.

Пример 2. Определить токи в электрической цепи (рис. 6), для которой

$$r_1 = r_2 = r_6 = r_7 = r_{11} = r_{12} = r_{13} = 1 \text{ ом}, \\ r_3 = r_8 = r_9 = r_{10} = 2 \text{ ом};$$

$$E_1 = 6 \text{ в}; E_3 = E_4 = E_5 = E_6 = E_8 = E_9 = E_{10} = \\ E_{11} = E_{13} = 1 \text{ в}.$$

Задавая токами $I'_1 = 0$ и $I''_1 = 10 \text{ а}$, определим соответствующие им токи в остальных ветвях схемы. Результаты расчета сведены в табл. 1. Вычисляя ошибки Δ' и Δ'' по сумме токов в узле b , находим действительные значения токов по формуле

$$I_K = \frac{\Delta' I''_K - \Delta'' I'_K}{\Delta' - \Delta''}.$$

Пример 3. Найти токораспределение в схеме, представленной на рис. 7, где $\dot{U} = 120 \text{ в}$; $r = 25 \text{ ом}$; $Z = 20 + j45 \text{ ом}$, а зависимость $I_K = f(U_K)$ изображена на рис. 8 [Л. 4].

Задаемся следующими значениями токов в сопротивлении r_K : $I'_K = 1,36e^{j15^\circ 13'}$ (соответствует наибольшему значению сопротивления $r_K = 50 \text{ ом}$) и $I''_K = 1,70e^{j13^\circ}$ (находится в пределах приведенной на рис. 8 характеристики $I_K = f(U_K)$).

Дальнейший расчет сведен в табл. 2.

Ошибка Δ''' достаточно мала и составляет 2,6% от приложенного напряжения. По уравнению (4) получаем, что $I_K^{IV} = 1,54e^{j13^\circ 47'}$, т. е. это значение мало отличается от предыдущего значения I_K''' . Поэтому на этом можно закончить расчет и принять $I_K = I_K^{IV}$.

Таблица 1

Расчетные формулы	I'_K	I''_K	I_K
I_1	0	10	4,9004
$I_2 = g_2 (E_1 - I_1 r_1)$	6	-4	1,0996
$I_6 = g_6 (E_6 + I_2 r_2 + E_4)$	8	-2	3,0996
$I_5 = I_1 - I_2 - I_6$	-14	16	0,7011
$I_7 = g_7 (E_6 - I_6 r_6 + I_5 r_5 - E_5)$	-36	34	-1,6975
$I_3 = g_3 (E_4 + I_7 r_7 + E_2)$	-17	18	0,1512
$I_{11} = g_{11} (E_{11} + I_7 r_7 + E_9)$	-34	36	0,3025
$I_4 = I_1 - I_2 + I_3$	-23	32	3,9520
$I_{10} = I_6 - I_4 - I_7 - I_{11}$	101	-104	0,5427
$I_8 = g_8 (-I_7 r_7 + I_{10} r_{10} - E_{10})$	118,5	-121,5	0,8914
$I_9 = I_8 - I_3 - I_5 - I_7$	185,5	-189,5	1,7367
$I_{12} = g_{12} (-E_9 + I_8 r_8 - E_8)$	235	-245	-0,2171
$I_{13} = g_{13} (E_{13} - I_{12} r_{12})$	-234	246	1,2171
$\Delta = I_8 + I_{10} + I_{12} - I_{13}$	$\Delta' = 688,5$	$\Delta'' = -716,5$	—

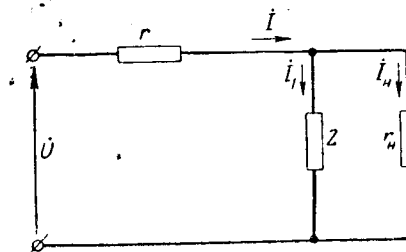


Рис. 7.

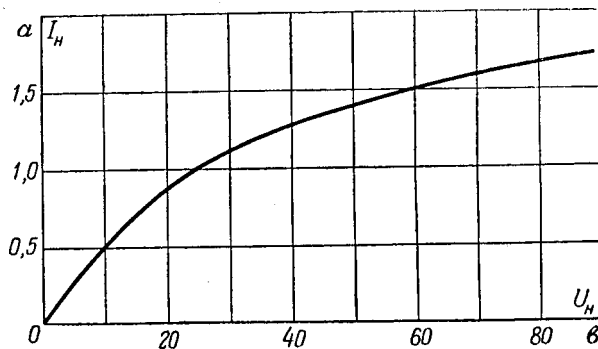


Рис. 8.

Таблица 2

Расчетные формулы	i'_K, \dot{U}'_K	i''_K, \dot{U}''_K	i'''_K, \dot{U}'''_K
I_K	$1,36e^{j15^\circ 13'}$	$1,70e^{j10^\circ 00'}$	$1,53e^{j13^\circ 32'}$
$\dot{U}_K = f(I_K)$	$47e^{j15^\circ 13'}$	$90,5e^{j10^\circ 00'}$	$62,5e^{j13^\circ 32'}$
$i_1 = \frac{\dot{U}_K}{Z}$	$0,95e^{-j50^\circ 50'}$	$1,84e^{j56^\circ 03'}$	$1,27e^{-j52^\circ 31'}$
$I = I_K + i_1$	$1,95e^{-j11^\circ 20'}$	$2,96e^{j24^\circ 28'}$	$2,35e^{j15^\circ 47'}$
$\dot{U}_r = I \cdot r$	$48,9e^{-j11^\circ 20'}$	$74,0e^{-j24^\circ 28'}$	$58,8e^{-j15^\circ 47'}$
$\Delta = \dot{U} - \dot{U}_r - \dot{U}_K$	$\Delta' = 46,2e^{j183^\circ 08'}$	$\Delta'' = 39,7e^{-j22^\circ 13'}$	$\Delta''' = 3,15e^{j235^\circ 00'}$

Литература

1. А. Н. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях. Изд-во технико-теоретической литературы, 1954.
2. О. М. Богатырев. Элементарная методика расчета электрических и магнитных цепей. Электричество, № 2, 1954.

3. П. А. Ионкин и др. Сборник задач и упражнений по электротехнике, стр. 125, Госэнергоиздат, 1952.

4. Р. А. Воронов. Расчет цепей с нелинейными элементами методом поправок. Электричество, № 11, 1952.

5. Г. Е. Пухов и С. П. Амосова. К расчету нелинейных цепей переменного и постоянного тока. Электричество, № 10, 1954.

[14. 6. 1956]



По поводу численного метода расчета некоторых электрических цепей

Доктор техн. наук, проф. В. Б. РОМАНОВСКИЙ

Ленинградский политехнический институт

В статье «Об одном численном методе расчета некоторых электрических цепей»¹ правильно отмечается, что изложенный авторами метод позволяет рассчитывать токи в таких цепях, в которых по одному известному току в надлежащем образом выбранной ветви могут быть определены токи во всех остальных ветвях. Между тем, если подойти к обоснованию теории расчета линейной цепи с любым числом э. д. с. с несколько иной точки зрения, то изложенный метод может быть обобщен, а класс цепей, поддающихся расчету этим методом, — расширен.

Пусть поставлена задача о расчете сложной цепи, содержащей n ветвей. Как известно, определение токов в ветвях сводится к решению системы n уравнений с n неизвестными токами, причем в правых частях уравнений записываются заданные э. д. с., действующие в цепи. Предположим, что один из токов, например I_1 , известен. Тогда для определения остальных $n - 1$ токов достаточно $n - 1$ уравнений, в которых члены, содержащие I_1 , перенесены в правые части. Найденные решения для токов должны удовлетворять неиспользованному уравнению, которое для определенности будем считать составленным на основании первого закона Кирхгофа для какого-то узла f_1 .

Таким образом, любой ток I_k может быть определен через параметры цепи, э. д. с., действующие в цепи, и известный ток I_1 :

$$I_k = A_k I_1 + C_k,$$

где A_k — коэффициенты, зависящие только от параметров цепи;

C_k — линейные однородные функции э. д. с., действующих в цепи.

Суммируя токи, подходящие к узлу f_1 , получим:

$$\sum I_k = I_1 \sum A_k + \sum C_k = 0$$

или

$$a I_1 + c = 0. \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет определить ток I_1 :

$$I_1 = -\frac{c}{a}. \quad (2)$$

Во избежание громоздких вычислений величин a и c можно, как это предлагают авторы статьи, проделать два расчетных опыта, задаваясь токами I'_1 и I''_1 . Тогда уравнение (1) переписывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} a I'_1 + c &= \Delta'; \\ a I''_1 + c &= \Delta''. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

¹ См. статью В. М. Бондаренко и Г. Е. Пухова, помещенную в этом же номере журнала.

Решив систему уравнений (3) относительно a и c и используя равенство (2), получаем выражение для тока I_1 такое же, как и в рассматриваемой статье:

$$I_1 = \frac{\Delta' I'' - \Delta'' I'}{\Delta' - \Delta''}. \quad (4)$$

В частности, если положить $I''_1 = 1$ и $I'_1 = -1$, то выражение для действительного тока I_1 получает простой вид:

$$I_1 = \frac{\Delta' + \Delta''}{\Delta' - \Delta''}.$$

Учитывая свойства коэффициентов a и c , можно несколько упростить расчеты. Если для первого расчета положить, что $I'_1 = 1$ и все э. д. с. в цепи равны нулю, а стало быть $c = 0$, а при втором расчете принять, что $I''_1 = 0$ и все э. д. с. включены, то получим систему уравнений

$$a = \Delta';$$

$$c = \Delta''$$

и, учитывая равенство (2), найдем решение для I_1 :

$$I_1 = -\frac{\Delta''}{\Delta'}.$$

Изложенные выше соображения позволяют сделать некоторые обобщения и расширить класс цепей, поддающихся расчету. Действительно, если, например, в схему, изображенную на рис. 6 статьи В. М. Бондаренко и Г. Е. Пухова, в ветвь ad включить сопротивление, то методом авторов статьи схемы не рассчитать, так как по одному заданному току все остальные токи в цепи не определяются. Но если, однако, надлежащим образом задать еще один ток, например, в ветви ad , то все остальные токи можно определить.

Итак, положим, что задана цепь, состоящая из n ветвей, и составлена система n уравнений для n неизвестных токов. Положим также, что токи I_1 и I_2 известны, тогда для определения остальных $n - 2$ токов достаточно $n - 2$ уравнений, и какой-либо ток I_k определится из выражения

$$I_k = A_k I_1 + B_k I_2 + C_k.$$

Для определенности положим также, что оставшиеся неиспользованными два уравнения составлены по первому закону Кирхгофа для узлов f_1 и f_2 . Например, в схеме рис. 6 такими узлами могут служить узлы v и e при условии, что ток I_5 (см. табл. 1) определяется по второму закону Кирхгофа по контуру abe .

Суммируя токи для двух узлов, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \text{для узла } f_1: & a_1 I_1 + b_1 I_2 + c_1 = 0; \\ \text{для узла } f_2: & a_2 I_1 + b_2 I_2 + c_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Кольцевые пересчетные схемы на полупроводниковых триодах

Кандидат техн. наук В. А. ЛАБУНЦОВ и инж. Ю. Н. ПЛЕНКИН

Московский энергетический институт

Кольцевой пересчетной схемой называют схему, состоящую из нескольких одинаковых триггерных ячеек с двумя устойчивыми состояниями равновесия у каждой (условно характеризуемыми понятиями «включено» и «выключено»), имеющих общий вход и соединенных в кольцо так, что в любой момент времени только одна ячейка может находиться в состоянии «включено», а все остальные — в положении «выключено» (рис. 1) или наоборот. При подаче импульса на вход схе-

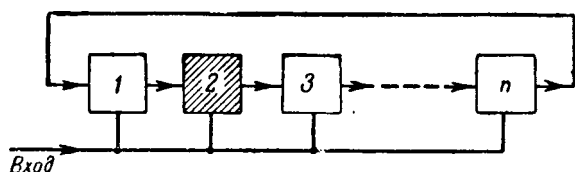


Рис. 1. Кольцевая пересчетная схема с коэффициентом пересчета n .

мы в состояние «включено» переходит ячейка, следующая за ранее включенной, а последняя перебрасывается в состояние «выключено». Таким образом, кольцевая пересчетная схема является триггерной схемой, имеющей число устойчивых состояний равновесия, равное числу ячеек и перебрасывающейся от подаваемых на вход импульсов из одного устойчивого состояния в другое.

Кольцевые пересчетные схемы применяются в экспериментальной ядерной физике для понижения скорости следования импульсов с целью их подсчета электромеханическим регистратором, а также для определения скорости вращения и частоты вибраций машин, в некоторых системах точного измерения времени, для подсчета пере-

двигающихся по конвейеру деталей и т. д. При этом коэффициент пересчета n (равный числу ячеек) часто удобно выбрать равным 10; такая пересчетная схема называется кольцевой пересчетной декадой. Разновидности кольцевых пересчетных схем могут применяться в цифровых вычислительных машинах в качестве счетчиков по модулю n .

Кольцевые пересчетные схемы находят также применение в системах сеточного управления многофазных автономных инверторов или ионных преобразователей частоты [Л. 1], где эти схемы (с перебрасыванием от задающего импульсного генератора) используются для получения необходимого сдвига во времени импульсов, подаваемых на сетки тиратронов различных фаз системы. В этом случае импульсы снимаются с выходов всех ячеек кольцевой пересчетной схемы. В подобных устройствах необходимы схемы с коэффициентом пересчета n , равным 3, 6 и иногда 12.

Кольцевые пересчетные схемы, выполняемые на электронных лампах или на тиратронах тлеющего или дугового разряда [Л. 2 и 3], требуют точной настройки, сложны и малонадежны (особенно при $n > 5$); схемы на тиратронах имеют малое быстродействие.

В настоящей статье описаны две кольцевые пересчетные схемы на точечных полупроводниковых триодах. Обе схемы могут быть выполнены с достаточно большим коэффициентом пересчета (до 10 и выше), позволяют получить значительно большие скорости счета, чем схемы с тиратронами, компактны, потребляют мало энергии и имеют большой срок службы.

Точечные полупроводниковые триоды, имеющие статический коэффициент усиления по току $\alpha > 1$, большие рабочие напряжения и значительную граничную частоту, более подходят для при-

Если коэффициенты a , b , c известны, то решением системы уравнений (5) получаем точные значения для токов:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= -\frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \\ I_2 &= -\frac{c_2 a_1 - c_1 a_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для вычисления коэффициентов a , b , c проведем три расчета-опыта при следующих предположениях:

$$I'_1 = 1; I'_2 = 0; E_1 = E_2 = \dots = E_n = 0.$$

$$I''_1 = 0; I''_2 = 1; E_1 = E_2 = \dots = E_n = 0.$$

$$I'''_1 = 0; I'''_3 = 0; \text{ все э. д. с. включены.}$$

Получаем шесть уравнений:

$$\text{для узла } f_1: a_1 = \Delta'_1; b_1 = \Delta''_1; c_1 = \Delta'''_1.$$

$$\text{для узла } f_2: a_2 = \Delta'_2; b_2 = \Delta''_2; c_2 = \Delta'''_2,$$

Подставляя найденные значения в равенство (6), получаем окончательно:

$$I_1 = \frac{\Delta'''_2 \Delta''_1 - \Delta'_1 \Delta'''_2}{\Delta'_1 \Delta''_2 - \Delta'_2 \Delta''_1};$$

$$I_2 = \frac{\Delta'_1 \Delta'_2 - \Delta'_2 \Delta'_1}{\Delta'_1 \Delta''_2 - \Delta'_2 \Delta''_1}.$$

Если в схему рис. 6 включить сопротивление также и в ветвь b_2 , то задание двух токов окажется недостаточным и будет необходимо задаваться тремя токами. Это приведет к разрешению трех уравнений типа (5) и к проведению четырех расчетов.

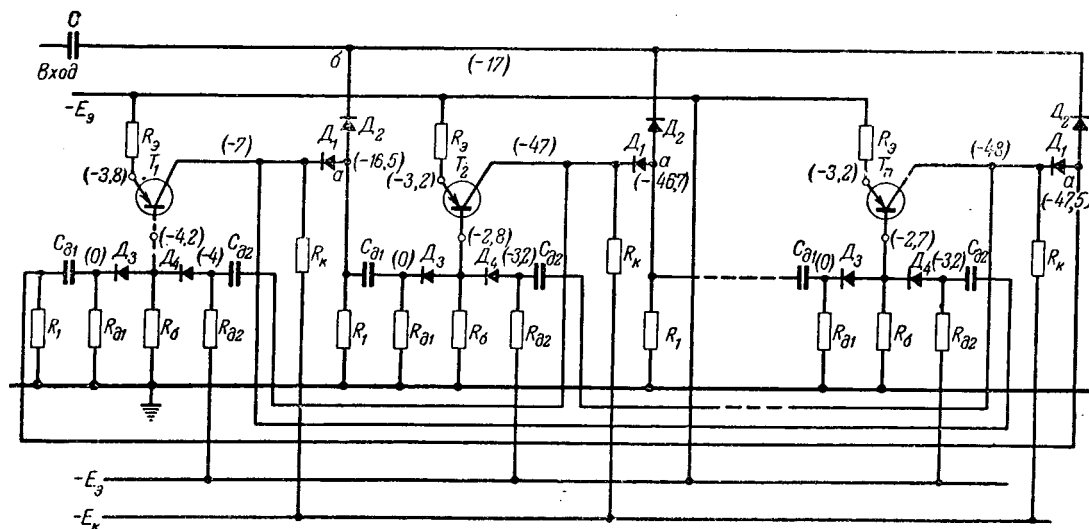


Рис. 2. Кольцевая пересчетная схема, состоящая из отдельных триггерных ячеек ($n=6$).

$R_{\partial} = 150 \text{ ом}$, $R_K = 8,2 \text{ ком}$, $R_G = 2,2 \text{ ком}$, $R_1 = 100 \text{ ком}$, $R_{\partial 1} = R_{\partial 2} = 5,1 \text{ ком}$, $C_{\partial 1} = C_{\partial 2} = 200 \text{ мкмкф}$, $C = 0,01 \text{ мкф}$, $E_K = 60 \text{ в}$, $E_{\partial} = -3,2 \text{ в}$, $D_1 \dots D_4$ — диоды ДГ-Ц2.

менения в импульсных спусковых схемах, чем плоскостные триоды.

Обе рассматриваемые кольцевые пересчетные схемы разработаны на базе схем сдвигающих регистров на точечных полупроводниковых триодах, предназначенных для применения в цифровых вычислительных машинах [Л. 4]. При разработке пересчетных схем была выбрана методика расчета элементов схем и изучено влияние параметров схем на положение вольт-амперных характеристик триггерных ячеек. В работе не ставилась задача получения максимальной частоты пересчета.

Кольцевая пересчетная схема, состоящая из элементарных триггерных ячеек (рис. 2). Каждая ячейка кольцевой пересчетной схемы представляет собой известную элементарную триггерную схему с двумя состояниями равновесия (рис. 3, а, ключ K в положении б). На рис. 3, б приведена вольт-амперная эмитерная характеристика схемы $U_{\partial} = f(I_{\partial})$, снятая при помощи присоединенного к зажимам 1 и 0 (ключ K в положении а) регулируемого по величине и по знаку источника напряжения с достаточно большим внутренним сопротивлением R (генератора тока). В случае применения в такой схеме точечного полупроводникового триода вольт-амперная характеристика $U_{\partial} = f(I_{\partial})$ имеет участок II с отрицательным сопротивлением.

Состояния устойчивого равновесия схемы триггера определяются точками А и В, полученными пересечением вольт-амперной характеристики и нагрузочной прямой (положение которой определяется э. д. с. E_{∂} и сопротивлением R_{∂}) и находящимися соответственно на участке I, где триод заперт, и на участке насыщения III, где триод проводит. Точка пересечения В на переходном участке характеристики (участок II) соответствует неустойчивому состоянию. Запуск такой триггерной схемы осуществляется чередующимися разнополярными импульсами, подаваемыми либо на эмитер (точки 1 и 0), либо на базу (точки 2 и 0). При этом в первом случае положительный импульс перебрасывает схему из положения А в положение В, а отрицательный — обратно. При запуске на базу отрицательный импульс переводит

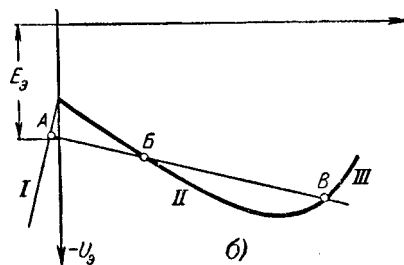
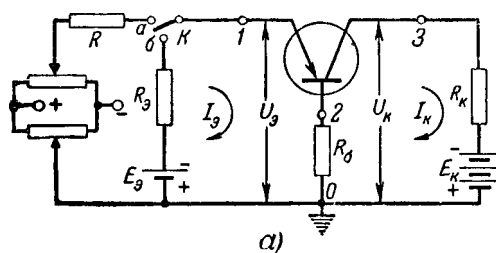


Рис. 3.

а — схема для снятия вольт-амперных эмитерных характеристик входа (ключ K в положении а), $R_G = 2,2 \text{ ком}$, $R_K = 8,2 \text{ ком}$, $R = 5 \text{ ком}$, $E_{\partial} = -60 \text{ в}$ и элементарная триггерная ячейка (ключ в положении б); б — вольт-амперная эмитерная характеристика триггерной ячейки.

триод в проводящее состояние В, а положительный возвращает его в непроводящее состояние А*

Рассмотрим назначение элементов связи между отдельными ячейками в схеме рис. 2. Диоды D_1 и D_2 , включенные между ячейками, образуют диодный клапан, обеспечивающий пропускание на вход следующей ячейки (на базу триода) отрицательного запускающего импульса, если предыдущая ячейка находится во включенном состоянии; на входы всех других ячеек в то же время импульсы не попадут. После диодного клапана запускающие импульсы через дифференцирующие цепочки $C_{\partial 1}$, $R_{\partial 1}$ и разделительные диоды D_3 подаются на базу триода каждой ячейки

* В обеих описываемых ниже схемах ячейки запускаются импульсами на базу. Однако анализ этих схем проводится по вольт-амперным эмитерным характеристикам, поскольку в данном случае сопротивления, определяющие положения устойчивых и неустойчивых точек равновесия, включены в цепь эмитеров триодов.

и вызывают его переброс в проводящее состояние. Коллектор триода каждой ячейки через дифференцирующую цепочку $C_{\partial 2}$, $R_{\partial 2}$ и диод D_4 соединен с базой триода предыдущей ячейки (коллектор первого триода соединяется с базой последнего); таким образом, при перебросе в проводящее состояние каждой следующей ячейки на базу триода предыдущей ячейки подается импульс положительной полярности, возвращающий этот триод в непереводящее положение. Для того чтобы сопротивления $R_{\partial 2}$ не шунтировали сопротивления в цепи базы R_6 в каждой ячейке, когда триод этой ячейки находится в непереводящем состоянии, диоды D_4 запираются отрицательным смещением E_s , получаемым от того же источника, что и смещение в эмитерной цепи триода. Числами в скобках на рис. 2 показаны потенциалы различных точек относительно земли, измеренные электронным вольтметром в случае, когда в проводящем положении находится первый триод.

Преброс только одной из ячеек во включенное состояние перед началом счета в схеме обеспечивается автоматически за счет некоторой несимметрии в характеристиках триодов, так что перед началом счета один из диодов D_2 оказывается открытым, а остальные закрытыми.

Расчет кольцевой схемы по рис. 2 сводится к расчету отдельной триггерной ячейки, после чего необходимо подобрать триоды, обладающие примерно одинаковыми вольт-амперными эмитерными характеристиками входа.

По статическим эмитерным и коллекторным характеристикам триодов

$$U_s = f(I_s) \text{ при } I_k = \text{const}$$

и

$$U_k = f(I_k) \text{ при } I_s = \text{const},$$

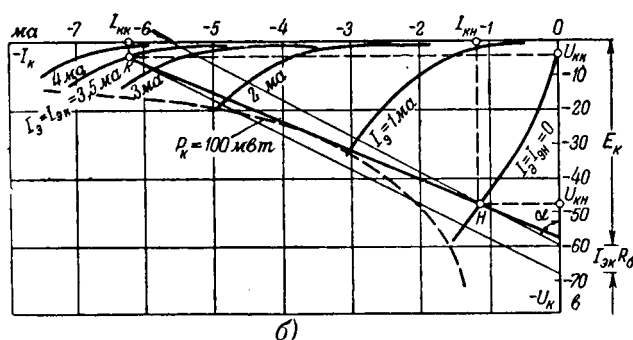
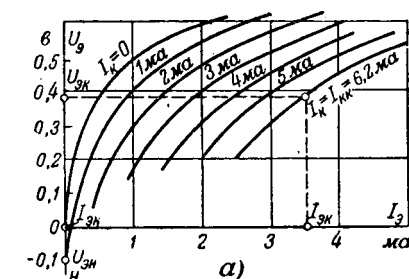


Рис. 4. Статические входные (а) и выходные (б) характеристики точечного триода. Линия κ — динамическая линия нагрузки; $\alpha = \arctg(R_k + R_6)$.

средним для триодов выбранного типа, задаемся начальным и конечным режимом в пределах допустимой мощности рассеяния, равной для применявшихся триодов 100 мвт (рис. 4, а и б):

$$\text{начальный режим } I_{sн}, U_{sн}, I_{кн}, U_{кн};$$

$$\text{конечный режим } I_{ск}, U_{ск}, I_{кк}, U_{кк}.$$

Задаваясь необходимым перепадом напряжения на выходе (на коллекторе) ΔU_k (равным, например, 40 в), находим сопротивление в цепи коллектора:

$$R_k = \frac{\Delta U_k}{I_{кк} - I_{кн}}.$$

Сопротивление в цепи базы

$$R_6 = \frac{U_{сн} - U_{кк} - \Delta U_k}{I_{кк} - I_{кн} - I_{сн}}.$$

Напряжение питания в цепи коллектора равно:

$$E_k = I_{кн}(R_k + R_6) + U_{кн}.$$

Затем по схеме рис. 3, а снимаются вольт-амперные эмитерные характеристики рассчитанной триггерной схемы с триодами из выбранной партии и отбираются триоды, имеющие близкие друг к другу вольт-амперные характеристики. Необходимо, чтобы наиболее „высокая“ точка минимума (граница участков II и III) одной из характеристик лежала ниже (на 0,2...0,5 в) наиболее „низкой“ точки максимума (граница участков I и II) любой другой характеристики. Если схема предназначена для работы в широком интервале температур, эмитерные характеристики должны сниматься и указанное условие должно выполняться также при крайних значениях этого диапазона. По снятым характеристикам выбираются напряжение смещения в цепи эмитера E_s и нагрузочное сопротивление в цепи эмитера R_s^{**} .

Необходимо отметить, что с ростом сопротивления R_6 характеристика смещается вниз, наклон отрицательного участка растет, однако протяженность его по оси тока уменьшается (граница участков II и III сдвигается влево). Кроме того, при больших R_6 сильно сказывается различие в характеристиках отдельных триодов. Поэтому брать $R_6 > 2...3$ ком нецелесообразно.

По амплитуде импульсов $U_{зан}$, необходимых для запуска ячейки рис. 3, а (обычно $U_{зан} = 3...6$ в) и амплитуде входных импульсов $U_{сх}$, находим сопротивление дифференцирующей цепочки $R_{\partial 1}$:

$$R_{\partial 1} = \frac{U_{зан} R_z}{U_{сх} - U_{зан}},$$

где R_z — внутреннее сопротивление источника запускающих импульсов.

** В данной схеме триоды в проводящем состоянии работают в режиме насыщения, что несколько снижает предельную скорость счета. В случае необходимости быстрого действия можно повысить за счет усложнения схемы, сместив устойчивую точку В из участка насыщения [Л. 4].

Емкость конденсаторов $C_{\partial 1}$ и, следовательно, постоянная времени дифференцирующей цепочки выбираются из соображений быстрогодействия достаточно малыми, в то же время величина $C_{\partial 1}$ должна быть в несколько раз больше паразитных емкостей схемы.

При выборе параметров второй дифференцирующей цепочки $C_{\partial 2}$ $R_{\partial 2}$ внутреннее сопротивление источника запускающих импульсов R'_2 берется равным сопротивлению параллельно соединенных R_k , R_1 $R_{\partial 1}$ и r_k (r_k — внутреннее сопротивление цепи коллектора триода). Обычно сопротивление R'_2 не превышает 1...2 ком, поэтому значения $C_{\partial 2}$ и $R_{\partial 2}$ могут быть взяты равными $C_{\partial 1}$ и $R_{\partial 1}$.

Схема (рис. 2) уверенно работала при частоте запускающих импульсов вплоть до 300 кГц. Как показал эксперимент, схема малокритична к ширине, амплитуде и крутизне переднего фронта запускающих импульсов: схема работала от импульсов длительностью 2...40 мксек, амплитудой от 8 до 40 в с длительностью переднего фронта около 5% от ширины импульса (импульсы короче 2 мксек и длиннее 40 мксек не применялись). Амплитуда прямоугольных импульсов на выходе каждой ячейки 40...42 в.

Изменения напряжения питания в цепи коллектора от 45 до 80 в при одновременном изменении напряжения смещения в цепи эмитера от -2,5 до -4 в не приводили к нарушению работы схемы.

Хотя схема с числом ячеек, большим шести, не испытывалась, однако ясно, что в схеме данного типа число ячеек и, следовательно, коэффициент пересчета могут быть весьма велики и ограничиваются лишь величиной обратного сопротивления диодов D_2 .

Кольцевая пересчетная схема с общим нагрузочным сопротивлением в цепи эмитера. Схема этого типа (рис. 5) является развитием триггерной ячейки на двух точечных триодах с общим эмитерным сопротивлением (рис. 6, а).

Работа такой триггерной ячейки может быть пояснена при помощи схемы триггера на одном триоде, приведенной на рис. 6, б, где в цепи эмитера триода дополнительно включены диод D и батарея E'_2 (ср. рис. 3, а и 6, б). Схема

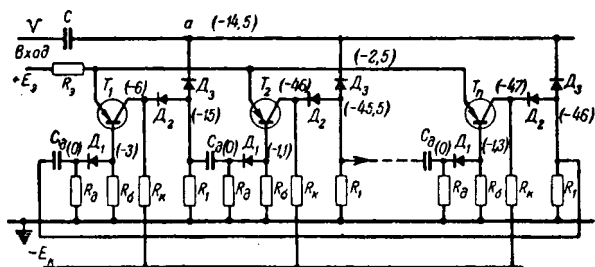


Рис. 5. Кольцевая пересчетная схема с общим эмитерным сопротивлением.

$R_2=5,1$ ком, $R_k=8,2$ ком, $R_5=1$ ком, $R_1=100$ ком, $R_6=5,1$ ком, $C_{\partial}=820$ мккМф, $D_1 \dots D_3$ — диоды ДГ-Ц2, $E_2=20$ в, $E_k=60$ в.

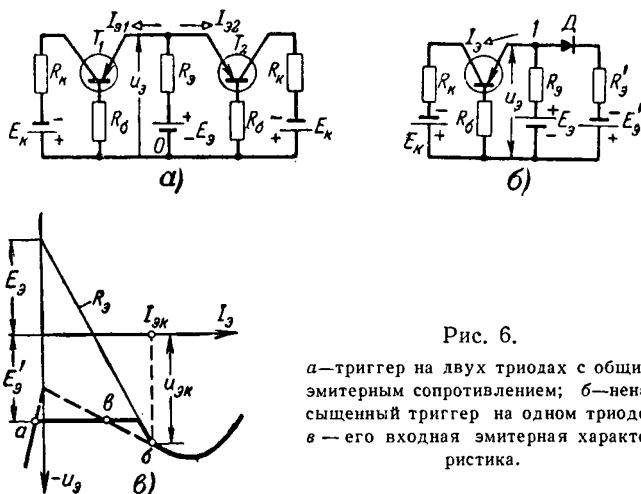


Рис. 6.

а — триггер на двух триодах с общим эмитерным сопротивлением; б — ненасыщенный триггер на одном триоде; в — его входная эмитерная характеристика.

рис. 6, б имеет и самостоятельное значение [Л. 4], являясь схемой ненасыщенного триггера, т. е. триггера, в котором второе устойчивое положение равновесия (соответствующее состоянию „включено“) не находится на насыщенном участке (участок III, рис. 3, б). Это видно из эмитерной характеристики $U_s = f(I_s)$ схемы рис. 6, б, снятой при присоединении между точками 1 и 0 (наряду с элементами R_s , E_s , D , R'_s и E'_s) регулируемого генератора тока. Характеристика $U_s = f(I_s)$ этой схемы показана на рис. 6, в сплошной линией. Благодаря большой величине сопротивления R_s точка б является устойчивой.

Триггерной ячейке на двух триодах с общим эмитерным сопротивлением (рис. 6, а) соответствуют эмитерные характеристики $U_s = f_1(I_{s1})$ и $U_s = f_2(I_{s2})$ (снятые при помощи генератора тока, присоединенного между точками 1 и 0), приведенные совместно на одном графике на рис. 7, а (идеализированные характеристики). В такой схеме возможны два устойчивых состояния, соответствующих точкам а (T_1 заперт, T_2 проводит) и б (T_1 и T_2 поменялись ролями); точка пересечения в неустойчива. На рис. 7, б показаны совмещенные реальные характеристики двух точечных триодов: в силу неизбежного различия параметров характеристики оказываются смещенными относительно друг друга в направлении оси напряжений, а масштабы токов для обоих триодов оказываются различными. Это приводит к несимметрии работы схемы, а в случае, когда минимум характеристики одного триода лежит выше максимума характеристики другого, работа триггера невозможна.

В зависимости от положения точек пересечения а и б (рис. 7, а) триоды в подобной ячейке могут работать как в насыщенном, так и в ненасыщенном режиме. Во втором случае быстроедействие схемы будет больше, так как не будет сказываться эффект накопления дырок. Положение точек пересечения а и б определяется током эмитера в конечном режиме I_{sk} , который, в свою очередь, зависит от величины напряжения E_s и сопротивления R_s .

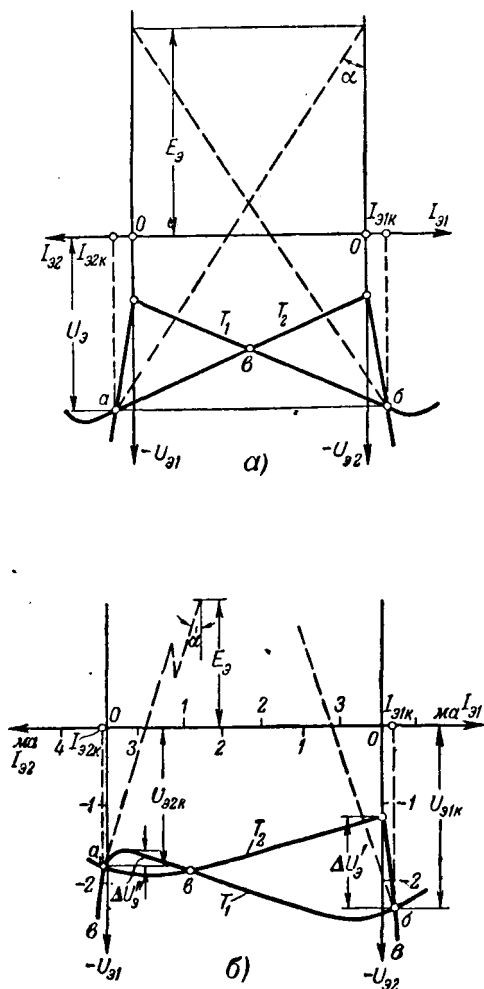


Рис. 7. Идеализированные (а) и реальные (б) входные эмитерные характеристики схемы рис. 6, а.

На базе триггерной схемы с двумя триодами (рис. 6, а) можно выполнить схему с общим эмитерным сопротивлением и с большим количеством триодов и соответственно с большим коэффициентом пересчета. При этом в любой момент времени в проводящем состоянии по-прежнему может находиться только один триод, так как протекающий в цепи его эмитера ток создает на общем сопротивлении R_g значительное падение напряжения.

Рассмотрим работу пересчетной схемы рис. 5, основанной на этом принципе. Предположим, что в проводящем состоянии находится триод первой ячейки T_1 . Благодаря диодному клапану, состоящему из диодов D_3 и D_2 и сопротивления R_1 , очередной входной импульс отрицательной полярности попадет только на вход второй ячейки, будет продифференцирован цепочкой $C_d R_d$ и через диод D_1 попадет на базу триода T_2 . Переход этого триода в проводящее положение вследствие наличия общего эмитерного сопротивления R_g вызовет обратный переброс триода первой ячейки. Подготовленным к срабатыванию от следующего входного импульса окажется триод T_3 и т. д.

Определение значений R_k , R_d и E_k производится, как и для первой схемы, по приведенным выше формулам на основании выбранных по графикам (рис. 4, а и б) значений токов и напряжений в начальном и конечном режимах. Для определения напряжения E_g , необходимого для получения выбранного значения тока $I_{вк}$, задаемся величиной сопротивления $R_g = 5,1 \text{ ком}$. Пренебрегая обратными токами в эмитерных цепях непроводящих триодов, получим (рис. 3, а):

$$E_g = I_{вк}(R_g + R_d) + U_{вк} - I_{кк}R_d.$$

Затем при рассчитанных параметрах снимаются входные эмитерные характеристики группы триодов и отбираются триоды с примерно одинаковыми значениями U_g , соответствующими максимуму и минимуму характеристики (другими словами, характеристики всех отобранных триодов при их попарном совместном изображении, как на рис. 7, б, должны иметь по три точки пересечения). Для надежной работы схемы перепады $\Delta U'_g$ и $\Delta U''_g$ должны быть по величине не менее 0,1 в.

Указанное соответствие между характеристиками должно выполняться при всех рабочих температурах.

Выбор параметров дифференцирующей цепочки C_d и R_d производится, как и для первой схемы. Однако из-за большей паразитной емкости, присоединенной через диод D_1 параллельно выходу этой цепочки (поскольку эмитеры всех триодов соединены вместе), величину емкости C_d при наладке пришлось взять в несколько раз большей, чем в предыдущей схеме, что снизило предельную рабочую частоту.

Описанный принцип работы кольцевой пересчетной схемы был испытан при коэффициенте пересчета до 10 включительно. Схема надежно работала при частоте запускающих импульсов до 30 кгц^1 . Изменения амплитуды запускающих импульсов от 10 до 40 в и ширины от 2 до 40 мксек на работе схемы не сказывались. Амплитуда выходных прямоугольных импульсов при $E_k = 60 \text{ в}$ и $E_g = 17 \text{ в}$ равнялась 40...42 в. На рис. 5 числами в скобках показаны потенциалы различных точек схемы в режиме, когда в проводящем состоянии находится триод T_1 .

¹ Меньшая предельная частота по сравнению с предыдущей схемой объясняется необходимостью применения дифференцирующих цепочек C_d , R_d с большей постоянной времени. В случае более качественного монтажа и при более тщательном подборе триодов быстродействие данной схемы, по-видимому, также может быть доведено до 100...300 кгц, поскольку сдвигающие регистры как составленные из отдельных триггерных ячеек, так и с общим эмитерным сопротивлением имеют, как указано в [Л. 4], примерно одинаковое быстродействие (порядка 3...5 мксек на сдвиг). Быстродействие можно еще несколько повысить, если в каждой ячейке триод поставить в ненасыщенный режим (см. сноску**). Так, в работе [Л. 7] описана кольцевая пересчетная схема на точечных триодах с общим эмитерным сопротивлением, имеющим скорость счета до 2,5 мгц. Связь между ячейками в этой схеме осуществлена при помощи трансформаторов на ферритовых сердечниках.

Одновременные изменения напряжения питания в цепи коллектора от 42 до 70 в и в цепи эмитера от 12 до 20 в не приводили к нарушениям работы схемы. При этом амплитуда выходных импульсов изменялась от 26 до 50 в. Было проведено также испытание данной схемы при увеличении температуры окружающей среды до 55°С (при $E_k = 60$ в и $E_e = 17$ в). В этих условиях никаких изменений в работе схемы не наблюдалось. При подъеме температуры выше 60°С нормальная работа схемы срывалась, но после снижения температуры до +55°С нормальная работа восстанавливалась без какой-либо подстройки.

Данная схема выгодно отличается от первой меньшим количеством деталей. Предельное число ячеек и, следовательно, величина n в этой схеме ограничиваются, во-первых, возрастанием паразитной емкости между общей точкой соединения эмитеров всех триодов и «землей» и, во-вторых, уменьшением сопротивления между этими же точками. При необходимости получения больших коэффициентов пересчета (свыше 15...20) несколько схем (в частности, декад) могут быть включены последовательно друг с другом.



Магнитный делитель частоты

Кандидат техн. наук К. Г. МИТЮШКИН

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Магнитный делитель частоты является статическим электромагнитным аппаратом, преобразующим частоту электрических колебаний в более низкую, кратную ей частоту. В настоящей статье рассматривается магнитный делитель с отношением частот, равным двум. Вообще же в этом делителе возможно получение и других соотношений частот, например 3:1.

Принцип действия магнитного делителя частоты основан на явлении параметрического возбуждения колебаний, детально исследованного в трудах академиков Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси¹. Это явление состоит в том, что при принудительном изменении одного из параметров колебательного контура — индуктивности или емкости, с частотой вдвое большей собственной частоты контура, в нем могут поддерживаться незатухающие колебания, частота которых близка к собственной частоте контура. В общем случае параметрического резонанса частота изменения параметра должна быть величиной, кратной частоте собственных колебаний.

Процесс параметрического возбуждения колебаний иллюстрирует рис. 1. Пусть на емкости C имеется начальный заряд, вызывающий колеба-

Обе рассмотренные схемы надежны в работе и после подбора триодов согласно описанной методики не требуют сложной настройки.

Литература

1. В. А. Лабунцов. Электронные схемы сеточного управления многофазных автономных инверторов и ионных преобразователей частоты. Труды МЭИ, вып. XVIII, 1956.
2. А. М. Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. Гостехиздат, 1955.
3. Н. Т. Петрович и А. В. Козырев. Генерирование и преобразование электрических импульсов. «Сов. радио», 1954.
4. R. H. Baker, I. L. Lebow, R. E. McMahon. Регистры сдвига на полупроводниковых триодах. PIRE, т. XLII, стр. 1152—1159, № 7, 1954.
5. A. W. Lo. Триггерные схемы на полупроводниковых триодах. PIRE, т. XL, стр. 1531—1541, № 11, 1952.
6. L. P. Hunter. Графический анализ некоторых спусковых схем на полупроводниковых триодах. PIRE, т. XL, стр. 1559—1562, № 11, 1952.
7. G. B. V. Chaplin. Пересчетная схема на точечных триодах с разрешающим временем 0,4 мксек. Proc. Inst. Radio Engineers, ч. B, т. CIII, стр. 505, № 10, 1956.

[28.12. 1956]

тельный процесс в контуре, а величина индуктивности L изменяется принудительно под воздействием источника энергии, внешнего по отношению к контуру. При изменении индуктивности, происходящем в момент прохождения тока через максимум, в контур вносится электрическая энергия, равная изменению энергии магнитного поля катушки. Прирост электрической энергии в контуре можно наблюдать по увеличению тока в момент изменения индуктивности. Возвращение индуктивности в исходное состояние производится без затраты энергии в момент времени, когда ток равен нулю. Таким образом, в течение каждого полупериода собственных колебаний внешний источник энергии, изменяющий индуктивность контура, передает в него часть своей энергии, благодаря чему в контуре устанавливаются незатухающие колебания.

Подобные же явления параметрического возбуждения колебаний имеют место в магнитном делителе частоты (рис. 2). Первичные обмотки ω_1 двух сердечников из насыщающегося материала включаются последовательно на напряжение делимой частоты. Точно так же включаются обмотки подмагничивания ω'_0 . Дроссель в их цепи препятствует трансформации первичного тока в цепь источника постоянного напряжения U_0 . Обмотки ω'_k совместно с емкостью C_k образуют

¹ О параметрическом возбуждении электрических колебаний. ЖТФ, апрель 1934, вып. 1.

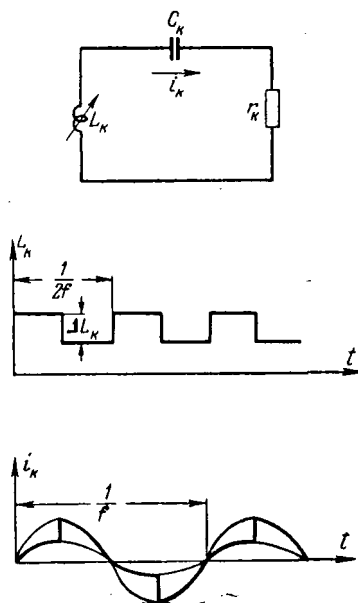


Рис. 1. Изменение индуктивности и тока при параметрическом возбуждении колебаний.

колебательный контур, настроенный на частоту f . Вторичное напряжение U_2 , также имеющее частоту f , снимается с нагрузочных обмоток w_k . Первичные обмотки и обмотки подмагничивания включаются встречно по отношению к контурным и нагрузочным обмоткам, что препятствует проникновению в них тока первичной частоты (реакция колебательного контура на магнитные потоки в сердечниках в первом приближении не учитывается). Следовательно, роль первичного тока в делителе состоит лишь в периодическом намагничивании и размагничивании магнитных сердечников, т. е. в изменении с частотой $2f$ индуктивности колебательного контура. Другими словами, первичная цепь в делителе выполняет функции внешнего по отношению к контуру источника энергии, периодически изменяющего индуктивность контура.

Принимая во внимание, что первичная цепь не индуцирует э. д. с. в колебательном контуре,

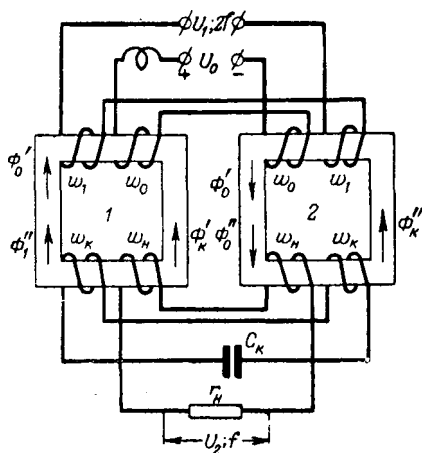


Рис. 2. Принципиальная схема магнитного делителя частоты.

дифференциальное уравнение этого контура можно записать следующим образом:

$$\omega_k \frac{d\Phi_k}{dt} + r_k i_k + \frac{1}{C_k} \int i_k dt = 0, \quad (1)$$

где $\Phi_k = \Phi'_k + \Phi''_k$ — сумма потоков, создаваемых контурной обмоткой в сердечниках 1 и 2.

Хотя внешние потоки, создаваемые обмотками w_1 и w_0 , и не вошли явно в это уравнение, однако следует учитывать, что магнитные потоки контурных обмоток зависят от степени насыщения сердечников, определяющейся величиной магнитных потоков, создаваемых обмотками w_1 и w_0 .

Таким образом, имеется зависимость:

$$\Phi_k = F(H_k, H_0) = F(H_k, H_0 + H_1), \quad (2)$$

где H_k — напряженность магнитного поля, создаваемого током в контурной обмотке; H_0 — напряженность внешнего магнитного поля, равная сумме напряженностей магнитных полей, создаваемых токами в первичной обмотке (H_1) и в обмотках подмагничивания (H_0).

Используя ту или иную аппроксимацию кривой намагничивания, функцию (2), вообще говоря, можно выразить аналитически. При подстановке этой функции в уравнение (1) получается нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка с периодически изменяющимися коэффициентами. Общие методы решения подобных уравнений в настоящее время еще недостаточно разработаны. Обычно при анализе подобных уравнений прибегают к различного рода приближениям и упрощениям. Однако даже и упрощенные методы оказываются достаточно сложными и трудоемкими.

В настоящей статье мы не будем останавливаться на аналитическом исследовании дифференциального уравнения магнитного делителя, а рассмотрим явление лишь с качественной стороны.

Представим кривые намагничивания сердечников делителя $\Phi(H)$ в виде отрезков трех прямых (рис. 3) и для некоторого фиксированного значения величины внешнего магнитного поля $H_0 = H_{01}$ построим кривые магнитных потоков Φ'_k и Φ''_k . Эти кривые не совпадают, так как в сердечнике 1 внешние магнитные потоки и магнитный поток контурной обмотки имеют одинаковые направления, а в сердечнике 2 — различные. Складывая эти характеристики, получаем зависимость $\Phi_k = F(H_k; H_{01})$. На том же рисунке пунктиром нанесена зависимость магнитного потока контурных обмоток от напряженности поля при отсутствии внешнего поля. Сопоставление этих характеристик иллюстрирует воздействие внешнего поля на магнитное поле контурной обмотки. В процессе работы делителя напряжен-

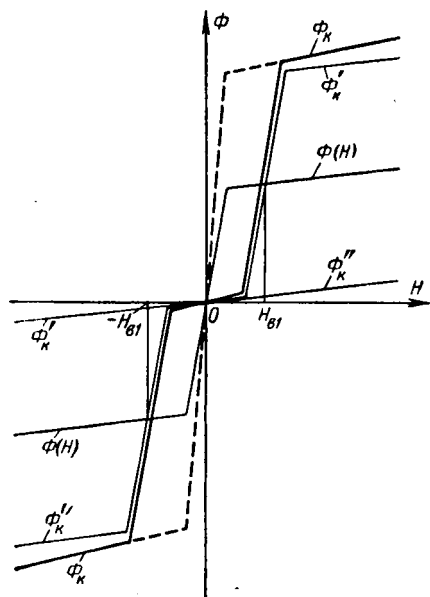


Рис. 3. Зависимость магнитных потоков контурных обмоток от напряженности поля.

ность внешнего поля периодически изменяется, что приводит к периодической деформации кривой намагничивания или, другими словами, к изменению индуктивности контурной обмотки, которая может быть оценена соотношением:

$$L = \omega_k^2 \frac{\Phi_k}{H_k} \quad (3)$$

Допустим, что поток Φ_k изменяется по синусоидальному закону, что, как показали опыты, достаточно близко к действительности, и, используя семейство кривых намагничивания $\Phi_k = F(H_k, H_\delta)$, построим кривую напряженности поля $H_k(t)$ (рис. 4). Для простоты примем, что напряженность первичного поля изменяется скачком в момент достижения максимума потоком Φ_k .

В первую половину полупериода, когда $H_\delta = 0$, рабочая точка в координатах Φ_k, H_k переме-

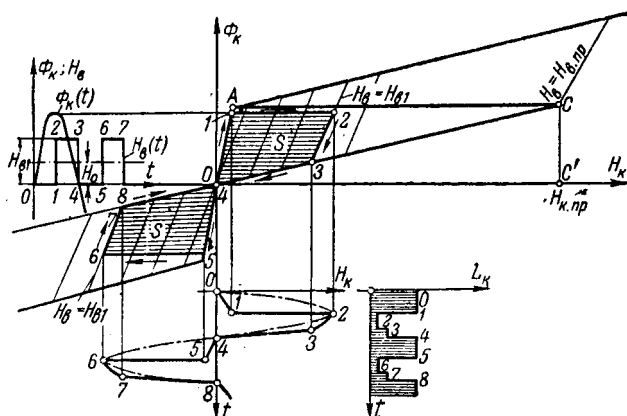


Рис. 4. Построение зависимости напряженности поля контурных обмоток от времени.

щается по прямой от точки O до точки 1 . В момент увеличения внешнего магнитного поля до значения $H_\delta = H_{\delta 1}$ рабочая точка переходит на соответствующую характеристику — в точку 2 . Далее рабочая точка перемещается по прямой $H_\delta = H_{\delta 1}$ до точки 3 и в конце полупериода занимает исходное положение. В течение отрицательного полупериода траектория рабочей точки повторяется в области отрицательных значений Φ_k, H_k .

Используя полученную таким образом траекторию рабочей точки и располагая кривой $\Phi_k(t)$, легко построить кривую $H_k(t)$ или в другом масштабе — кривую тока в контуре $i_k(t)$.

Подсчитав индуктивность контурной обмотки по уравнению (3) и построив кривую изменения индуктивности во времени $L_k(t)$, нетрудно убедиться в том, что она сходна с зависимостью $L_k(t)$, представленной на рис. 1. Это обстоятельство является еще одной иллюстрацией в подтверждение правильности утверждения относительно параметрического характера колебаний в магнитном делителе частоты.

Кривые $\Phi_k(t)$, $H_\delta(t)$ и $H_k(t)$ нетрудно построить и более точно. Однако для получения приближенных условий самовозбуждения параметрических колебаний и исходных данных для расчета магнитных делителей частоты достаточно приведенное выше качественное построение траектории рабочей точки.

Для существования параметрических колебаний необходимо, чтобы энергия, вносимая источником питания в контур при изменении его индуктивности, была бы больше потерь в нем за тот же промежуток времени. За половину периода колебаний в контур вносится энергия, пропорциональная площади S , охватываемой траекторией рабочей точки (рис. 4).

Максимально возможная величина энергии, вносимой в колебательный контур за полупериод колебаний, приближенно равна площади треугольника OAC , стороны которого представляют собой предельную траекторию рабочей точки магнитного делителя. Под предельной траекторией понимается траектория, которая имеет место при скачкообразном изменении напряженности внешнего магнитного поля от нуля до $H_\delta = H_{\delta np}$ (рис. 4), когда максимум потока контурной обмотки равен потоку насыщения сердечника (точка 1 совпадает с точкой A).

Пренебрегая начальным наклоном прямой OA , определим предельное значение вносимой в контур электромагнитной энергии:

$$W_{np} = V \frac{B_s H_{k np}}{2} \cdot 10^{-8},$$

где V — объем обоих сердечников делителя частоты, см^3 ;

B_s — индукция насыщения (соответствует точке A), гс ;

$H_{k np}$ — предельная напряженность магнитного поля, а/см ,

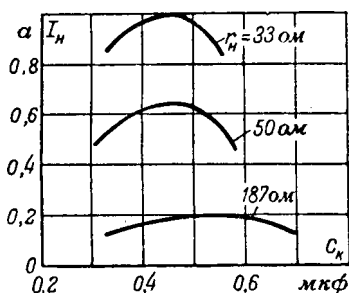


Рис. 5. Зависимость тока нагрузки магнитного делителя частоты от величины емкости колебательного контура.

Энергия, потребляемая нагрузкой магнитного делителя за полупериод, включая потери в нагрузочной и контурной обмотках, не может быть больше энергии, вносимой в контур за это же время, т. е. условие

$$V \frac{B_s H_{к нр}}{2} 10^{-8} \geq \frac{P}{2f} \quad (4)$$

является необходимым условием отдачи мощности на выходе магнитного делителя частоты. В уравнении (4) P — мощность нагрузки, включая потери во вторичных цепях *вт.* Это уравнение может быть использовано для ориентировочного расчета магнитного делителя: оно позволяет определить при заданном материале и объеме сердечников предельное значение выходной мощности или, наоборот, по заданной мощности — необходимый объем сердечников при прочих заданных параметрах.

При расчетах следует принимать: для трансформаторной стали

$$B_s = (7000 \dots 8000) \text{ гс}; H_{к нр} = (40 \dots 50) \text{ а/см},$$

для пермаллоя типа Н79М5

$$B_s = (4000 \dots 5000) \text{ гс}; H_{к нр} = (2,5 \dots 3) \text{ а/см}$$

На рис. 5 приведена полученная экспериментально зависимость тока нагрузки магнитного делителя, собранного по схеме рис. 2, от величины емкости колебательного контура. Параметры делителя указаны в приложении.

Наибольшей величины ток нагрузки достигает при величине емкости колебательного контура, соответствующей средней частоте собственных колебаний контура, близкой к половине частоты источника питания. Устойчивый же режим деле-

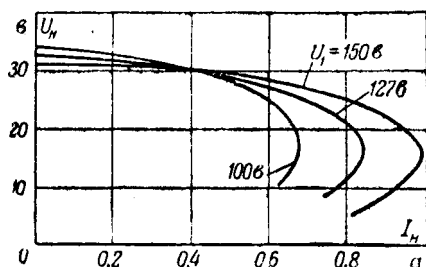


Рис. 6. Внешние характеристики магнитного делителя частоты при различной величине первичного напряжения.

ния частоты сохраняется в достаточно широких пределах изменения этой емкости.

Внешние характеристики одного из испытанных образцов магнитного делителя частоты приведены на рис. 6. Эти характеристики сняты при неизменном первичном напряжении и постоянной величине подмагничивания путем изменения сопротивления нагрузки (нагрузка активная). В начальной части характеристики влияние первичного напряжения незначительно. Ток нагрузки достигает максимального значения при некотором критическом значении сопротивления нагрузки. Дальнейшее уменьшение сопротивления вызывает уменьшение тока и напряжения на нагрузке.

Значение максимального тока нагрузки при прочих равных условиях зависит от величины тока подмагничивания (рис. 7). Эта зависимость объясняется тем, что с увеличением тока подмагничивания увеличивается изменение индуктив-

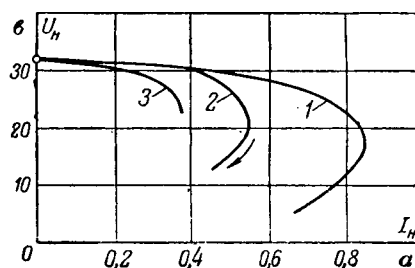


Рис. 7. Внешние характеристики магнитного делителя частоты при различной величине тока подмагничивания. 1 — нагрузка активная, $I_0 = 0,6 \text{ а}$; 2 — нагрузка активная, $I_0 = 0,3 \text{ а}$; 3 — нагрузка индуктивная, $I_0 = 0,3 \text{ а}$.

ности контура вследствие возрастания амплитуды первичного тока. При этом в контур вносится большая энергия, обуславливающая и большую величину максимального тока нагрузки. Опыты показывают, что этот ток достигает наибольших значений при значениях напряженности подмагничивающего поля, соответствующих области колена кривой намагничивания. При индуктивной нагрузке величина максимального тока нагрузки уменьшается.

На рис. 8, а представлена осциллограмма токов и напряжений магнитного делителя частоты в нормальном режиме работы.

При сопротивлении нагрузки, меньшем критического, и малой величине тока подмагничивания возможен также и другой режим работы, когда в его нагрузке появляются устойчивые медленные колебания, накладывающиеся на колебания основной частоты нагрузки 25 гц (рис. 8, б).

Частота этих колебаний составляет доли или единицы герц и зависит от значений сопротивления нагрузки, емкости контура, первичного напряжения, а также от величины тока подмагничивания. Исследование природы обнаруженных низкочастотных колебаний выходит за рамки данной статьи, однако, вероятно, эти колебания связаны с отрицательным сопротивлением, которое представляет собой цепь контура делителя при работе на нижней ветви внешней характеристики.

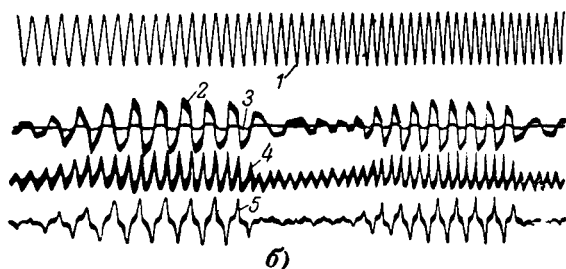
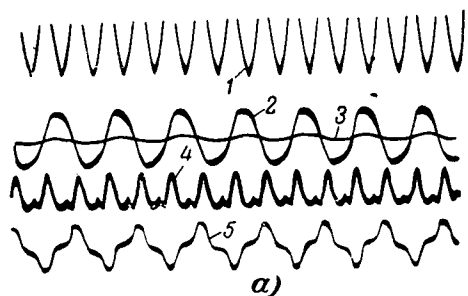


Рис. 8. Осциллограммы напряжений и токов магнитного делителя частоты.

а — в нормальном режиме; б — при малой величине тока подмагничивания.

1 — первичное напряжение; 2 — напряжение на нагрузке; 3 — ток нагрузки; 4 — первичный ток; 5 — ток в колебательном контуре.

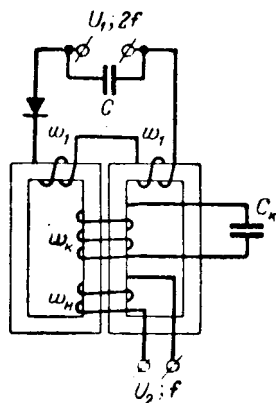


Рис. 9. Схема магнитного делителя частоты с объединенными первичными обмотками и обмотками подмагничивания.

Возможен также режим работы магнитного делителя без подмагничивания. В этом случае делитель уменьшает частоту тока в 3 раза. Следует отметить, что режим деления частоты на 3 менее устойчив. Для возбуждения этих колебаний необходимо либо дать начальный заряд емкости колебательного контура, либо кратковременно включить цепь подмагничивания.

При практическом использовании магнитных делителей для уменьшения потребляемого из сети тока следует первичные обмотки шунтировать емкостью, а с целью экономии обмоточного пространства первичные обмотки и обмотки подмагничивания объединять, включая вентиль в первичную цепь (рис. 9).

Испытания и опыт работы с магнитными делителями частоты показали их достаточно высокие

эксплуатационные качества: стабильность характеристик при колебаниях напряжения и частоты источника питания, при разбросе в параметрах деталей схемы и пр. Конструкция и схема магнитных делителей исключительно просты, что позволяет изготавливать их в условиях любой научной или производственной электротехнической лаборатории. По надежности работы магнитный делитель приближается к обычным трансформаторам.

Магнитные делители, как и магнитные умножители частоты, расширяют возможности получения различных частот статическим путем. При помощи комбинации магнитных делителей и умножителей из промышленной частоты могут быть получены частоты 25, 75, 125 гц и т. д., не содержащие нечетных гармоник промышленной частоты, что особенно важно для отстройки от помех в каналах телемеханики и связи. В устройствах телеуправления магнитные делители находят себе применение в качестве надежных источников импульсов частотой 25 гц, в устройствах телеизмерения частоты уменьшение промышленной частоты вдвое производится для удобства передачи по каналам высокочастотной связи. В счетно-импульсной технике для сокращения числа элементов схем при помощи магнитных делителей может осуществляться деление частоты следования периодических импульсов. Приведенные примеры, конечно, не исчерпывают всех возможных случаев применения магнитных делителей частоты, которые могут найти себе разнообразное применение в различных областях автоматики, телемеханики и связи.

Приложение. Пример расчета магнитного делителя частоты 50/25 гц.

Материал сердечников — трансформаторная сталь; мощность нагрузки $P = 40 \text{ вт}$; первичное напряжение $U_1 = 127 \text{ в}$.

Сбъем сердечников определяем на основании формулы (4), учитывая потери мощности коэффициентом 1,1:

$$V = 1,1 \cdot 10^8 \frac{P}{B_s H_{\kappa} n_p f} = \frac{1,1 \cdot 40 \cdot 10^8}{7 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 25} = 630 \text{ см}^3.$$

Выбирая тип сердечника Ш-24 (длина средней линии $l_{cp} = 25,6 \text{ см}$), найдем, что сечение сердечника $S = 12,3 \text{ см}^2$, а толщина пакета $h = 5,1 \text{ см}$.

Число витков каждой из первичных обмоток равно:

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 44 \cdot 2 f B_s S} = \frac{127 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 44 \cdot 50 \cdot 7 \cdot 10^3 \cdot 12,3} = 335.$$

Напряженность поля, создаваемого током в обмотке подмагничивания, можно представить как $H_0 = k H_{\kappa n_p}$. При больших насыщениях, имеющих место в магнитных делителях, $k = 0,2 \dots 0,3$.

Принимая $k = 0,25$ и $w_0 = 500$, определим ток в обмотке подмагничивания:

$$I_0 = \frac{k \cdot H_{\kappa n_p} \cdot l_{cp}}{w_0} = \frac{0,25 \cdot 40 \cdot 25,6}{500} = 0,51 \text{ а}.$$

Аналогично определяется амплитуда первичного тока:

$$I_{1 \text{ макс}} = \frac{(1 - k) H_{\kappa n_p} l_{cp}}{w_1} = \frac{(1 - 0,25) 40 \cdot 25,6}{335} = 2,29 \text{ а}.$$

Число витков контурной обмотки может быть определено из выражения

$$\omega_k^2 = \frac{L_{cp} l_{cp} \cdot 10^8}{0,4\pi S \mu_{0cp}},$$

где L_{cp} — средняя (за период выходной частоты) индуктивность контурной обмотки сердечника;

μ_{0cp} — среднее значение относительной магнитной проницаемости.

Величина μ_{0cp} может быть оценена как среднее геометрическое значение между максимальной и минимальной величинами магнитной проницаемости, имеющими место при работе магнитного делителя частоты:

$$\mu_{0cp} = \sqrt{\mu_{\max} \cdot \mu_{\min}}.$$

Для трансформаторной стали $\mu_{\max} = 3500$, а по кривой $\mu_0 = F(H)$ для значения $H = H_{кнр}$ определяем, что $\mu_{\min} = 200$ и, следовательно, $\mu_{0cp} = 835$.

Задавшись емкостью конденсатора в цепи колебательного контура $C_k = 0,5 \text{ мкф}$ и считая, что частота собственных колебаний контура должна быть равна выход-

ной частоте, т. е. 25 гц, найдем среднюю индуктивность каждой из контурных обмоток:

$$L_{cp} = \sqrt{\frac{1}{2(2\pi \cdot 25)^2 0,5 \cdot 10^{-6}}} = 6,38 \text{ гн.}$$

И, наконец, подставив полученные значения в указанную выше формулу, найдем, что $\omega_k = 3200$.

При определении числа витков ω_k следует иметь в виду, что это число должно быть, по возможности, максимальным, так как абсолютная величина изменения индуктивности контурной обмотки пропорциональна квадрату числа витков.

Получение необходимого напряжения и тока нагрузки делителя в пределах заданной мощности осуществляется соответствующим подбором в готовом образце числа витков нагрузочной обмотки или при помощи дополнительного выходного трансформатора.

По результатам приведенного расчета был изготовлен делитель частоты, имевший следующие параметры

$$\omega_1 = 400; \omega_0 = 500; \omega_k = 3500; \omega_n = 150.$$

Результаты измерений показали, что при активной нагрузке величина тока подмагничивания составляет 0,3...0,7 а, а мощность делителя равна 43 вт.

[11. 8. 1956]



КОНКУРС ПО ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРАМ

Центральное правление Научно-технического общества энергетической промышленности проводит конкурс по турбо- и гидрогенераторам. За лучшие работы присуждаются премии в размере 10 000 руб., 5 000 руб. и 3 000 руб.

Работы принимаются до 1 октября 1957 г. по адресу: Ленинград, Стремянная, 10, ЦЕНТОЭП.

Импульсный метод определения расстояния до места повреждения в пупинизированных кабелях

Инж. А. П. ОСАДЧИЙ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Для измерения расстояния до места повреждения на воздушных линиях электропередачи и связи, на силовых кабелях и ряде кабелей связи широкое применение получили импульсные приборы типов ИЛ-1 и ИКЛ-4, серийно выпускавшиеся нашей промышленностью. Были созданы также специальные импульсные приборы, имеющие более узкое назначение, например для целей измерений на строительных длинах коаксиальных кабелей и ряд других. С 1957 г. начинается выпуск нового универсального прибора типа ИКЛ-5, предназначенного для измерений как на воздушных, так и на кабельных линиях.

В последние годы были предприняты попытки применения существующих импульсных приборов для измерений на пупинизированных кабелях. На рис. 1, а приведена типичная картина, наблюдаемая на экране импульсного прибора при посылке в пупинизированный кабель узкого монополярного импульса. Такой характер процесса объясняется ранее отражениями импульса от пупиновских катушек, причем было установлено, что шаг пупинизации примерно соответствует полупериоду наблюдаемых колебаний. При измерениях на кабелях с большим числом шагов пупинизации закономерность наблюдаемых колебаний нарушалась и поэтому подсчитывать количество полупериодов становилось затруднительно. Измерение длины цепи по количеству полупериодов приводило к ошибке на несколько шагов пупинизации и поэтому такой метод не нашел распространения.

Пупинизированный кабель может быть представлен эквивалентной цепочечной схемой замещения, имеющей последовательно включенные индуктивности L пупиновских катушек и параллельно включенные емкости C , равные по величине емкости между жилами кабеля на длине шага пупинизации. Индуктивностью кабеля можно пренебречь, поскольку ее величина на длине шага пупинизации мала в сравнении с индуктивностью пупиновской катушки.

Как при включении цепочки на постоянное напряжение [Л. 1, 2], так и при посылке в нее узкого монополярного импульса, скорость распространения фронта импульса составляет $v = 1/\sqrt{LC}$ звеньев в секунду. С такой же скоростью по цепочке распространяются затухающие колебания, возбуждаемые импульсом в отдельных ее звеньях.

Затухающие колебания, отраженные от места повреждения кабеля через время $t = 2n/\sqrt{LC}$ (n — порядковый номер звена цепочки), возвращаются к месту посылки импульса, как это видно из рис. 1, а. До момента прихода отраженного импульса на экране видны колебания первого звена цепочки, которые и принимались ранее за

отражения от пупиновских катушек. Большая продолжительность колебаний в звеньях цепочечной схемы и связанная с этим большая длительность отраженных сигналов затрудняют измерения, создавая неправильные суждения о характере и месте повреждений кабеля.

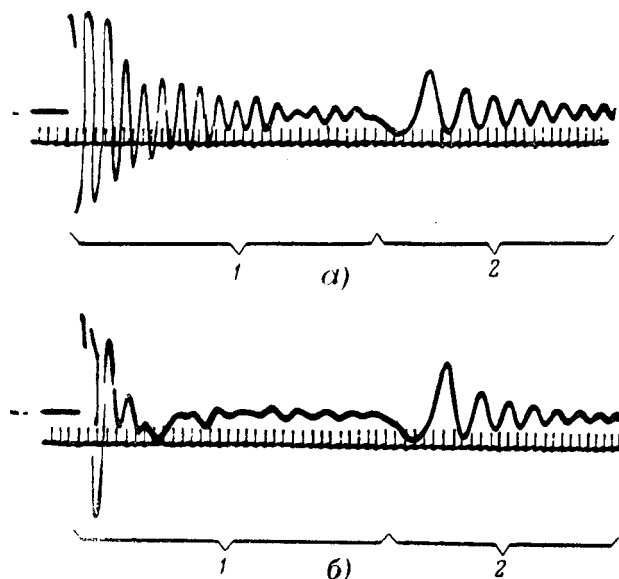


Рис. 1. Колебания в пупинизированном кабеле при коротком замыкании на конце кабеля.
Длина кабеля 47,62 км, шаг пупинизации 1,7 км, граничная частота 10 кГц.
а — посылка одного импульса; б — посылка двух сдвинутых импульсов.
1 — колебания, наблюдаемые на первом звене до прихода отражения от конца кабеля; 2 — колебания, отраженные от конца кабеля.

Колебания, возникающие при посылке монополярного импульса в пупинизированный кабель, затрудняют применение импульсного метода. Эти колебания могут быть значительно уменьшены путем посылки в кабель двух узких монополярных импульсов, сдвинутых один относительно другого. Параметры второго импульса подбираются таким образом, чтобы через полупериод после начала колебаний компенсировать их в первом звене цепочки. Для этого второй импульс выбирается той же полярности, что и первый, но со сдвигом во времени относительно первого импульса, равным длительности первого полупериода колебаний, возбуждаемых в первом звене ($\Delta t = \pi\sqrt{LC}$). Амплитуда второго импульса выбирается меньшей, чем амплитуда первого, так как колебания, вызванные первым импульсом, имеют затухающий характер. Длительности импульсов выбираются равными и меньшими половины периода колебаний. Значительное снижение длительности импульсов по сравнению с полупериодом колебаний нецелесообразно, так как при этом уменьшается содержание энергии в области

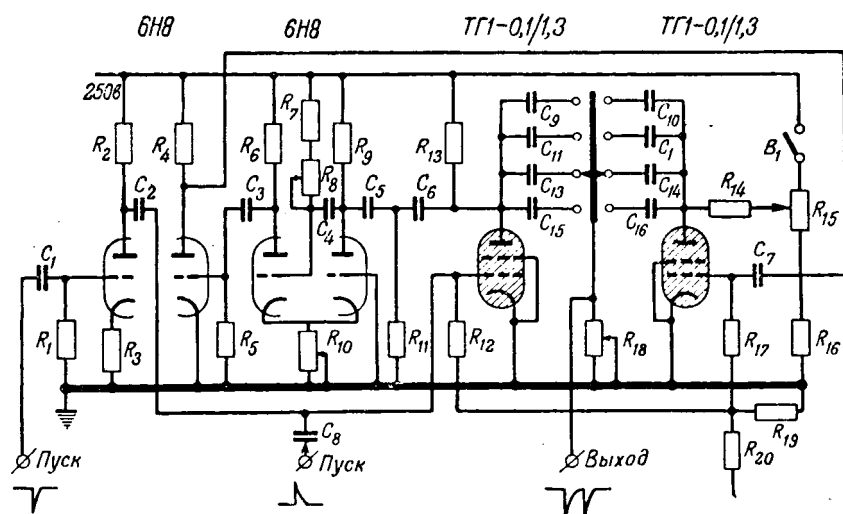


Рис. 2. Принципиальная схема приставки.

$R_1 = 200 \text{ ком}$; $R_2 = 20 \text{ ком}$ (1 Вт); $R_3 = 0,6 \text{ ком}$; $R_4 = 50 \text{ ком}$ (1 Вт); $R_5 = 36 \text{ ком}$; $R_6 = 10 \text{ ком}$ (1 Вт); $R_7 = 51 \text{ ком}$; $R_8 = 500 \text{ ком}$; $R_9 = 10 \text{ ком}$ (1 Вт); $R_{10} = 6,8 \text{ ком}$; $R_{11} = 3 \text{ ком}$; $R_{12} = 200 \text{ ком}$; $R_{13} = R_{14} = 130 \text{ ком}$; $R_{15} = R_{16} = 100 \text{ ком}$; $R_{17} = 200 \text{ ком}$; $R_{18} = 1 \text{ ком}$; $R_{19} = 30 \text{ ком}$; $R_{20} = 200 \text{ ком}$; $C_1 = C_2 = 1000 \text{ пф}$; $C_3 = 100 \text{ пф}$; $C_4 = 300 \text{ пф}$; $C_5 = 62 \text{ пф}$; $C_6 = C_7 = C_8 = 1000 \text{ пф}$; $C_9 = 2000 \text{ пф}$; $C_{10} = 0,01 \text{ мкф}$; $C_{11} = 0,05 \text{ мкф}$; $C_{12} = 0,01 \text{ мкф}$; $C_{13} = 2000 \text{ пф}$; $C_{14} = 0,01 \text{ мкф}$; $C_{15} = 0,05 \text{ мкф}$; $C_{16} = 0,1 \text{ мкф}$.

низких частот. Увеличение длительности импульса более полупериода не позволит произвести компенсацию колебаний в первом звене цепочки.

Характер повреждения в кабеле при передаче двух импульсов определяется по знаку первого колебания отраженного импульса.

Были проведены многократные измерения на пупинизированных кабелях, имеющих граничные частоты в пределах 4...90 кГц. При этом промежуток времени между импульсами и амплитуда второго импульса подбирались такими, чтобы свести к минимуму колебания в первом звене цепочки через полупериод после их возникновения. Испытания показали, что посылка двух сдвинутых импульсов на большинстве кабелей облегчает измерения. Посылка второго импульса оказывается особенно эффективной для обнаружения повреждений в начале линии (10...20 шагов пупинизации). На рис. 1,б приведена картина, наблюдаемая на экране прибора при посылке в кабель двух сдвинутых импульсов. Колебания в первом звене устранены и отчетливо видны импульсы, отраженные от мест повреждений кабеля, которые при измерениях обычным методом не могли быть обнаружены.

Приставки для генерирования двух сдвинутых по времени импульсов (рис. 2) собрана на двух тиратронах типа ТГ1-0,1/0,3 и двух лампах типа 6Н8. Тиратроны используются для генерирования сдвинутых импульсов путем разряда конденсаторов, стоящих в их анодных цепях, на общее выходное сопротивление. Эти конденсаторы переключаются ступенчато одновременно у обоих тиратронов, чем обеспечивается генерирование импульсов одинаковой длительности. Для подбора амплитуды второго импульса регулируется напряжение на аноде второго (слева) тиратрона. Сдвиг импульсов по времени осуществляется путем пуска второго тиратрона с задержкой, определяемой мультивибратором, собранным на второй (слева) лампе 6Н8. Задержка мультивибратора может плавно изменяться от 5 до 160 мксек. Такой диапазон задержек позволяет производить измерения на кабелях с граничными частотами от 60 до 3 кГц. Один триод первой лампы 6Н8 является буфером между мультивибратором и тиратроном, а второй служит для пуска первого тиратрона отрицательным импульсом, получаемым на выходе импульсного прибора.

При числе шагов пупинизации порядка 100 импульсный метод обеспечивает точность измерений ± 1 шаг. При посылке двух импульсов могут быть обнаружены обрывы или замыкания между жилами с сопротивлением в месте повреждения от нуля до десятикратной величины волнового сопротивления кабеля. Для измерений на пупинизированных кабелях наиболее целесообразным является применение прибора типа ИКЛ-5.

Литература

1. Д. Г. Карсон. Электрические нестационарные явления и операционное исчисление. ГНТИ Украины, 1934.
2. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях Госэнергоиздат, 1948

[15. 5. 1957]

О замыкании нулевых проводов воздушных линий низкого напряжения

Г. А. ШАШМУРИН

Свердловское отделение Тяжпромэлектропроекта

Воздушные четырехпроводные линии городских электросетей низкого напряжения расходятся из пунктов питания (подстанций) и точек разветвления в разные стороны, а затем сближаются (рис. 1). Нулевые провода этих линий в местах их сближения обычно не замыкаются. Их замы-

кание (пунктир) если и применяется, то в ограниченном числе случаев. Между тем, как будет показано ниже, сеть с замкнутыми нулевыми проводами надежнее в эксплуатации и дешевле.

Если нулевые провода трехфазной сети не замкнуты, то при разрыве какого-либо из них мо-

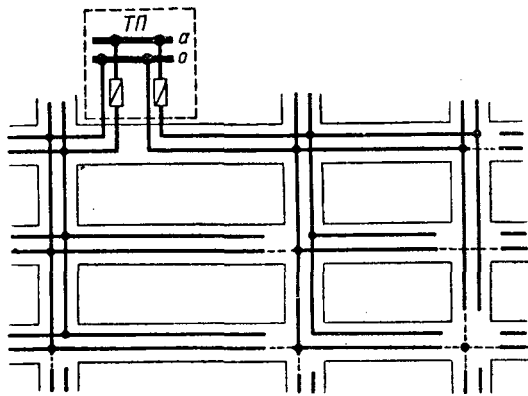


Рис. 1.

жет возникнуть резкая асимметрия напряжений у токоприемников, присоединенных к линии после места разрыва ее нулевого провода, и, следовательно, нарушение нормальной работы этих токоприемников. Примерно то же самое может произойти и в случае двухфазной линии с незамкнутым нулевым проводом даже при равномерной нагрузке ее фаз. В линиях с замкнутыми нулевыми проводами такая асимметрия напряжений на токоприемниках невозможна, так как любая точка нулевого провода линии после его обрыва остается связанной с нулевой точкой источника питания через достаточно малое сопротивление. Следовательно, сеть с замкнутыми нулевыми проводами значительно надежнее сети с разомкнутыми нулевыми проводами.

Можно опасаться, что нарушение контакта в нулевом проводе сети с замкнутыми нулевыми проводами длительное время не будет замечено, так как оно не сказывается на режиме работы сети. В результате линии с замкнутыми нулевыми проводами фактически превратятся в линии с разомкнутыми нулевыми проводами. Однако такое опасение неосновательно.

Нарушения контактов в воздушных линиях чрезвычайно редки. Их можно сделать практически невозможными, если контакты выполнить наиболее надежным способом. Конечно, в процессе эксплуатации необходима профилактика контактов, но она необходима и в сети с разомкнутыми нулевыми проводами.

В сетях с разомкнутыми нулевыми проводами при нарушении контакта в нулевом проводе или обрыве его возможны короткие замыкания, которые не будут отключены защитой.

При коротких замыканиях, показанных на рис. 2, ток пойдет через повторное заземление нулевого провода, так как, кроме него, у нулевого провода нет других связей с нулевой точкой источника питания. Сопротивление же заземлений, как известно, может изменяться в широких пределах, поэтому весьма вероятны случаи, когда сопротивление цепи тока короткого замыкания окажется настолько большим, что плавкая вставка не выгорит и короткое замыкание отключено не будет, хотя ток при этом может быть достаточным, чтобы повредить вводный кабель и оборудование на сетевой подстанции. Токоприемники, присоединенные к нулевому проводу за точкой обрыва и к оборванным фазным проводам, окажутся под линейным напряжением и могут выйти из строя. Останется неликвидированной и опасность поражения людей электрическим током.

При коротких замыканиях, показанных на рис. 2, плавкая вставка может не перегореть и в случае наличия замыкания нулевого провода линии с нулевым проводом, идущим от соседней подстанции, или со случайными параллельными нулевыми ветвями, поскольку сопротивления возникающих при этом связей оборванного нулевого провода с нулевой точкой источника питания не рассчитаны на выгорание плавкой вставки.

Сеть с замкнутыми нулевыми проводами не имеет и этого недостатка, так как ток короткого замыкания в данном случае пойдет не через повторное заземление, а через параллельные нулевые ветви, и окажется достаточным для выгорания плавкой вставки.

Расчет токов короткого замыкания в сети с замкнутыми нулевыми проводами при выборе плавкой вставки следует вести при условии обрыва нулевого провода в точке короткого замыкания. Расчетным следует считать тот случай короткого замыкания, при котором сопротивление петли фазный провод — нулевой провод до точки короткого замыкания является максимально возможным. При определении сопротивления петли следует принимать во внимание все возможные параллельные нулевые ветви.

Сеть с замкнутыми нулевыми проводами значительно надежнее и в отношении зануления, поскольку любая точка нулевого провода такой сети имеет двустороннюю связь с нулевой точкой источника питания и эта связь не прерывается при обрыве нулевого провода или при нарушении контакта в нем.

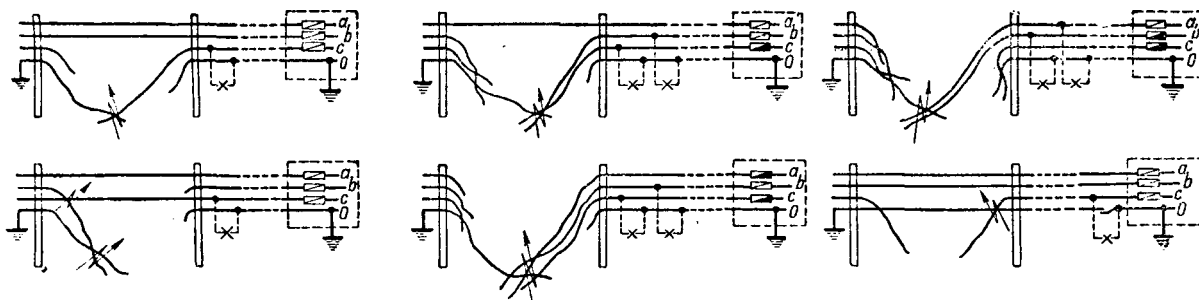


Рис. 2.

К 125-летию первой публичной демонстрации телеграфа П. Л. Шиллинга

Инж. А. В. ЯРОЦКИЙ

«Имя Шиллинга не может быть забыто в истории изобретений, да оно и не будет забыто, ибо распространение телеграфа послужит памятником его неутомимой деятельности».

Б. С. Якоби

(Архив АН СССР, фонд 187, опись 1).

Телеграфия явилась первой значительной областью практического применения знаний об электричестве и магнетизме и на протяжении нескольких десятилетий середины XIX в. составляла главное содержание прикладной электротехники. Развернувшееся в этот период строительство телеграфных линий выдвинуло целый ряд новых научных проблем и, вместе с тем, значительно расширило возможности научного экспериментирования. По этому поводу Дж. К. Максвелл писал, что «...важные приложения учения об электромагнетизме к телеграфии оказали воздействие на чистую науку, придав коммерческую ценность точным электрическим измерениям и предоставив электрикам возможность пользоваться аппаратами в таких масштабах, которые далеко превосходят масштабы любой обычной лаборатории» [Л. 1].

Идеи об электромагнитном телеграфе занимали еще Ампера, Гаусса, Вебера, Генри и других ученых. Для физиков более молодого поколения (Уитстона, Якоби, Максвелла, Томсона-Кельвина и др.) разработка теоретических и практических вопросов телеграфии уже стала на-

сущной необходимостью и составила существенную часть их деятельности.

Путь от идей об электромагнитном телеграфе к их воплощению в пригодных для практики устройствах был впервые проложен П. Л. Шиллингом.

Павел Львович Шиллинг родился 16 апреля 1786 г. в Ревеле (ныне Таллин). Как старший из четырех детей русского офицера, он после смерти отца был определен в кадетский корпус, с окончанием которого в 1802 г. его зачислили на должность офицера Генерального штаба. Однако вскоре Шиллинг оставил военную службу и в 1803 г. переехал в Мюнхен, где работал в качестве переводчика местного русского посольства. С началом Отечественной войны 1812 г. Шиллинг добился направления в действующую армию и за проявленный в боях героизм был награжден орденами и саблей «За храбрость». В 1816 г. Шиллинг организовал и возглавил первую в России литографию. В 1827 г., в результате успешных занятий востоковедением, он был избран в число членов-корреспондентов Петербургской академии наук по разряду литературы и

В сети же с разомкнутыми нулевыми проводами система зануления при обрыве нулевого провода может иногда превратиться из средства защиты от поражения электрическим током в источник опасности такого поражения. Это будет во всех случаях короткого замыкания, изображенных на рис. 2, а также и в некоторых других. В этом отношении очень опасны однофазные ответвления с разомкнутыми нулевыми проводами, так как в результате любого разрыва нулевого провода такого ответвления зануленные части оборудования могут оказаться под фазным напряжением.

Замыкание нулевых проводов позволяет получить некоторую экономию цветного металла.

При расчете разомкнутых городских сетей нередко бывает так, что сечение линии, достаточное по потере напряжения, недостаточно для выгорания плавкой вставки из-за большой длины линии. В этих случаях в сети с разомкнутыми нулевыми проводами обычно приходится увеличивать сечение проводов или устанавливать дополнительные

предохранители на удаленном участке линии. В сети с замкнутыми нулевыми проводами сопротивление петли фазный провод — нулевой провод до точки замыкания меньше, так как нулевые провода, принадлежащие к разным линиям, соединяются друг с другом параллельно. Следовательно, условия для выгорания плавкой вставки в сети с замкнутыми нулевыми проводами более благоприятны и увеличивать сечение проводов линии, достаточное по потере напряжения, либо совсем не приходится, либо приходится, но в меньшей степени, чем в сети с разомкнутыми нулевыми проводами.

Токи в нулевых проводах сетей с замкнутыми нулевыми проводами значительно меньше, чем в сетях с разомкнутыми нулевыми проводами. Поэтому при прочих равных условиях и потери напряжения в нулевых проводах в первом случае должны быть значительно меньше, а следовательно, несколько меньшим можно выбрать и сечение проводов при расчете по потере напряжения.

[15. 5. 1956]



древностей Востока. Организованная Шиллингом в 1830—1831 гг. научная экспедиция к границам Китая с участием основоположника русского китаеведения Н. Я. Бичурина оказала значительное влияние на развитие отечественного востоковедения.

Интерес Шиллинга к электротехнике возник еще в 1810 г., в результате непосредственного участия в работах члена Мюнхенской академии наук С. Т. Земмеринга над электролитическим телеграфом. В 1812 г. Шиллинг изобрел гальваническую мину. Изучение разнообразнейшего круга вопросов электротехники и лингвистики, оптического (семафорного) телеграфирования и криптографии подготовило Шиллинга к самостоятельному исследованию всех аспектов задачи электрического телеграфирования. Тесная связь с ученым миром Петербурга, частые посещения основных научных центров Европы (Парижа, Мюнхена, Геттингена, Берлина, Вены и др.), постоянное общение и переписка с крупнейшими европейскими учеными (Ампером, Араго, Гумбольдтом, Гауссом, Вебером, Швейгером, Эттингсгаузен и др.), — все это обеспечило Шиллингу широкую осведомленность о состоянии интересовавших его научных вопросов.

«Шиллинг имел то особое преимущество, — писал после смерти ученого Б. С. Якоби, — что служебное положение позволяло ему вполне оценить потребности своей страны в средствах связи. Удовлетворение этих потребностей и составило задачу, которую он стремился разрешить на протяжении всей своей жизни, с одной стороны, привлекая на помощь успехи естествознания, с другой стороны, направляя свой исключительно острый ум на создание и составление простейшей телеграфной азбуки. В последнем деле замечательным подспорьем ему послужило специальное знание восточных языков. Два совершенно различных направления знаний — естественные науки и востоковедение — слились вместе, чтобы помочь возникновению телеграфии» [Л. 2].

До сих пор представления о работах Шиллинга в области телеграфии исчерпывались сведениями, собранными в 1860 г. академиком И. Гамелем [Л. 3] и в 1886 г. деятелями Русского технического общества [Л. 4]. Они касались, главным образом, шестистрелочного аппарата, продемонстрированного Шиллингом в 1832 г. в Петербурге и сохранившегося в подлинниках, и пятистре-

лочного аппарата, продемонстрированного изобретателем в 1835 г. в Бонне и описанного в 1838 г. профессором Геттингенского университета Г. Мунке [Л. 5].

Между тем, как показывают недавно обнаруженные материалы, Шиллинг еще в 1828—1830 гг. создал однострелочный телеграф [Л. 6].

Приборы каждой станции однострелочного телеграфа Шиллинга состояли из передатчика, приемника, коммутатора и источника питания (рис. 1). Передатчик представлял собой две квадратные деревянные плашки. Одна из них, укрепляемая неподвижно на столе, имела по углам четыре чашечки, наполненные ртутью. К двум чашечкам, находившимся друг против друга по диагонали, подключались линейные провода, к двум другим — электрическая батарея. Вторая плашка такого же размера и формы была съемной. Две металлические петли с платиновыми наконечниками были укреплены под съемной плашкой таким образом, что при наложении ее на неподвижную плашку наконечники входили в чашечки с ртутью, подсоединяя батарею к телеграфной линии. В за-

висимости от того, как при этом сопрягались стороны обеих плашек, каждый полюс батареи оказывался подключенным к одному или другому проводу телеграфной линии, а следовательно; этим определялось направление посылаемого в линию электрического тока. Для безошибочной посылки тока в требуемом направлении на поверхности съемной плашки было нарисовано четыре равных треугольника, каждая накрест расположенная пара которых была окрашена в белый или черный цвет. Для удобства работы съемная плашка передатчика была снабжена ручкой.

Приемник представлял собой мультипликатор с астатической стрелкой. Тонкая металлическая ось, пропущенная через центры магнитных стрелок, подвешивалась на шелковой нити к кронштейну. Для удобства наблюдения за поворотами стрелки к верхней части оси был прикреплен небольшой диск. Одна сторона сигнального диска была окрашена в белый цвет (этой стороной диск поворачивался к наблюдателю, когда на передающей станции съемная плашка передатчика устанавливалась так, что белые треугольники занимали вертикальное положение). Другая сторона сигнального диска была окрашена в черный цвет (этой стороной диск поворачивался к на-



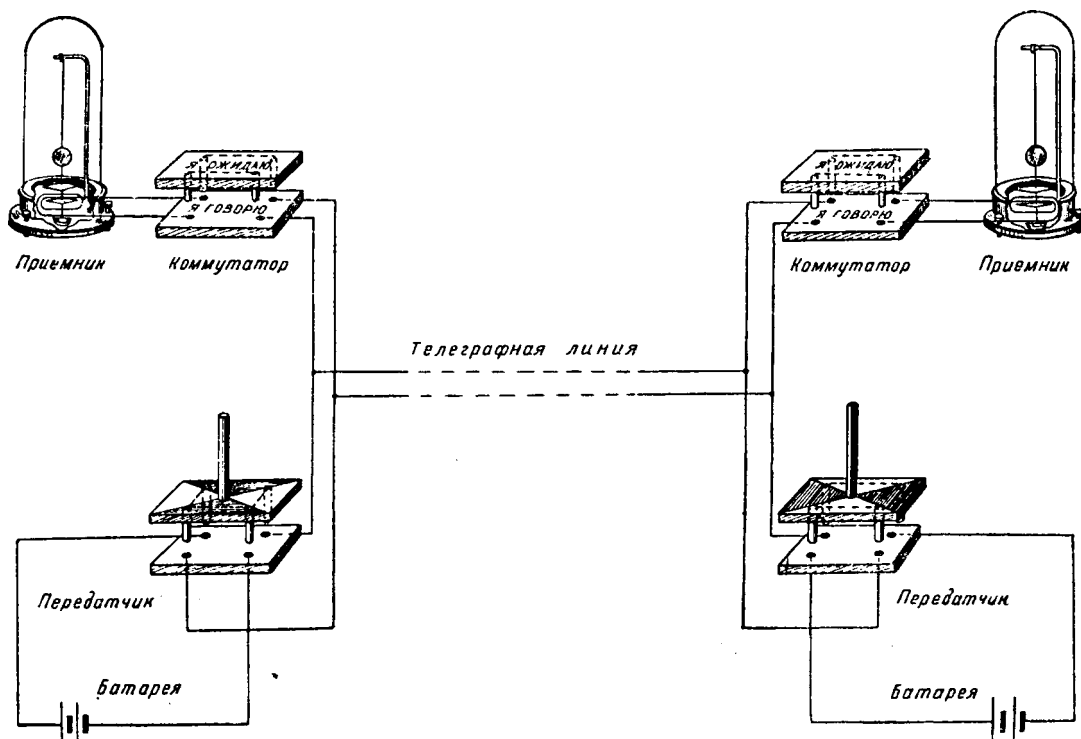


Рис. 1.

блюдателю при передаче сигнала током противоположного направления). Плавность поворотов подвижной системы мультипликатора обеспечивалась ртутным демпфером: маленькой платиновой лопастью, укрепленной на нижнем конце металлической оси подвижной системы и опущенной в чашечку с ртутью. Когда сигналы не поступали в приемник, его подвижная система должна была находиться в исходном положении, и сигнальный диск располагаться ребром к наблюдателю.

Коммутатор состоял из двух деревянных плашек, накладывавшихся друг на друга. Нижняя плашка укреплялась неподвижно и имела две пары чашечек с ртутью. К одной паре чашечек подключалось два провода, соединенных с обмоткой мультипликатора; к другой — провода телеграфной линии (параллельно с передатчиком того же аппарата). На нижней плашке имелась надпись «Я говорю». Верхняя съемная плашка была снабжена парой металлических перемишек с платиновыми наконечниками. При наложении съемной плашки на нижнюю плашку наконечники перемишек первой входили в соответствующие чашечки с ртутью второй и, следовательно, приемник оказывался подключенным к телеграфной линии. На съемной плашке имелась надпись: «Я ожидаю».

При отсутствии передачи коммутаторы обеих станций должны были находиться в положении «Я ожидаю», т. е. приемники обеих станций оставались подключенными к телеграфной линии. В передатчиках обеих станций при этом, наоборот, верхние плашки оставались снятыми, т. е. батареи отключались от линии. На станции, желающей начать передачу, коммутатор переводился в положение «Я говорю» (верхняя плашка

коммутатора снималась, следовательно, собственный приемник отключался от линии) и начинали манипулировать верхней плашкой передатчика, посылая соответствующие сигналы в линию.

Разработанная Шиллингом для однострелочного телеграфа азбука состояла из комбинаций разного числа (от одного до пяти) последовательных сигналов, посылаемых током разного направления, т. е. представляла собой первый в истории телеграфии неравномерный код (рис. 2).

Таким образом, Шиллинг уже в 1828—1830 гг. нашел лучшее решение задачи об электромагнитном телеграфе, ограничив число линейных проводов одной парой вместо 36-ти, предлагавшихся всеми его предшественниками при отсутствии кода.

Однако в тот период неравномерный код еще не получил признания, так как казался чересчур осложняющим и замедляющим процесс телеграфирования: для распознавания каждой буквы требовалась запись (или запоминание) всей комбинации обозначающих ее последовательных сигналов. Экономическая же целесообразность достигаемого таким путем сокращения числа линейных проводов могла быть оценена по достоинству только впоследствии; когда началось устройство достаточно длинных телеграфных линий.

В поисках паллиативного решения Шиллинг обратился к идее, осуществленной еще в 1811 г. С. Т. Земмерингом для электролитического телеграфа. Как известно, с целью сокращения количества требующихся линейных проводов, Земмеринг разработал восьмизначный шифр, обозначая

Буквы и цифры	Последовательность отклонений стрелки					Буквы и цифры	Последовательность отклонений стрелки				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
А	п	л				U	л	л	п		
В	п	п	п			V	л	л	л		
С	п	л	л			W	п	л	п	л	
Д	п	п	л			X	л	п	л	п	
Е	п					Y	п	л	л	п	
Ф	п	п	п	п		Z	л	л	п	п	
Г	л	л	л	л		&	п	п	л	п	
И	п	л	л	л		добавь	л	п	п	л	
І	п	п				стол	л	п	л	л	
Ј	п	п	л	л		конец	л	л	п	л	
К	п	п	п	л		1	п	л	п	л	п
Л	л	п	п	п		2	п	п	л	п	п
М	л	п	л			3	п	л	л	л	п
Н	л	п				4	л	п	п	п	л
О	п	л	п			5	л	п	п	л	л
Р	л	л	п	п		6	л	п	л	п	л
Q	л	л	л	п		7	п	п	л	л	п
R	л	п	п			8	п	л	л	п	п
S	л	л				9	л	л	п	л	л
T	л					0	л	л	п	п	л

Рис. 2.

каждую букву двумя одновременными сигналами из восьми возможных [Л. 7].

В применении к электромагнитному телеграфу Шиллинг получил возможность еще более рационального использования этого пространственно-комбинационного способа передачи сигналов. Так же как и в однострелочном телеграфе, сигнализируя током двух направлений, ученый при помощи только шести мультипликаторов обеспечил передачу всех букв русского алфавита, обозначая каждую из них одновременным отклонением стрелок одного, двух или трех мультипликаторов из шести.

Сначала Шиллинг комплектовал станцию шестистрелочного телеграфа приборами однострелочного телеграфа, т. е. составлял ее из шести отдельных передатчиков и шести отдельных приемников описанной выше конструкции. Кроме того, Шиллинг ввел седьмой мультипликатор, специально предназначенный для приема вызова, снабдив его часовым механизмом и звонком. Однако трудности работы с таким числом отдельных приборов побудили Шиллинга разработать для шестистрелочного телеграфа единый передатчик с восемью парами белых и черных клавиш и единый приемник с шестью мультипликаторами, смонтированными на общей раме [Л. 8].

Имея в виду, что в латинском алфавите меньше букв, чем в русском, Шиллинг по этому же принципу в 1835 г. построил для известной демонстрации на Боннском съезде немецких естествоиспытателей и врачей аппарат всего с пятью мультипликаторами (рис. 3).

Описывая телеграфы Шиллинга, Г. Мунке указывал, что «...для составления буквенных знаков Шиллинг ограничивался одной стрелкой, зная

хорошо, что для увеличения числа возможных одновременных комбинаций нетрудно поместить несколько стрелок в ряд, которые смогут быть приведены в движение столыками же проводами, сведенными в один общий кабель» [Л. 5].

К. Гаусс писал Шиллингу в 1835 г. по поводу его пятистрелочного телеграфа следующее: «Там, где можно позволить более значительный расход на цепь из нескольких проводов (по Вашей идее — из 7-ми), Ваш способ даст, с одной стороны, несколько большую скорость, с другой — большую независимость от степени натренированности лиц, пользующихся телеграфом» [Л. 9].

Шиллинга, как впоследствии писал Якоби, никогда не оставляла мысль довести дело до устройства электрической связи между Петербургом и Москвой, но на первых порах реальной могла быть прокладка лишь коротких линий. На экспериментальную линию, проложенную изобретателем в 1836 г. вокруг здания адмиралтейства в Петербурге, было израсходовано около 9 км провода. Линия между Петергофом и Кронштадтом, проект которой русское правительство в 1837 г. поручило составить Шиллингу (незадолго до его смерти), должна была иметь общую протяженность около 15 км. При устройстве таких коротких линий экономические преимущества однострелочного телеграфа не могли проявиться достаточно наглядно, а указывавшиеся Гауссом достоинства многострелочного аппарата (большая скорость и простота телеграфирования) побуждали отдать предпочтение последнему.

Тем не менее, при прокладке и испытаниях шестистрелочного телеграфа Шиллинг широко пользовался приборами однострелочного телеграфа, как простым средством служебной связи со своими помощниками. Это обстоятельство и послужило одной из причин того, что впоследствии самостоятельная роль однострелочного телеграфа

Буквы и цифры	Порядковый номер клавиш и мультипликатора					Буквы и цифры	Порядковый номер клавиш и мультипликатора				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
А	п					S				л	л
В	л					T	п		п		
С		п				U	л		л		
Д		л				V		п		п	
Е			п			X		л		л	
Ф			л			Y			п		п
Г				п		Z			л		л
И				л		1	п	п	п		
І					п	2	л	л	л		
К					л	3		п	п	п	
Л	п	п				4		л	л	л	
М	л	л				5			п	п	п
Н		п	п			6			л	л	л
О		л	л			7	п		п		п
Р			п	п		8	л		л		л
Q			л	л		9		п	п		п
R				п	п	0		л	л		л

Рис. 3.

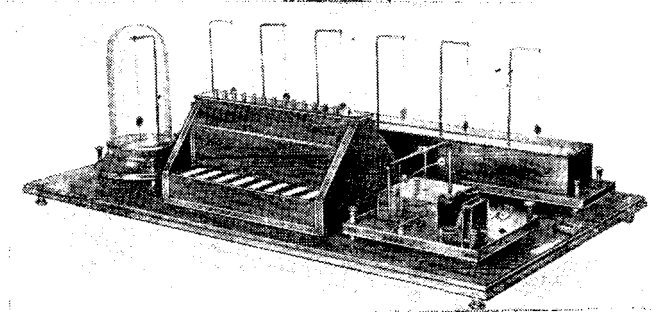


Рис. 4.

в творческой деятельности Шиллинга постепенно забывалась. В 1881 г. в русском отделе Парижской международной выставки рядом с приборами шестистрелочного телеграфа Шиллинга были представлены также и отдельные части его однострелочного телеграфа. Однако в 1886 г. на известном юбилейном собрании Русского технического общества эти части уже не демонстрировались, так как главный механик петербургского телеграфа И. Н. Деревянкин для удобства демонстрации смонтировал все приборы шестистрелочного телеграфа на общей столешнице, добавив сюда же и приемник однострелочного телеграфа (рис. 4).

Забвению однострелочного телеграфа Шиллинга немало способствовало также то обстоятельство, что тотчас после его смерти развитие и совершенствование получил только пятистрелочный телеграф. Англичанин В. Кук, ознакомившись с телеграфом Шиллинга в 1836 г. в Гейдельбергском университете на лекции проф. Г. Мунке, писал: «Я так был захвачен удивительным свойством электричества и так был поражен его применением к практической передаче сообщений, что с этого знаменательного дня совершенно оставил свои основные занятия и целиком отдался практической реализации телеграфа» [Л. 10]. Привлеченный Куком для выполнения этой задачи английский физик Ч. Уитстон в 1837 г. ввел в конструкцию и схему пятистрелочного телеграфа ряд усовершенствований.

По свидетельству Якоби, Шиллинг давно «помышлял о самоотмечающем снаряде», т. е. вынашивал идею о пишущем телеграфе [Л. 11]. Как известно, дальнейшее развитие телеграфии пошло именно по этому пути. Пишущие телеграфы Штейнгейля (1837 г.), Якоби (1839 г.) и Морзе (1844 г.) были построены на основе неравномерного кода и явились последовательными этапами в развитии и совершенствовании однострелочного телеграфа.

С другой стороны, пятистрелочный телеграф также не оказался бесплодным для будущего. Пятизначный равномерный код лежит в основе всей современной буквопечатающей телеграфии.

Крупнейшей заслугой Шиллинга явились его исследования и изобретения в области электрической изоляции. Отлично понимая, что от разрешения этого вопроса зависит сама возможность электрического телеграфирования, Шиллинг еще в 1811 г., находясь в Мюнхене, испытывал в ба-

ках с водой, а затем в реке Изар проводники, изолированные шелком или пенькой, пропитанной озокеритом.

В 1827 г. Шиллинг писал что «...располагает проводом в 200 английских футов длины и 4 линии толщины, изготовленным еще в 1813 г. Хотя с этим проводом произведено уже около тысячи опытов и он пролежал в земле шесть месяцев, в илистом грунте — целое лето и две зимы под снегом, он после всего этого сохранил полную пригодность, и надо надеяться, сохранит ее и далее, пока на нем останется хоть один целый слой волокна» [Л. 9].

Позднее Шиллинг таким же образом испытывал изолированные провода с обмоткой, покрытой лаком или изолированные изобретенной им специальной каучуковой массой. В 1881 г. на Парижской выставке экспонировался образец изобретенного Шиллингом телеграфного кабеля, который имел «...восемь медных проводов, каждый из которых был изолирован слоем каучуковой массы, а все вместе снаружи обернуты пенькой, пропитанной каучуком» [Л. 6, 6, в].

Шиллинг не ограничился эмпирической оценкой качества изоляции и летом 1836 г. в Вене совместно с профессорами В. Жакеном и А. Эттингсгаузенем пытался найти более строгие сравнительные характеристики различных видов изоляции. Испытанию были подвергнуты короткие линии, проложенные в земле, в воде и по воздуху. Никаких точных измерений Шиллинг произвести не мог. Тем не менее ему удалось неопровержимо установить, что изоляция самых лучших образцов его кабеля, проложенного в земле или в воде, безусловно уступает изоляции голых проводов, подвешенных в воздухе на изоляторах.

Опираясь на результаты этих опытов, Шиллинг предложил при рассмотрении в правительственной комиссии проекта устройства телеграфа между Петергофом и Кронштадтом вариант такой трассы телеграфной линии, который предусматривал прокладку большей ее части по суше голым проводом на столбах вдоль Петергофской дороги. Способ прокладки линии, предложенный Шиллингом, был тогда отвергнут не только потому, что показался членам комиссии фантастическим, но также и потому, что не соответствовал желанию правительства сохранить в строгой тайне новое средство связи. Последующее развитие телеграфии подтвердило как справедливость выводов Шиллинга в отношении воздушных линий, так и ценность его изобретений в области кабельной техники.

Много труда Шиллинг также положил на то, чтобы создать пригодные для длительной эксплуатации источники питания. Им было разработано в 1828—1830 гг. несколько оригинальных конструкций гальванических медно-цинковых батарей: стационарных в фаянсовых сосудах, переносных в цинковых коробках с выемными медными электродами и т. д.

Разносторонние исследования и изобретения П. Л. Шиллинга достаточно убедительно продемонстрировали прикладное значение электро-

НЕОТЛОЖНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ

(Статья А. А. Глазунова, *Электричество*, № 7, 1956)

Инж. Э. С. ИОХВИДОВ

Мосэнерго

А. А. Глазунов считает, что при устройстве глубоких вводов высокого напряжения в городах в ряде случаев может оказаться экономически выгодной промежуточная трансформация энергии. По его мнению, это может быть даже в тех случаях, когда внешнее электропитание города осуществляется при напряжении 110 кВ. С этим мнением нельзя согласиться.

Опираясь на данные США, А. А. Глазунов считает принимаемые для городов СССР расчетные плотности нагрузок заниженными. Но если даже ориентироваться на плотность нагрузки в 10 Мвт/км², принимаемую у нас в проектах для кварталов новой многоэтажной застройки, то легко доказать ненужность промежуточной трансформации при устройстве глубоких вводов. Действительно, примем радиус действия подстанции глубокого ввода в 1,5 км, что значительно меньше радиусов действия существующих подстанций, тогда рабочая мощность районной подстанции глубокого ввода будет равна 70...80 Мва. При такой мощности, промежуточная трансформация энергии, например 110/35 кВ, бессмысленна, так как выгоднее проложить 1—2 кабеля 110 кВ, чем прокладывать пучки кабелей 35 кВ.

При отсутствии промежуточной трансформации подстанция глубокого ввода сооружается по схеме блока линия—трансформатор без выключателей со стороны высшего напряжения.

Пример г. Ташкента, приведенный А. А. Глазуновым, не характерен. Исследования, проведенные в Ленэнерго, показали, что при напряжении распределительной сети 6 кВ и протяженности фидеров 4 км и более, что соответствует плотности нагрузки 5 Мвт/км² и менее, может оказаться выгодным выполнять фидеры кабелем 35 кВ и применять на фидерном пункте схему блока кабель—понижающий трансформатор 35/6 кВ. Примерно так и выполнена сеть г. Ташкента.

Однако фидерная сеть 35 кВ в районах с малой плотностью нагрузки и глубокие вводы в районы с большой плотностью нагрузки—это разные понятия, и объединение их под общим названием «глубокий ввод» может внести только путаницу в теорию городских электрических сетей.

А. А. Глазунов обошел молчанием важный вопрос о необходимости самого широкого внедрения в распределительные сети напряжения 10 кВ и о недопустимо медленном рассмотрении вопроса о введении для этих сетей напряжения 20 кВ. Внедрение указанных напряжений сделает невыгодным во всех встречающихся на практике случаях применение для фидерной сети напряжения 35 кВ.

Нужно с большой осторожностью отнестись к выводам А. А. Глазунова о преимуществах применения для городских низковольтных сетей напряжения 220/127 в. Во всех городах страны, кроме Москвы, длительное время широко внедряется напряжение 380/220 в. Существующие распределительные сети постепенно переводятся на это напряжение. Возврат к напряжению 220/127 в означает удвоение вложений цветного металла в новые сети и серьезные затруднения в покрытии растущих коммунально-бытовых нагрузок старых сетей. При существующем дефиците цветных металлов вряд ли правильно возвращаться к напряжению 220/127 в.

Однако сказанное не следует понимать как полный отказ от напряжения 220/127 в. В районах многоэтажной застройки, где плотность нагрузки высокая и где сетевые подстанции делаются почти в каждом доме и наружные сети низкого напряжения практически отсутствуют, следует применять напряжение 220/127 в.

На некоторые объекты, возможно, окажется целесообразным распространить опыт США по применению промежуточного напряжения 400...500 в. К таким объектам можно было бы отнести сельскохозяйственную и промышленную выставки в Москве и Дворец Советов.

Нельзя признать обоснованным мнение А. А. Глазунова о том, что, несмотря на равенство капитальных

техники и впервые вывели ее из лабораторий на арену практической жизни. Непосредственным результатом строительства первых линий электромагнитного телеграфа явилось появление предприятий по производству электротехнического оборудования (в Англии—Кука, в России—Якоби). Преодоление трудностей, встреченных Шиллингом в области электрических измерений, превратилось в неотложную задачу и установление системы электрических единиц явилось прямым следствием распространения телеграфов.

Таким образом, работы П. Л. Шиллинга сыграли основополагающую роль в области прикладной электротехники и стимулировали дальнейшее развитие теоретической мысли в этом направлении.

Литература

1. Дж. К. Максвелл. Тракта́т об электричестве и магнетизме. Предисловие к первому изданию. Москва, 1953.
2. М. Н. Якоби. *Elektromagnetische Telegraphen*. „Oesterreichischer Beobachter“, № 96, 1838.
3. И. Х. Гамель. Возникновение гальванического и электромагнитного телеграфа. Бюллетень Петербургской

Академии наук, т. II, стр. 92—136, № 2 и стр. 298—303, № 4, 1859—1860.

4. Изобретатель электромагнитного телеграфа. Изд. Русского технического общества. Петербург, 1886.

5. G. W. M u n c k e. Die elektrische Telegraph Geler's Physikalischer Wörterbuch. т. IX. Geidelberg, 1838.

6. а) Архив АН СССР, фонд 802, опись 1, № 339, л. ст. 91—97 и 167—168.

б) Aug. Guerout. L'histoire de la télégraphie électrique. „La Lumière électrique“. Paris, стр. 335—338, 1883.

в) J. Fahie. A history of the electric telegraph to the year 1837. London, 1884.

г) „Allgemeine Bauzeitung“, стр. 440, № 52, 1837.

д) Annals of Electricity. London, 1838.

е) A. Vail. The american electromagnetic telegraph. Philadelphia, стр. 156, 1847.

7. А. В. Яроцкий. Павел Львович Шиллинг. Госэнергоиздат, 1953.

8. В. И. Коваленков. Павел Львович Шиллинг. Известия АН СССР. Отделение технических наук, № 6, 1953.

9. Архив АН СССР, фонд 85, опись 3, № 47.

10. W. C o o k e. The electric telegraph: was it invented by professor Wheatstone? 1866.

11. Речь экстраординарного академика Б. С. Якоби в публичном заседании Академии наук 29 декабря 1843 г. „Об электротелеграфии“. Архив АН СССР, фонд 187, опись 1, № 77, лист 14.



затрат и расходов на эксплуатацию замкнутых и разомкнутых резервированных сетей, предпочтение должно отдаваться замкнутым сетям. Ссылка на опыт США малоубедительна. Известно, что ряд электрических компаний США не применяет замкнутых сетей, а в городах Западной Европы эти сети не получили большого распространения. Также неверно утверждение, что замкнутые сети при напряжении 220/127 в требуют меньших первоначальных затрат.

Общезвестно, что при одновременной постройке домов на участке создание замкнутой сети низкого напряжения требует большого авансирования капиталовложений. Это обстоятельство серьезно затруднило внедрение замкнутых сетей в Ленинграде, где из-за этого многие участки замкнутой сети долгие годы остаются не завершенными.

В городах США широко развита продажа под застройку земельных участков с готовыми городскими инженерными коммуникациями всех видов. В таких условиях, при которых крупное авансирование капиталовложений является неизбежным, замкнутая сеть типа «сетки», вероятно, наиболее выгодна. Однако это не соответствует практике наших городов.

Участок замкнутой сети должен питаться от одного источника и даже от одной секции шин. Питание связанных между собой замкнутых распределительных сетей высокого напряжения от разных питающих центров, от разделенных или делящихся при аварии секций шин одного питающего центра технически недопустимо. Для питания замкнутых сетей низкого напряжения такие схемы возможны, но они требуют применения дорогостоящих мероприятий по искусственному выравниванию нагрузки трансформаторов и линий. Стоимость этих мероприятий сторонники замкнутых сетей обычно не учитывают.

Питание замкнутой сети от одних шин приводит к резкому снижению надежности электроснабжения больших районов города. Секционированная же сеть с различными системами автоматического включения резерва на высоком и низком напряжении не имеет этого недостатка. Один и тот же участок этой сети может питаться от разных секций шин одного питающего центра или разных питающих центров без дополнительных затрат.

Вопрос о возможности питания сети от разных источников питания тесно связан с вопросом о применении глубоких вводов и внедрении более высоких напряжений распределительной сети.

Рентабельность глубоких вводов зависит от применения на подстанциях простейших блочных схем и осуществления взаимного резервирования подстанций через распределительные сети. Это означает, что большинство участков сети города будет питаться от разных подстанций.

При внедрении напряжения 10 кВ или более высоко, на одних и тех же участках городской территории длительное время имеют место два напряжения и питание сети этих участков приходится осуществлять от разных распределительных устройств, что невозможно при замкнутых сетях.

От городских сетей низкого напряжения питаются преимущественно потребители третьей категории, не требующие резервирования. Поэтому подавляющее большинство воздушных распределительных сетей низкого напряжения построено в виде нерезервируемых вводных магистралей. Необходимость резервирования этих магистралей возникает при выполнении сетей кабелем. В тех же случаях, когда малозэтажные здания внутриквартальной застройки близко расположены одно к другому, можно не резервировать и кабельные вводные линии, так как во время сравнительно редких повреждений этих линий питание зданий можно осуществлять по шланговому кабелю от сетевой подстанции или соседнего здания.

Что же касается многоэтажных зданий, то на два-три таких здания, которые стоят рядом, приходится отдельная сетевая подстанция. Резервирование электроснабжения таких домов дешевле осуществить путем прокладки к дому двух параллельных вводов от ближайшей сетевой подстанции, чем путем устройства петлевых магистралей от разных подстанций.

Такое решение позволяет при нормальном режиме питать силовую и осветительно-бытовую нагрузки от разных вводов, что обеспечивает более высокую, чем при замкнутой сети, стабильность напряжения у ламп и бытовых приборов. Кроме того, оно дает существенную экономию проводникового материала, так как сечение коротких линий определяется нагревом кабеля, а кабели меньших сечений допускают значительно большие плотности тока. Наконец, отпадает необходимость в дорогостоящих петлевых вводных устройствах.

Все вышеизложенное показывает, что утверждение о преимуществах замкнутых сетей не обосновано. Не дают оснований для такого утверждения длительная дискуссия по этому вопросу и исследования, проведенные в сетях разных городов.

Последние разработки всевозможных вариантов однолучевых секционированных сетей с автоматизированным резервированием показывают, что возможности построения новых схем распределительных сетей далеко еще не исчерпаны и что делать окончательные теоретические обобщения еще рано.

В заключение следует присоединиться к мнению А. А. Глазунова о том, что вопросы рационального построения городских электрических сетей заслуживают гораздо большего внимания со стороны Технического управления и Технического совета Министерства электростанций и что следует всячески форсировать проведение исследовательских работ и широко освещать их результаты в печати.

Инж. Р. И. КЛИОНСКАЯ

Институт энергетики Академии наук Белорусской ССР

Сторонники применения для городских электросетей напряжения 220/127 в обычно указывают на его экономические преимущества: большую световую отдачу ламп накаливания напряжением 127 в и меньший расход энергии на освещение при этих лампах.

В существующих, часто сильно перегруженных сетях 220/127 в потеря напряжения обычно очень велика. Перевод этих сетей на 380/220 в настолько повышает их пропускную способность и уменьшает потери напряжения, что это с избытком окупает снижение световой отдачи ламп 220 в по сравнению с лампами 127 в.

При переходе на напряжение 220 в потребитель не станет заменять привычные для него лампы на лампы большей мощности, и, следовательно, потребление электроэнергии на освещение жилых домов не должно увеличиться. Что же касается световой отдачи, потребитель вряд ли даже заметит 15...20-процентную разницу в освещенности, особенно при тех колебаниях напряжения в разные часы суток, которые имеют место в существующих сетях, и несовершенстве светильников, применяемых в жилых помещениях.

Значительную долю максимальной нагрузки каждого жилого дома (около 50%) составляет бытовая нагрузка и она не изменится оттого, что будет принято более высокое напряжение сети.

В городах, где получили распространение телевизоры, а таких городов будет все больше и больше, в часы вечернего максимума, когда включаются телевизоры и отключается часть электрических ламп [Л. 1], осветительная нагрузка составит еще меньшую часть общей нагрузки дома.

Некоторые потребители будут применять люминесцентное освещение, что опять-таки приведет к снижению доли осветительной нагрузки от ламп накаливания в общей нагрузке городской электрической сети.

Очевидно, в будущем рост нагрузки городских сетей в основном будет происходить за счет большего применения населением бытовых электроприборов и большего развития силовой нагрузки. Осветительная составляющая нагрузки будет расти медленнее. Поэтому меньшая световая отдача ламп накаливания 220 в по сравнению с лампами 127 в все меньше и меньше будет сказываться на экономике системы 380/220 в.

С целью выяснения того, повысится ли удельное потребление электрической энергии и удельная нагрузка при

переходе с напряжения 220/127 в на напряжение 380/220 в, автор провел обследование двух одинаковых по оживленности и довольно больших участков сети Ленинграда: один участок на Невском проспекте (между Московским вокзалом и площадью Александра Невского), имеющий напряжение 220/127 в, и другой на Московском проспекте (за заводом «Электросила»), имеющий напряжение 380/220 в. На обоих участках имеется бытовая газификация, преобладает нагрузка жилых квартир, хотя в жилых домах имеются магазины, мастерские, ателье и другие аналогичные потребители. Обеспеченность населения жилой площадью, водопроводом, канализацией, а также охват учетом электрической энергии по счетчикам одинаковы в обоих случаях. Результаты обследования приведены в таблице.

Участок сети	Напряжение, в	Оплачиваемая жилая площадь, м ²	Годовое потребление электрической энергии в 1956 г., кВт·ч	Удельное годовое потребление электрической энергии, кВт·ч/м ²
Невский проспект Московский проспект	220/127	20 881	309 000	14,7
	330/220	20 314	285 000	14,1

Как видно из таблицы, переход от системы 220/127 в к системе 380/220 в не повышает удельного годового потребления электрической энергии. Следовательно, основной довод сторонников напряжения 220/127 в лишен каких-либо оснований. Рекомендацию Руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока [Л. 2] и Правил устройства электротехнических установок [Л. 3] о применении для всех новых и реконструируемых городских сетей напряжения 380/220 в следует считать правильной.

Литература

1. Р. И. Клионская. О влиянии телевизоров на нагрузку городской электросети. *Электричество*, № 1, 1957.
2. Руководящие указания по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1940.
3. И. А. Сыромятников. О главе «Городские электрические сети» в Правилах устройства электротехнических установок. *Электричество*, № 2, 1955.

Доктор техн. наук, проф. В. В. БУРГСДОРФ
и кандидат техн. наук П. Ф. ГОГИЧАИШВИЛИ

Всесоюзный заочный политехнический институт

В статье А. А. Глазунова правильно и своевременно поставлен ряд принципиальных вопросов теории и практики городских электрических сетей.

Неуклонный рост жилищного строительства в нашей стране, а также быстрое развитие энергетики, создающее необходимые условия для значительного улучшения электроснабжения населения, требуют усиления работ в области рационального построения городских электрических сетей. Предлагаемые решения должны ориентироваться на современные принципы планировки и застройки больших городов, а не приспосабливаться к старым, установившимся принципам.

Одним из важных является вопрос о целесообразности областей применения сетей 380/220 в и 220/127 в. Каждое из этих напряжений имеет свои преимущества и недостатки и было бы неправильно считать, что возможно однозначное решение этого вопроса для всех случаев.

Полезно напомнить о дискуссии по этому вопросу, проходившей свыше 20 лет тому назад по инициативе В. М. Хрущева [Л. 1]. Тогда даже сторонники напряжения 380/220 в отмечали, что напряжение 220/127 в в ряде случаев экономически выгодно не только для больших, но и для средних и малых городов.

Как известно, основным преимуществом напряжения 380/220 в является то, что при нем затраты цветного металла меньше, чем при напряжении 220/127 в. Зато на-

пряжение 220/127 в позволяет применять более экономичные лампы накаливания 127 в.

А. А. Глазунов убедительно показал, что электрическое освещение составляет и будет составлять большую часть бытовой нагрузки. Повышению доли электрического освещения в бытовой нагрузке способствует газификация городов, неуклонно развивающаяся в настоящее время. В этих условиях применение более экономичных ламп имеет существенное значение.

В районах с многоэтажными зданиями, где протяженность сетей низкого напряжения не велика, целесообразно применять напряжение 220/127 в. В районах же малоэтажной застройки, где сети низкого напряжения имеют большую протяженность, предпочтение следует отдавать напряжению 380/220 в. Однако следует отметить, что по нашим данным при возрастании нагрузки сетей города с застройкой в I—4 этажа перевод сети на напряжение 380/220 в вместо 220/127 в далеко не во всех случаях обеспечивает существенный экономический эффект.

Применение сухих трансформаторов с заполнением кварцевым песком, размеры которых мало отличаются от масляных, будет способствовать сокращению объема строительных работ по устройству сетевых подстанций и облегчению сети низкого напряжения.

Кроме того, следует считаться с возможностью появления установок для кондиционирования воздуха и индивидуальных комнатных охладителей. Известно, что распространение таких установок в городах США привело в жаркое лето 1955 г. к большой перегрузке сетей и ряду серьезных аварий, потребовавших значительной перестройки сетей.

Установки по охлаждению воздуха несомненно получат распространение и в Советском Союзе, но особо большое влияние на электрическую нагрузку сетей они будут оказывать в городах южных районов нашей страны. Там напряжение 380/220 в будет иметь несомненные преимущества.

Следует признать совершенно ненормальным положение, при котором к городским сетям приходится приспосабливать существующую аппаратуру, не рассчитанную на такое применение. Это несомненно снижает возможность принятия оптимальных решений. Городские электрические сети должны оснащаться специализированной аппаратурой.

Необходимо всемерно поддерживать инициативу Академии коммунального хозяйства по созданию для городских сетей новых образцов аппаратуры: телеблоков управляемых сетей, конденсаторных устройств взамен аккумуляторных батарей, магнитных реакторов для замкнутых сетей, указателей короткого замыкания для распределительных сетей 6 и 10 кВ и др. Серийный выпуск такой аппаратуры способствовал бы внедрению автоматики и замкнутых сетей, имеющих преимущества в ряде случаев.

Целесообразно рассмотреть вопрос о применении в наших городских сетях воздушных кабелей, у которых фазные провода изолированы при помощи новых прочных изоляционных материалов и скручены вокруг нулевого провода, обладающего высокой прочностью и являющегося несущим. В последнее время такие кабели получили значительное распространение в США.

До настоящего времени многочисленные проектные организации вынуждены пользоваться устаревшими руководящими указаниями, изданными почти 20 лет тому назад. В ближайшее время необходимо издать для организаций, проектирующих городские сети, новые руководящие указания, отражающие опыт проектных и исследовательских работ последних лет. Тем более, что такой опыт уже неоднократно обобщался на ряде научно-технических конференций по городским электрическим сетям.

Литература

1. В. М. Хрущев. О некоторых спорных вопросах проектирования электрических сетей населенных мест. *Электричество*, № 1, 1933.
2. С. Н. Никогосов, Б. Л. Айзенберг и М. Н. Карасик. Еще о спорных вопросах проектирования низковольтных сетей. *Электричество*, № 8, 1934.

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

Московский энергетический институт

Ряд участников обсуждения статьи «Неотложные задачи теории городских электрических сетей» считает, что более экономичным является напряжение 380/220 в, а не 220/127 в. Все эти утверждения основаны на общих соображениях и не подтверждены технико-экономическими расчетами.

Основные возражения против этого раздела статьи сводятся к следующему:

1. При сопоставлении нагрузок сетей с напряжениями 220/127 и 380/220 в удельный вес освещения в суммарной бытовой нагрузке принят завышенным.

2. Мощность, потребляемая для освещения жилых зданий, не зависит от напряжения сети.

3. При напряжении 220/127 в расход цветного металла на сеть низкого напряжения значительно больше, чем при напряжении 380/220 в.

Рассмотрим каждое из этих возражений отдельно.

Во избежание повторений в обсуждаемой статье приведены технико-экономические показатели сетей 220/127 и 380/220 в (табл. 2) только для случая, когда нагрузка от освещения принята равной 50% суммарной бытовой нагрузки. Можно согласиться, что постепенно удельный вес нагрузки от освещения несколько снизится из-за роста применения бытовых электроприборов. Но в статье «Рациональное построение сети низкого напряжения больших городов» [Л. 1] показано, что, даже при нагрузке от освещения, равной 25% общей бытовой нагрузки, напряжение 220/127 в остается экономически более выгодным для районов городов с 5—14-этажной застройкой.

Доля нагрузки от освещения не может снизиться до 25% суммарной нагрузки, она будет выше этой величины. В этом легко убедиться, ознакомившись с нормами освещенности жилых зданий [Л. 2].

Строительные нормы и правила устанавливают наименьшую среднюю освещенность жилых комнат при лампах накаливания 25 лк, а при люминесцентных лампах — 75 лк; для кухонь соответственно 25 и 100 лк. При люминесцентных лампах освещенность нормируется в 3...4 раза большей. Это обусловлено не худшим освещением от этих ламп, а чисто экономическими соображениями. Для осуществления научно обоснованной, «повышенной», освещенности при лампах накаливания потребовались бы непосильные в настоящее время для населения капитальные затраты и эксплуатационные расходы, так как к. п. д. у этих ламп значительно ниже, чем у люминесцентных. Следовательно, по мере роста благосостояния населения нужно ожидать значительного роста нагрузки от освещения.

При новой планировке жилых кварталов, когда первые этажи жилых домов не будут отводиться под торговые помещения, удельный вес бытового освещения возрастет.

Сказанное позволяет считать, что довод о преувеличении удельного веса осветительной нагрузки нельзя считать убедительным.

При разнице между световыми потоками ламп накаливания 110 и 220 в в 20...30% нагрузки от освещения жилых домов при напряжениях сети 380/220 и 220/127 в не могут быть одинаковыми. Немного большей при напряжении сети 380/220 в нагрузка может получиться только в проекте. Жильцы же дома не будут смотреть, какой мощности должна быть лампа в том или ином месте по проекту, они, заметив снижение освещенности на 20...30%, увеличат мощность ламп в своих помещениях. Нельзя согласиться с утверждением Р. И. Клионской, что потребитель не станет заменять «привычные для него лампы накаливания на лампы большей мощности». Не следует забывать, что плата за электроэнергию для освещения составляет незначительный процент в бюджете трудящихся Советского Союза.

С приведенными Р. И. Клионской величинами удельного потребления электрической энергии в двух районах Ленинграда нельзя согласиться. Полученный ею результат, что при напряжении сети 380/220 в удельный расход меньше, чем при напряжении 220/127 в, не может быть объяснен, если считать оба исследованных района полностью одинаковыми. Полученный результат объясняется

несколько отличной структурой районов, разным составом населения, разной планировкой квартир и т. п. Эти различия и не позволили выявить увеличение нагрузки сети при напряжении 380/220 в.

Довод Л. М. Фингера, что целесообразность применения напряжения 380/220 в определяется примерно вдвое меньшим расходом цветного металла на сеть, нельзя считать убедительным. Выбор напряжения сети только по расходу цветного металла без учета всех остальных технико-экономических показателей приведет к ошибочным решениям.

К сожалению, недоучет изменений экономических показателей сетей в худшую сторону при стремлении во всех случаях сэкономить цветной металл привел к серьезному отставанию развития электрических сетей в Советском Союзе. Развитие электростанций идет значительно быстрее, чем сетей, в результате чего передача, а в особенности распределение электроэнергии, в том числе и в городах, связано с большими эксплуатационными затруднениями и расходами. В некоторых городах электрическая энергия доставляется потребителям при столь низком напряжении, что качество ее следует признать неудовлетворительным.

Е. Г. Захаржевская указывает, что для Ташкента, в котором преобладает одноэтажная застройка и имеются отдельные жилые массивы с 4—5-этажными домами, целесообразнее сеть с напряжением 380/220 в. В обсуждаемой статье совершенно отчетливо указано, что вывод об экономической целесообразности напряжения 220/127 в относится только к городам с застройкой кварталов 5—12-этажными зданиями.

Думается, что в городах с домами высотой 1—4 этажа экономически целесообразным напряжением окажется 380/220 в, а не 220/127 в. Высказанное положение является предположительным, поскольку автор не исследовал этого вопроса. Необходимость исследования экономически целесообразного напряжения сети для городов с разной этажностью очевидна. Автор считает, что вопрос о применении в городе сетей низкого напряжения двух напряжений — 220/127 и 380/220 в — заслуживает самого серьезного внимания.

Утверждение Е. Г. Захаржевской, что увеличение эксплуатационных расходов при напряжении 380/220 в не может иметь решающего значения, глубоко ошибочно; эксплуатационные расходы являются важнейшим показателем качества проектируемой и работающей сети.

Нужно подчеркнуть, что не следует смешивать экономическую целесообразность с необходимостью. В отдельных случаях те или иные обстоятельства могут заставить отступить от экономически целесообразного решения.

Отметим попутно, что указание Н. В. Волоцкого о снижении этажности зданий в крупных городах не полностью соответствует последним решениям. В Москве, например, наименьшая высота зданий установлена 5-этажной. Основная застройка Москвы будет вестись 5—8-этажными зданиями.

Все сказанное выше позволяет утверждать, что целесообразность применения в кварталах крупных городов с 5—12-этажными зданиями сети 380/220 в можно доказать, приняв старую ошибочную методику, при которой не учитывались дополнительные затраты на мощность электростанций, идущую на покрытие потерь мощности в сети, и стоимость дополнительно выработанной электроэнергии, потребной при напряжении сети 380/220 в.

Исключительно большим и серьезным является вопрос о расчетных нагрузках сети. Ленинградская кабельная сеть, как сообщает С. Н. Никогосов, приняла нормы МЭС — 10...12 вт/м² оплачиваемой площади; к 1965 г. ожидается нагрузка 20...24 вт/м², т. е. увеличение нагрузки вдвое. Фактическая нагрузка в Ленинграде в 1955 г. составляла 7,5 вт/м², а в средних городах — 5 вт/м² (Б. Л. Айзенберг). Московская кабельная сеть принимает расчетную нагрузку зданий жилого сектора, исходя из удельной нагрузки 20 вт/м² оплачиваемой площади. Фактическая нагрузка в некоторых районах новой застройки Москвы, по сообщению Б. М. Баранова, составляет 13...15 вт/м².

Нам представляется, что при установлении расчетных нагрузок сети следует иметь в виду исключительную трудность реконструкции городской сети для увеличения ее пропускной способности. Такая реконструкция часто

сводится к полной переделке сети, осуществляемой в течение многих лет. Наибольшие трудности получаются при реконструкции кабельных сетей.

Нельзя отождествлять реконструкции районных и городских электрических сетей. В районных сетях увеличение пропускной способности электропередачи легко осуществляется прокладкой параллельных линий, а иногда повышением напряжения сети. В городских воздушных сетях прокладка дополнительных параллельных линий трудно осуществима. Усиление городской кабельной сети связано с вскрытием покровов мостовых и тротуаров города; особенно затруднительны раскопки для усиления сети 6 и 10 кв, проходящей по улицам города.

При прокладке кабелей в блоках, наличии свободных отверстий в последних развитие сети осуществляется просто. Если свободных отверстий в блоках не предусмотрено, то усиление сети потребует несравненно больших расходов.

Весьма вероятно, что экономически целесообразный вариант сети, выполненный по перспективным нагрузкам на ближайшие 5 лет, с народнохозяйственной точки зрения окажется не рациональным, так как доказательство того, что проектирование сети по 5...10-летним перспективным нагрузкам отвечает интересам народного хозяйства, не существует. Автору представляется, что расчетные нагрузки для сетей, в особенности крупных городов, следует взять более высокими, чем принимаемые в настоящее время.

Бытовая и отчасти осветительная нагрузки, наблюдаемые в настоящее время, являются низкими. Объясняется это пока еще высокими ценами на бытовые приборы и аппараты (пылесосы, холодильники, стиральные машины, нагревательные приборы и т. д.), а также высоким тарифом на электроэнергию для бытовых целей. Не подлежит, однако, сомнению, что эти цены и тариф на электроэнергию будут снижены, а следовательно, бытовая нагрузка жилого сектора, в особенности крупных городов, возрастет. Будет возрастать и осветительная нагрузка, о чем говорилось выше.

Совершенно очевидно, что бытовую нагрузку жилых кварталов даже крупных городов не следует принимать равной нагрузке коммерческих и административных зданий США. По мнению автора, расчетную нагрузку очень крупных городов СССР с 5—10-этажной застройкой в первом приближении можно принять, равной 30...35 вт/м^2 оплачиваемой площади. Проектирование сети по такой нагрузке обеспечит длительную эксплуатацию ее без коренных переделок. Кроме проекта сети с нагрузками 30...35 вт/м^2 , должен быть разработан проект первой ее очереди с нагрузками порядка 15...20 вт/м^2 оплачиваемой площади. Проект сети для двух стадий ее развития обеспечит правильное построение сети, покажет пути ее развития и т. д. Наличие второй очереди сети позволит избежать многих случайных решений, переделка которых при последующем развитии сети, сооруженной по перспективным нагрузкам ближайших 5—10 лет, обходится очень дорого.

Э. С. Иохвидов высказывается против применения замкнутой сети низкого напряжения, мотивируя это в основном двумя соображениями: более высокой стоимостью замкнутой сети и невозможностью питать ее от разных питающих центров. Согласиться с Э. С. Иохвидовым нельзя.

Если рассматривать замкнутую сеть правильно, а не узко, как это делает Э. С. Иохвидов, то замкнутая сеть не может стоить дороже резервированной разомкнутой сети. Возьмем двухлучевую радиальную резервированную сеть, применяемую Мосэнерго, сторонником которой является Э. С. Иохвидов, и замкнем в конце оба луча сети низкого напряжения, а контакторы в цепях трансформаторов заменим автоматами обратной мощности. Очевидно, после такой переделки сеть становится замкнутой, но стоимость ее практически не изменяется. В то же время она получает все преимущества замкнутой сети. На показатели такой сети и разомкнутой резервированной очередности застройки квартала и т. п. будут оказывать одинаковое влияние.

При любых практических условиях потери мощности и энергии в разомкнутой сети будут больше, чем в замкнутой. Небольшие дополнительные расходы при соору-

жении замкнутой сети полностью окупятся разницей стоимостей установленной мощности на электростанциях, необходимой для покрытия этих потерь.

Э. С. Иохвидов придает большое значение возможности питать сеть среднего напряжения от разных источников, причем он считает, что напряжения на шинах источников значительно расходятся по величине или по фазе, что ведет к большим уравнительным токам в сети. Автор тоже считает обязательным питание линий среднего напряжения замкнутой сети от разных источников, но понимает, что таковыми могут быть разные секции шин одной и той же подстанции, станции или распределительного пункта. Такая схема полностью гарантирует высокую степень надежности электроснабжения потребителей. По такой схеме работают многие сети в США; просто отмахнуться от опыта этой страны, как это делает Э. С. Иохвидов, по мнению автора, неправильно.

Не следует понимать автора так, что он во всех случаях считает целесообразным применение замкнутой сети. В ряде случаев целесообразно сооружение радиальной и даже нерезервированной сети. Заслуживает серьезного внимания двухлучевая сеть с однострановыми подстанциями и замыканием ее в конце (переключения на стороне среднего напряжения, отказ от резервирования трансформаторов и др.). Местные условия определяют целесообразность применения той или иной схемы сети.

При глубоких вводах высокого напряжения в город сеть в пределах города может выполняться трехступенчатой — высокое, среднее и низкое напряжения. Необходимость глубокого ввода высокого напряжения выясняется при проектировании сети по предельным нагрузкам (30 ... 35 вт/м^2).

Замечания Э. С. Иохвидова о глубоких вводах высокого напряжения не серьезны. Например, он пишет: «...мощность районной подстанции глубокого ввода будет равна 70...80 Мва . При такой мощности промежуточная трансформация энергии, например, 110/35 кв, бессмысленна, так как выгоднее проложить 1—2 кабеля 110 кв...». С таким же основанием, применительно к средним городам, можно написать: «...мощность подстанции глубокого ввода составит около 20 Мва . При такой мощности подстанции питание ее кабельными линиями 110 кв бессмысленно, так как выгоднее проложить 2 кабеля 35 кв...». Но это не аргумент, а просто ничего не доказывающая фраза.

Непонятно, почему Э. С. Иохвидов отрицает целесообразность сооружения в ряде случаев глубоких вводов на напряжениях, отличных от напряжений линий, питающих город от районных электростанций. Москва получает основную массу электроэнергии от Куйбышевской ГЭС по линиям 400 кв, от Шекинской. Угличской, Шепбаковской и других станций по линиям 220 кв, в дальнейшем она будет получать электроэнергию от Сталинградской ГЭС при напряжении 400 или 500 кв, а глубокие вводы в Москве строятся на напряжение 110 кв. Можно считать, что это экономически оправдано.

Указание Э. С. Иохвидова, что подстанции и линии 35 кв в Ташкенте нельзя считать подстанциями глубокого ввода, необосновано. Л. И. Бобович сообщает, что в Ташкенте уже имеется семь таких подстанций и намечено строительство еще 6—7 подстанций. Отнесение их Э. С. Иохвидовым к фидерной сети является простой игрой в слова. Кабельная сеть 110 кв глубокого ввода Москвы с таким же успехом может быть названа фидерной сетью 110 кв. Подобные замечания не помогают пониманию сути вопроса, а только запутывают его.

Ряд участников дискуссии (Б. Л. Айзенберг, В. А. Козлов, Н. В. Волоцкой, Н. И. Медведский), по-видимому, поняли автора таким образом, что он полностью считает ошибочной разработанную до сих пор теорию городских электрических сетей. Такое понимание статьи неправильно. Автор преследовал цель показать необходимость дальнейшей разработки теории применительно к районам многоэтажной застройки. Существующая теория, исходные положения которой построены применительно к городам с малоэтажной застройкой, при строгом рассмотрении не применима к кварталам многоэтажной застройки.

Нельзя согласиться с Ю. А. Гланцем, который по существу предлагает все вопросы проектирования городских электрических сетей решать только сравнением вариантов.

Такой путь потребует большой бесполезной работы. Полученные теоретически обобщенные выводы позволяют значительно сократить работу, в особенности лицам, не имеющим достаточного опыта проектирования городских сетей. Ясно, что мощности трансформаторных подстанций, их расположение и т. п., полученные теоретическим путем, должны корректироваться при реальном проектировании.

И. С. Бессмертный и Ф. Ф. Воронцов обращают внимание на необходимость широкого использования средств телемеханики, телеизмерения, телесигнализации и автоматики в городских электрических сетях. Это положение является бесспорным. Однако нельзя согласиться с авторами, когда они предлагают применять эти средства к ежесуточным, неоднократным перестройкам схемы пи-

тания, переносу точек деления сети и т. п. Такие операции возможны в сетях небольших городов. В сложных развитых сетях неоднократные ежесуточные переключения могут привести к обратному результату — понижению надежности электроснабжения. Автоматические переключения и переключения при помощи телемеханических устройств должны выполняться только после очень тщательного анализа режимов работы сети.

Б. М. Баранов и другие ставят вопрос о необходимости создания и выпуска специальных трансформаторов и аппаратуры, в наибольшей степени отвечающей условиям работы в городских сетях. Это требование, к сожалению, остается «наибольшим вопросом» — аппаратостроительные заводы относятся к нему без должного внимания, что недопустимо.

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

(Электричество, № 2, 3, 6, 7, 1957)

Доц. Г. М. СЕХНИАШВИЛИ

Тбилисский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Ленина

Развитие электрической тяги характеризуется непрерывным увеличением мощности, приходящейся на 1 км эксплуатационной длины электрифицированных линий.

Выбор оптимальных параметров энергоснабжения магистральных железных дорог при электрической тяге по существу сводится к определению наиболее целесообразных технико-экономических решений, обеспечивающих увеличение указанной удельной мощности с наименьшими капиталовложениями и наилучшие условия последующей эксплуатации не только электротяговых сетей, но также и питающих их энергосистем.

Не следует забывать, что каждая энергетическая система представляет единую сложную электрическую цепь, все звенья которой находятся в определенной взаимосвязи. Поэтому необходимо комплексное рассмотрение режимов как первичного, так и электротягового энергоснабжения.

Указанная взаимосвязь режимов электротяговых сетей и энергетических систем обычно в должной степени не учитывается, в результате чего параметры оборудования преобразовательных агрегатов электротяговых сетей зачастую не отвечают оптимальным режимам эксплуатации.

При рассмотрении вопросов электрификации железнодорожных линий следует иметь в виду решение и общегосударственной задачи по электрификации страны.

От тяговых подстанций все больше осуществляется также электроснабжение прилегающих к электрифицированным железнодорожным линиям районов и городов.

В условиях непрерывного увеличения размеров движения и принимая во внимание, что дополнительно к существующим линиям до 1960 г. в СССР на постоянном токе будет электрифицировано не менее 5 000 км железнодорожных линий, очевидно, что усилия должны быть направлены как на решение всех вопросов, связанных с выбором оптимальных параметров новой системы электрической тяги на однофазном токе промышленной частоты, так и на усовершенствование и повышение эффективности системы постоянного тока.

Важным показателем, характеризующим параметры и режимы электрических линий электропередачи, является степень использования их предельной пропускной способности ξ , представляющая отношение мощности передаваемой потребителям электрической энергии в эксплуатационных условиях к предельной мощности линии, обуславливаемой напряжением и активным сопротивлением проводов (при полной компенсации индуктивного сопротивления).

При относительно небольших расстояниях между тяговыми подстанциями степень использования предельной пропускной способности ξ определяется фактором нагрева проводов контактной сети и бывает значительно меньше единицы. Чем ближе значение ξ к единице, тем относительно больше потери мощности в контактной сети. При $\xi = 1$ коэффициент полезного действия контактной сети составляет 50%, а при $\xi = 0,8$ повышается

до 72%. Работать на пределе исчерпания пропускной способности контактной сети нецелесообразно тем более, что при этом получаются и очень большие потери напряжения. Тем не менее при системе постоянного тока далеко не редки случаи, когда работа осуществляется на пределе исчерпания пропускной способности, например, когда вновь электрифицируемые участки вводятся в эксплуатацию без некоторых тяговых подстанций, при больших расстояниях между соседними тяговыми подстанциями, длинных консольных участках, а также при различных вынужденных режимах.

При относительно больших расстояниях между тяговыми подстанциями резко уменьшается пропускная способность контактной сети, увеличиваются потери мощности, электрической энергии и напряжения, а следовательно, ухудшаются режимы работы электротяговых сетей. Усиление сечения контактной сети более 300...400 мм², вызывая значительное увеличение расхода цветных металлов, дает относительно незначительный эффект с точки зрения улучшения режимов электротяговых нагрузок. Это объясняется тем, что суммарное сопротивление контактной сети r_0 , приходящееся на 1 км, включая и сопротивление рельсовой цепи, по мере увеличения сечения проводов воздушной подвески $q_{\text{пров}}$ (в эквиваленте меди) изменяется все в меньшей и меньшей степени (рис. 1).

Необходимость применения больших сечений воздушной подвески контактной сети обычно обуславливается факторами нагрева проводов. Наиболее радикальным мероприятием для увеличения удельной мощности электротяговых сетей, приходящейся на километр эксплуатационной длины, является уменьшение расстояния между тяговыми подстанциями.

На рис. 2 приведены зависимости удельной мощности, получаемой на токоприемниках электроподвижного со-

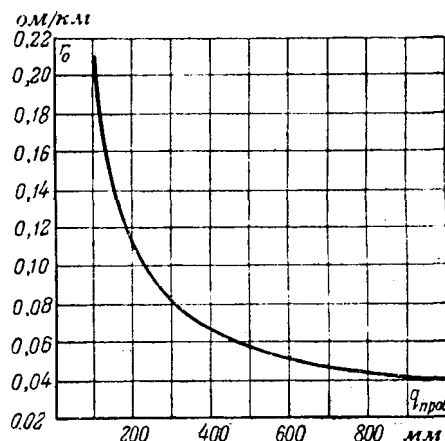


Рис. 1. Зависимость сопротивления контактной сети от сечения проводов.

става $P_{пол}$, а также соответствующей удельной мощности, отдаваемой в контактную сеть с шин тяговых подстанций $P_{отд}$, в функции от расстояния между тяговыми подстанциями, при сечениях воздушной контактной подвески 220, 320 и 560 мм² в эквиваленте меди. При расчете принималось, что при расстоянии между тяговыми подстанциями 32,6 км на перегонах одновременно находится четыре поезда, при расстоянии 16,3 км — два поезда, а при расстоянии 8,15 км — один поезд, что вполне соответствует реальным условиям эксплуатации. По мере уменьшения расстояния между тяговыми подстанциями с 32,6 до 8,15 км величина ξ была уменьшена с 0,8 до 0,5 — по условию допустимого нагревания проводов контактной сети. Уменьшение ξ обуславливает лучшие режимы электрических сетей.

По мере роста размеров движения величина $P_{отд}$ также непрерывно увеличивается.

Удельная мощность, отдаваемая с шин тяговых подстанций, больше $P_{пол}$ на величину потерь мощности в контактной сети (не следует при этом смешивать рассматриваемую удельную мощность с удельной мощностью, потребной для электрической тяги от энергосистемы, которая значительно меньше).

При интенсивном однопутном движении и электровозах серии ВЛ22^м в периоды сгущения поездов $P_{отд}$ доходит до 300 кВт/км, а в случаях применения двойной и тройной тяги на участках с горным профилем в отдельных пролетах между тяговыми подстанциями за интенсивный 15—20-минутный интервал достигает 500 кВт/км и больше.

Очевидно, что при электровозах ВЛ23 и Н8, оборудованных тяговыми двигателями с часовой мощностью 525 кВт, а тем более с введением в эксплуатацию тяговых двигателей с часовой мощностью 650 кВт (а в дальнейшем и большей), удельные мощности, получаемые от тяговых подстанций, значительно увеличатся. Для этого потребуется существенное уменьшение расстояний между тяговыми подстанциями.

Необходимо иметь в виду, что рассматриваемые удельные мощности соответствуют интенсивным периодам движения, и они значительно больше средних удельных мощностей, которые определяются для электрифицированных участков, исходя из расхода электрической энергии.

При меньшем числе поездов, одновременно находящихся в фидерной зоне, но потребляющих большую мощность, при неравномерном расположении нагрузок и зна-

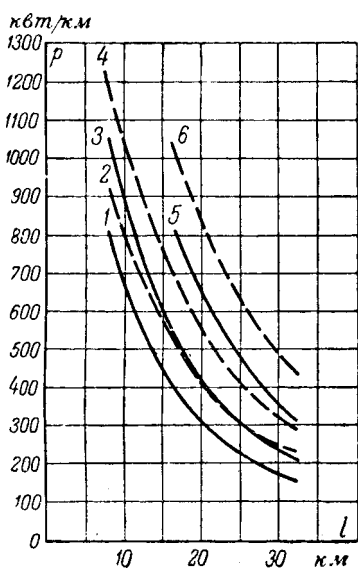


Рис. 2. Зависимости удельной мощности на токоприемниках электроподвижного состава и отдаваемой в контактную сеть от расстояния между подстанциями:

1, 3, 5 — $P_{пол} = f(l)$ } при $q = 220; 320; 560$ мм².
2, 4, 6 — $P_{отд} = f(l)$

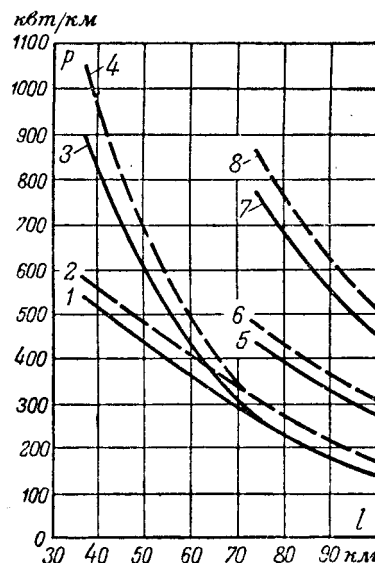


Рис. 3. Кривые $P_{пол}$ и $P_{отд}$ для сечений 123 и 220 мм² при напряжении 22 и 35 кВ;

1, 3 — $P_{пол} = f(l)$ } при $q = 123$ и 220 мм², $U = 22$ кВ, $\xi = 0,3 \dots 0,5$;
2, 4 — $P_{отд} = f(l)$ }
5, 7 — $P_{пол} = f(l)$ } при $q = 123$ и 220 мм², $U = 35$ кВ, $\xi = 0,35 \dots 0,4$.
6, 8 — $P_{отд} = f(l)$

чительной разнице в их величинах пропускная способность контактной сети снижается, обуславливая уменьшение и удельной мощности, получаемой от тяговых подстанций.

Рассматривая характерные расположения нагрузок в фидерной зоне, согласованные с действительной организацией движения поездов и с учетом всех местных особенностей, нетрудно получить необходимые уточненные данные относительно пропускной способности контактной сети, потерь мощности и напряжения, удельной мощности и др.

На величину пропускной способности и удельной мощности большое влияние оказывает уровень напряжения на шинах тяговых подстанций. Так, например, снижение напряжения с 3300 до 2800 в вследствие его колебания в энергосистеме и потерь напряжения в трансформаторах тяговых подстанций вызывает уменьшение пропускной способности контактной сети и соответственно $P_{отд}$ почти на 30%. Повышение же уровня напряжения, например до 4500 в, обуславливает увеличение пропускной способности и $P_{отд}$ почти в два раза, позволяя иметь значительно большие расстояния между тяговыми подстанциями.

Поэтому очевидно, что исключительно важным является, во-первых, применение на тяговых подстанциях трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой в целях его стабилизации, а, во-вторых, повышение уровня напряжения в контактной сети.

Эти мероприятия могут и должны быть осуществлены в возможно кратчайшие сроки, так как они будут способствовать значительному повышению уровня эксплуатации устройств энергоснабжения электрифицированных линий.

При расчетах электротяговых сетей обязательно необходимо в полной мере учитывать колебания напряжения, происходящие в энергосистемах, питающих тяговые нагрузки.

При системе электрической тяги на однофазном токе также одним из основных вопросов является обеспечение необходимой удельной мощности, отдаваемой с шин тяговых подстанций в контактную сеть.

На величину пропускной способности контактной сети исключительно большое влияние оказывает степень компенсации индуктивного сопротивления. При полной компенсации реактивной мощности, совпадающей по направлению с активной, можно добиться, чтобы в начале линии, т. е. у тяговых подстанций, отношение реактивной

ИСПЫТАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ НА КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

(Статья В. В. Каплана и В. М. Нашатыря,
Электричество, № 5, 1956)

Доктор А. Мыслицкий (Польская Народная Республика) в присланных нам замечаниях по статье выражает мнение, что в ряде случаев наиболее тяжелые условия для гашения дуги в высоковольтном предохранителе создаются при наличии аperiodической составляющей в кривой тока короткого замыкания и воспроизведение таких условий при испытаниях представляет несомненный интерес, тогда как в статье приводятся схемы, воспроизводящие лишь симметричную кривую тока короткого замыкания.

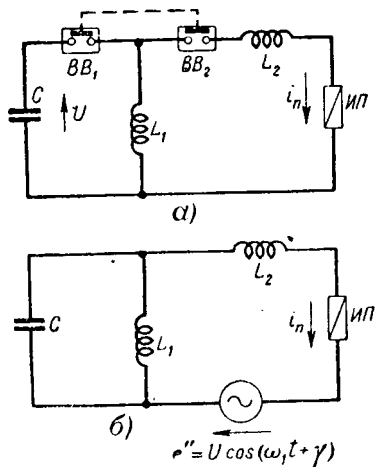


Рис. 1.

В более поздних работах авторов была применена схема (рис. 1,а), имеющая такую же конфигурацию, как и схема, указанная в статье на рис. 2,б, но несколько отличающаяся режимом работы. Эта схема позволяет про-

водить на колебательном контуре исследование отключающей способности токоограничивающих предохранителей не только при симметричной форме кривой тока короткого замыкания, но и при наличии аperiodической составляющей в кривой тока, т. е. при любой фазе напряжения в момент короткого замыкания.

В этом случае работа схемы производится в следующей последовательности. Включается вспомогательный выключатель BB_1 , при этом конденсаторная батарея C , заряженная до напряжения U , разряжается на индуктивность L_1 с промышленной частотой $\omega_1 = 1/\sqrt{CL_1}$. Через заранее выбранный отрезок времени t_0 замыкаются контакты выключателя BB_2 и к схеме подключается ветвь с индуктивностью L_2 и испытуемым предохранителем ИП. Можно показать, что при этом ток, проходящий в

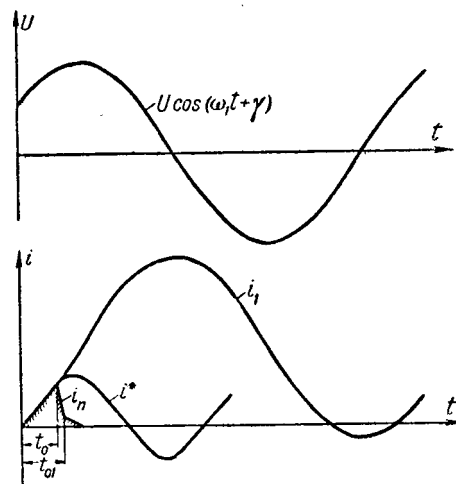


Рис. 2.

цепи предохранителя, содержит аperiodическую составляющую и определяется из соотношения

$$i_n(t) = \frac{U}{\omega_1(L_1 + L_2)} [\sin \omega_1 t_0 - \sqrt{1 + \frac{L_1}{L_2} \cos^2 \omega_1 t_0} \cos(\omega_2 + \lambda)]$$

мощности к активной — $\lambda = 0$. В этом случае резко увеличивается пропускная способность контактной сети и уменьшаются потери напряжения. Но для такой компенсации практически между тяговыми подстанциями должны быть предусмотрены компенсирующие установки либо применена продольная компенсация.

На рис. 3 приведены кривые $p_{пол} = f(I)$ и $p_{омд} = f(I)$ для сечений контактной сети 123 и 220 мм² и напряжений 22 и 35 кВ.

Следует отметить, что величина ξ в линиях переменного тока при значениях λ , значительно отклоняющихся от нуля, лимитируется допускаемой потерей напряжения, а при относительно коротких линиях и допускаемой плотностью тока.

Из приведенных кривых следует, что при сечении контактной подвески 123 мм² и напряжении 22 кВ, при расстоянии между тяговыми подстанциями 74 км, т. е. при параметрах, соответствующих участку Ожерелье—Виленьки, $p_{омд} = 300$ кВт/км. Такая удельная мощность с учетом питания и нетяговых потребителей и при интенсивном движении не может рассматриваться как приемлемая.

Если исходить из значений $p_{омд} = 550 \dots 600$ кВт/км, то в этом случае при $U_1 = 22$ кВ, $\lambda = 1$ и сечении контактной сети 123 мм² расстояния между тяговыми подстанциями получаются порядка 35...40 км. При напряжении же $U_1 = 35$ кВ, сечении контактной сети 220 мм² и $\lambda = 1$ при расстояниях между тяговыми подстанциями

75 км $p_{омд} = 850$ кВт/км; при этом ξ получается равным 0,35...0,4, что обуславливает относительно небольшие потери. Следовательно, напряжение 35 кВ является более целесообразным. Существенным преимуществом напряжения 35 кВ является также возможность осуществления питания контактной сети непосредственно от трехфазной четырехпроводной линии напряжением 60 кВ без применения трансформаторов, а кроме того, в этом случае можно значительно уменьшить асимметрию нагрузок.

При системе электрической тяги однофазного тока в электротяговых сетях следует предусматривать компенсирующие устройства, имеющие большое актуальное значение с точки зрения повышения уровня эксплуатации как самих электротяговых сетей, так и энергетических систем.

В пунктах же подключения электротяговых сетей к энергосистеме через трансформаторы необходимо предусматривать регулирование напряжения под нагрузкой для уменьшения влияния системных колебаний напряжения на пропускную способность контактной сети. Снижение, например, напряжения на шинах тяговых подстанций с 22 до 18 кВ вызывает уменьшение пропускной способности контактной сети в 1,5 раза.

С колебаниями напряжения в контактной сети, обуславливаемыми и режимами энергосистем, должны быть согласованы параметры силовых трансформаторов, устанавливаемых на электроподвижном составе.

Приведенные выше соображения автора были обсуждены и одобрены секцией электрического транспорта на конференции кафедр Тбилисского института инженеров железнодорожного транспорта им. Ленина в апреле 1957 г.



где

$$\operatorname{tg} \lambda = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_2}} \operatorname{ctg} \gamma, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}}}.$$

Так же как и в случае, рассмотренном в статье, частота тока i_n превышает промышленную частоту ($\omega_2 > \omega_1$). На рис. 1, б изображена эквивалентная схема работы предохранителя, причем считается, что короткое замыкание производится в момент времени $t = 0$.

Таким образом, схема обеспечивает эквивалентные условия в течение первой фазы испытания предохранителя — до момента расплавления плавкой вставки (рис. 2). Условия работы предохранителя в течение второй фазы испытаний могут быть найдены так же, как это пояснено в статье, — путем применения теоремы эквивалентного генератора. Из схемы рис. 1, б видно, что в течение второй фазы испытаний, когда при резком изменении тока i_n емкость C можно считать закороченной, в цепи предохранителя имеется э. д. с. промышленной частоты и индуктивность, что соответствует работе предохранителя в реальных условиях. В течение третьей фазы испытаний предохранителя также обеспечивается эквивалентность реальным условиям, поскольку при этом ток i_n достаточно мал и предохранитель как бы оказывается подключенным к источнику э. д. с. промышленной частоты.

Параметры схемы, изображенной на рис. 1, а, выбираются так же, как это указано в статье для схемы рис. 2, б.

**Кандидат техн. наук В. В. Каплан,
кандидат техн. наук В. М. Нашатырь**

РАБОТА ДРОССЕЛЯ НАСЫЩЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ И АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

(О статье А. Г. Здрока и Г. П. Смирнова,
Электричество, № 10, 1956)

Статья изложена так, что лишь в конце ее третьей части удается уловить формулировку конкретных задач, выдвигаемых авторами. Только из заключительных фраз этой части можно узнать, что в статье рассматривался вопрос об определении зависимости подмагничивающего тока дросселя от тока нагрузки генератора. При этом в качестве исходных данных принимались параметры цепи возбуждения генератора и его внешняя характеристика.

Для решения задачи авторами используется векторная диаграмма, построенная, по-видимому (в статье ничего об этом не сказано!), для первых гармоник тока и напряжения входной цепи выпрямителя; при этом делается ссылка на монографию В. Г. Комара, в которой дан метод определения параметров входной цепи выпрямителя для первой и высших гармоник тока и напряжения по известным сопротивлениям выходной цепи. Поскольку на выход выпрямительного моста включена цепь возбуждения генератора, данные которого полагаются известными, указанный путь не может вызвать принципиальных возражений. На авторах остается лишь ответственность за то, в какой мере в рассматриваемых случаях допустимо пренебрежение высшими гармониками тока и напряжения и почему во всех режимах дросселя рекомендуется исходить из синусоидальности тока на входе выпрямителя и не используются рассмотренные В. Г. Комаром условия синусоидальности входного напряжения, которые, кстати, имеют место при значительных насыщениях дросселя.

Совершенно неясно, какая задача рассматривалась авторами в первой части статьи; определялись ли по данным осциллограмм параметры входных или выходных цепей выпрямителя; почему «режим синусоидального тока» иллюстрировался далеко не синусоидальной кривой на осциллограмме рис. 1 (не проще ли найти значение первой гармоники входного напряжения на выпрямителе и ее фазовый сдвиг по отношению к первой гармонике тока непосредственным разложением в ряд этой кривой, записанной осциллографом); как быть при проектировании генератора и системы автоматического регулирования, когда объект для осциллографирования отсутствует; наконец, что нового предлагают авторы в первом разделе статьи по сравнению с методом В. Г. Комара?

В связи с изложенным оказывается спорной рациональность рекомендации в первом пункте общих выводов.

Рассматривая в четвертой части статьи «регулируемые возбуждения генераторов при переменной частоте», авторы справедливо отмечают, что при повышенном числе периодов «вихревые токи, размагничивая сердечник дросселя, приводят к значительному снижению магнитной индукции». Иными словами, приведенные авторами статьи — типичные вольт-амперные характеристики дросселя (рис. 5) меняют свою форму в зависимости от изменения частоты. Однако вместо того, чтобы рекомендовать расчеты по изменяющимся для разных частот вольт-амперным характеристикам, авторы выдвигают идею пользования «обычными магнитными характеристиками...» для неизменной частоты; при этом предлагается вносить необходимые коррективы в выражение для магнитной индукции дросселя.

Такая методика не может считаться правильной, так как, во-первых, значение индукции в дросселе твердо фиксируется формулами (1а) и (4) и поэтому не может подвергаться каким-либо поправкам, а во-вторых, используемая авторами величина $U'_{\partial L}$ является по существу искомой и, следовательно, не может помочь решению задачи. Вследствие этого пункт второй выводов статьи совершенно не обоснован.

Пункт третий общих выводов формулирует известное положение о том, что «в цепи с полупроводниковыми выпрямителями и активно-индуктивной нагрузкой форма кривой напряжения на дросселе в значительной степени отличается от синусоиды». Но непонятно, на каком основании авторы статьи, ссылаясь в ее тексте на труды В. Г. Комара и И. Л. Каганова, сочли возможным приписать это положение результатам своих исследований?

И, наконец, четвертый пункт выводов затрагивает весьма интересный вопрос о подмагничивании дросселя насыщения пульсирующим током. Однако из пятого раздела статьи, посвященного этому вопросу, остается неясным, какими теоретическими или экспериментальными исследованиями авторов подтверждаются предлагаемые ими выводы. Между прочим, выдвигая и в других разделах статьи различные рекомендации, авторы не приводят должного теоретического или экспериментального обоснования. Так, например, утверждение на стр. 45 о неизменности вольт-амперных характеристик дросселя для диапазона частот $45 \leq f \leq 150$ гц ничем конкретно не подтверждено; утверждение на той же стр. 45 о том, что «в настоящее время существует способ расчета только действующего значения тока на входе выпрямителя» неправильно, ибо известна методика расчета также полной кривой напряжения, ее отдельных гармоник, среднего значения, амплитуды и т. д. Эта методика, кстати, изложена также и в цитированной авторами литературе.

Из содержания статьи остается неясным, какое из упомянутых авторами значений коэффициента формы k_{ϕ} (1,11 или 1,33, или 1,43) и в каких случаях следует применять при расчетах. Неясно также, какого порядка ошибку может вызвать рекомендуемое авторами при выводе формулы (3) пренебрежение активными потерями в сердечнике дросселя.

Совершенно непонятно, наконец, каким образом намеревались авторы определить активное падение напряжения на дросселе $U_{\partial R}$ «по регулировочной характеристике генератора и известным параметрам цепи возбуждения» (стр. 46). По этому поводу следует заметить, что в статье вообще неясно, когда авторы считают размеры и характеристики дросселя заданными, а когда подлежащими определению.

Имеющий самостоятельное значение вопрос об оптимальном проектировании дросселя вклинен в четвертый раздел статьи; интересные соображения по данному вопросу не отражены в обобщающих выводах.

В целом статья, хотя и затрагивает группу весьма современных задач, не содержит их решения, внося лишь ненужную путаницу и неясность.

**Доктор техн. наук, проф. Г. И. Штурман,
кандидат техн. наук Э. А. Якубайнис,
кандидат техн. наук А. Ф. Кругерис,
кандидат техн. наук В. В. Ансит**

Лаборатория электромеханики Института энергии и электротехники Академии наук Латвийской ССР

* * *

Авторы статьи опубликовали часть имеющихся у них материалов по исследованию и расчету главным образом дросселей насыщения в цепях возбуждения генераторов. Это было отмечено в начале статьи.

В третьем разделе, как видно из его названия, рассматривалась одна из задач — регулирование напряжения генераторов дросселем насыщения. В этом разделе выведены основные расчетные соотношения и «...рассматривался вопрос об определении зависимости подмагничивающего тока дросселя от тока нагрузки генератора». Для этого в статье рекомендовалось пользоваться не внешней характеристикой генератора, как утверждают авторы замечаний, а регулировочной (стр. 46).

Для построения векторной диаграммы использовались не первые гармоники тока и напряжений (поэтому это и не оговаривалось в статье), а действующие значения несинусоидальных токов и напряжений. Такое допущение обычно применяется при различных расчетах¹. Ссылка же на монографии В. Г. Комара и И. Л. Каганова дана в конце третьего раздела не для обоснования построения векторной диаграммы, а для указания источников, дающих способы вычисления тока и напряжений на входе выпрямителя, так как эти вопросы авторами статьи не рассматриваются.

Задача, которую ставили авторы статьи в первой части, является частью общей задачи — исследование работы дросселя насыщения с полупроводниковым выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой. Здесь рассматривается вопрос об определении индуктивного и активного сопротивлений (отношения $\frac{x_k}{r_k}$) катушки со

сталью, пригодных для использования при расчете регулируемой цепи известными методами [Л. 1, 2].

Известны способы определения индуктивности катушки со сталью на постоянном и переменном токах². Но ни один из этих способов не дает возможности определить величину индуктивности при питании катушки со сталью выпрямленным током. Авторы статьи считают, что наиболее пригодными для расчетов являются параметры нагрузки, определенные при двухполупериодном выпрямленном токе. Параметры нагрузки, определенные таким способом, ближе всего подходят к параметрам, наблюдаемым в реальной схеме. В этом случае при отсутствии готового дросселя параметры могут быть практически определены только для двух крайних режимов: а) для режима синусоидального напряжения на входе выпрямителя, б) для режима синусоидального тока на входе выпрямителя.

В статье изложен способ определения параметров нагрузки только при синусоидальном токе, как давший наиболее интересные результаты: одни и те же углы θ_1 и θ_2 с одной стороны, определяют расчетные коэффициенты, полученные В. Г. Комаром для определения тока и напряжения на входе выпрямителя, с другой стороны, служат для определения параметров катушки со сталью, питаемой выпрямленным током.

Экспериментальные исследования показали, что если сердечник катушки выполнен нешихтованным, то параметр $\frac{x_k}{r_k}$, вычисленный на постоянном токе (т. е. по осциллограмме спада тока) и изложенным в статье способом, будет отличаться в десятки раз при частоте подводимого к выпрямителю напряжения 50...100 гц.

Приведенные на рис. 1 осциллограммы являются лишь иллюстрацией для показа углов коммутации θ и θ_2 . Поэтому здесь может быть показана и приближительная синусоида тока, что и оговорено в подписанной подписи.

Предложение авторов замечаний определить значения первых гармоник напряжения и тока на входе выпрямителя, а также угол сдвига между ними, во-первых, не исключает необходимость иметь объект осциллографирования,

во-вторых, весьма трудоемко. Этот способ, может быть, следует применять лишь для режима синусоидального напряжения на входе выпрямителя, так как в этом режиме работы цепи тока на входе и выходе выпрямителя по абсолютной величине равны друг другу и поэтому нельзя воспользоваться углами θ_1 и θ_2 .

Следует отметить, что В. Г. Комар в своей монографии не рассматривает способы определения параметров нагрузки, а считает их заданными.

Если дроссель работает в условиях переменной частоты, то будет изменяться и магнитная индукция. Но изменение ее неодинаково при различных частотах и различных величинах B_m : изменение магнитной индукции зависит от степени насыщения и величины вихревых токов. Эксперимент, проведенный авторами статьи, показал, что магнитная индукция в сердечнике, например, выполненном из трансформаторной стали Э42 толщиной 0,5 мм, при частоте 150 гц снижается, в основном, лишь на 5...8% для различных токов подмагничивания относительно ее величины при частоте 45 гц. Эксперименты авторов подтверждаются также опытами Г. С. Векслера (Электричество, № 4, 1953). Поэтому авторы статьи считают возможным полагать магнитную индукцию постоянной в пределах изменения частоты $45 \leq f \leq 150...200$ гц.

Такое допущение, не внося больших погрешностей, значительно упрощает расчет, о чем и говорится во втором выводе статьи. Приняв величину магнитной индукции постоянной, оказывается возможным считать (формула 1а) отношение индуктивной составляющей напряжения на зажимах рабочих обмоток дросселя к частоте не изменяющимся с изменением частоты. Это дает возможность вместо большого количества семейств вольт-амперных характеристик дросселя, снятых или вычисленных по формуле (1а) для разных частот, пользоваться одним семейством кривых $\frac{U_{\partial L}}{f} = \varphi_1(I; I_m)$. Об этом также упоминается во втором пункте выводов.

Из сказанного совершенно очевидно, что «... утверждение на стр. 45 о неизменности вольт-амперных характеристик дросселя для диапазона частот $45 \leq f \leq 150$ гц», содержащееся, по словам авторов письма, в статье, в действительности не существует, речь идет о неизменности совсем других характеристик.

При расчетах дросселя для частот выше 150...200 гц ошибки, вносимые принятым допущением о постоянстве B_m , становятся больше (см. опыты Г. С. Векслера, М. А. Розенблата в указанных выше работах), и пользоваться допущением $\frac{U_{\partial L}}{f} = \text{const}$ уже нельзя.

Для того чтобы при переходе к частотам больше 150...200 гц не изменять методику расчета, авторы статьи предлагают не строить новых семейств кривых $U_{\partial L} = \varphi(I; I_m)$ при больших частотах, а вносить поправку в траекторию дросселя, умножая ее точки, соответствующие большим частотам, на поправочный коэффициент, определение которого не требует построения новых семейств кривых $U_{\partial L} = \varphi(I; I_m)$ при больших частотах.

В графоаналитических методах при пересчете магнитных характеристик в вольт-амперные обычно пользуются формулами (1а) и (1б) (см., например, монографию М. А. Розенблата). Авторы статьи считают, что при работе дросселя в цепи с выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой для пересчета магнитных характеристик в вольт-амперные или наоборот, необходимо иметь еще семейство кривых $k_H = \psi(H; H_m)$, снятых для той же стали, что и магнитные характеристики.

Третий пункт выводов, сделанный на основании второго раздела статьи, подчеркивает ограниченность допущения синусоидальности напряжения на дросселе насыщения, работающего в цепи с выпрямителем и активно-индуктивной нагрузкой.

В упоминании авторов замечаний о способах расчета тока на входе выпрямителя имеется неясность: имеется ли в виду определение тока на входе выпрямителя или определение напряжения?

¹ П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, стр. 246, 1951.

² М. А. Розенблат. Магнитные усилители. «Советское радио», стр. 275—294, 1956.

³ В. К. Попов. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1951.

По страницам технических журналов

ПО ПОВОДУ СТАТЬИ ДЖОНА ХАРДТА

Член-корреспондент Академии наук СССР В. И. Вейц

В ноябрьском номере журнала «Electrical Engineering» за 1956 г. опубликована статья Джона Хардта¹, в которой автор ставит задачей «научно обосновать» невозможность выполнения шестого пятилетнего плана развития промышленности СССР по следующим причинам: а) недостаток мощностей на электростанциях из-за невыполнения пятилетнего плана ввода этих мощностей; б) невозможность обеспечить необходимое количество электроэнергии для нужд комплексной механизации промышленности, даже при выполнении пятилетнего плана производства электроэнергии, вследствие роста потребления ее на технологические нужды и особенно на нужды производства атомного вооружения.

Свои положения и выводы автор пытается аргументировать статистическими материалами и ссылками на советскую печать, создавая видимость научной объективности анализа.

Появление в зарубежной печати статей, объективно освещающих опыт развития советской энергетики, ее современное состояние и перспективы, успехи и недостатки следует приветствовать, если даже их авторы по ряду вопросов заблуждаются и делают неправильные выводы². Нельзя, однако, приветствовать появление на страницах такого авторитетного журнала, каким является «Electrical Engineering», статьи Хардта, написанной глубоко тенденциозно, с единственной целью во что бы то ни стало охаять советскую энергетику, созданную усилиями наших народов, не брезгуя при этом искажением нарочито подобранных фактов.

Через всю статью красной нитью проходит положение о низком уровне развития энергетических мощностей в Советском Союзе. Для подтверждения этого автор приводит таблицу, характеризующую недостаточность роста установленной мощности электрических станций в нашей стране. Поэтому начнем с небольшой справки о фактической динамике развития электроэнергетической базы Советского Союза.

За годы предвоенных пятилеток (1929—1940 гг.) мощность электростанций Советского Союза увеличилась в пять раз. За 1950—1956 гг. она возросла в 2,2 раза, а по сравнению с 1940 г. в 3,9 раза. И это, несмотря на огромный ущерб, причиненный энергетическому хозяйству нашей страны в годы Великой Отечественной войны. Во временно оккупированных районах врагом было уничтожено более половины установленной электрической мощности, которую страна имела в 1940 г. Следовательно, по

сравнению с наиболее низким уровнем в период войны, мощность электростанций в 1956 г. возросла примерно в 8 раз. Заметим, что за годы войны в США производство электроэнергии не только не сократилось, но возросло примерно в 1½ раза.

К концу 1956 г. суммарная мощность электрических станций СССР составила 42,7 Гвт, а производство электроэнергии³ 192 млрд. кВт·ч. Это в 39 раз по мощности и примерно в 100 раз по электроэнергии больше, чем в 1913 г. Только за один 1956 г.—первый год шестой пятилетки—введено в строй свыше 5 Гвт.

Среднегодовой прирост производства электроэнергии в течение пятилетия (1951—1955 гг.) составил: в Советском Союзе—17,4%; ФРГ—14,4%; США—12%; Италии—11%; Франции—9,4%; Англии—9,2%; Канаде—8,7%; Японии—8,3%*.

С одного из последних мест по производству электроэнергии, которое Россия занимала среди стран мира в 1913 г., с 11-го места к 1929 г. Советский Союз передвинулся на 3-е место в мире в предвоенные годы и на 2-е место в послевоенные годы. Расстояние, отделяющее Советский Союз от первой по электровооруженности страны мира—США, из пятилетия в пятилетие сокращается. Если в 1929 г. в США производилось электроэнергии в 19,4 раза, а на душу населения в 25 раз больше, чем в СССР, то в 1956 г. эти показатели уменьшились, соответственно, до 3,6 и 4,4 раза. Высокие темпы роста производства электроэнергии в СССР сохраняются и в шестом пятилетии. По плану среднегодовой прирост производства электроэнергии составит около 17%.

Такова правда о темпах и уровне развития энергетики Советского Союза. Таких высоких темпов не знают передовые в технико-экономическом отношении капиталистические страны, включая США.

В своей статье Хардт приводит таблицу, из которой следует, что пятилетние планы ввода мощностей на электрических станциях СССР не выполнялись. Основываясь на этих данных, он утверждает, что не будет выполнен и план шестой пятилетки по вводу мощностей на электростанциях, а следовательно, и по производству промышленной продукции.

По-видимому, Хардт, если и имеет, то весьма примитивное представление об основах планирования народного хозяйства в Советском Союзе.

Социалистическое плановое хозяйство обеспечивает возможность быстрого и планомерного развития производительных сил страны; оно открывает неограниченный простор для творческой инициативы всего народа. В. И. Ленин отмечал, что главное в научном планирова-

¹ John P. Hardt. Soviet Capacity will not provide for Industrial Growth by 1960. «Electrical Engineering», т. 75, стр. 978, № 11, 1956.

² В качестве примера можно сослаться на статью редакторов журнала «Power Engineering» Andrew W. Kramer и Richard H. Morris — «Direct from Moscow. Power Engineering editors report Russian Power Progress», опубликованную в октябрьском номере этого журнала за 1956 г. (стр. 78—81).

Извлечения из этой статьи, касающиеся энергетики, публикуются в настоящем номере журнала «Электричество» (стр. 80—81). *Ред.*

* Промышленность СССР, статистический сборник, Госстатиздат, стр. 422, 1957.

³ L'Énergie Électrique, № 12, 1956; Electrical Review, 25 января 1957; Canadian Statistical Bulletin, 1950—1956 г.; Statistical Yearbook, U. N., 1950—1956 г.; Japan Power & Fuel Yearbook, 1954.

Величина потерь в стали зависит от многих факторов и вряд ли эти данные можно привести в статье небольшого объема.

Потери в ряде сортов стали приведены в монографии Л. А. Бессонова³. Следует заметить, что во всех графоаналитических методах расчета цепей с магнитными усилителями допускается пренебрежение активными потерями в сердечниках. При расчете магнитных усилителей величиной активного сопротивления дросселя часто задаются⁴.

Задавшись же этим сопротивлением и определив ток на входе выпрямителя, нетрудно определить и $U_{д\pi}$.

³ Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.

⁴ И. А. Казаринов. Селеновые выпрямители для предприятий связи. Связьиздат, 1952.

При работе над статьей авторы предполагали опубликовать лишь новые положения, которые будут интересовать специалистов, занимающихся исследованием и расчетом магнитных усилителей с выпрямителем и активноиндуктивной нагрузкой. Поэтому, чтобы уложиться в предельный объем статьи, были исключены пояснения очевидных положений и приводились лишь ссылки на эксперименты без их описания. Авторы считают своим долгом поблагодарить Г. И. Штурмана, Э. А. Якубайтиса, А. Ф. Крогериса и В. В. Апсита за внимательное рассмотрение статьи.

Кандидат техн. наук А. Г. Здрок
и кандидат техн. наук
доц. Г. П. Смирнов



нии социалистического хозяйства — это связь планов с жизнью, усовершенствование планов в ходе их выполнения на основе опыта; составление плана — это лишь начало планирования. В декабре 1956 г. Пленум ЦК КПСС обсудил и принял постановление⁵ о завершении работ по составлению шестого пятилетнего плана и о направлении уточнений контрольных цифр на 1956—1960 гг. В этом постановлении признано необходимым произвести уточнения отдельных примерных заданий, предусмотренных в Директивах XX съезда КПСС по пятилетнему плану, и указаны направления этих уточнений. В частности, признано необходимым изыскать возможности выделения дополнительных средств на жилищное строительство, обеспечить наиболее рациональное и эффективное использование материальных ресурсов и финансовых средств, в связи с чем уменьшить объем капитальных вложений, уточнить списки строительных объектов в сторону их сокращения, в первую очередь за счет вновь начинаемых строек, и не допускать распыления средств по многим объектам. Эти уточнения, по-видимому, коснутся в какой-то части и энергостроительства.

Не менее примитивны представления Хардта и о действительных связях между планом ввода новых мощностей на электростанциях и планом роста промышленной продукции. Если следовать «концепции» Хардта, то при данных, приведенных им, о значительном невыполнении плана ввода мощностей в довоенные и послевоенные пятилетки должно было бы иметь место невыполнение планов роста промышленной продукции. Обратимся к фактам.

Пятый пятилетний план промышленной продукции (1951—1955 гг.) не только выполнен, но и перевыполнен. Объем промышленного производства за пятилетие увеличился⁶ на 85% при плане роста на 70%, т. е. выполнение плана составило 108,8%. План производства промышленной продукции в четвертом пятилетии (1946—1950 гг.)⁷ выполнен на 117%, а во втором (1933—1937 гг.)⁸ на 103%. Как известно, план первой пятилетки выполнен в 4 года 3 месяца⁹.

Таким образом, факты опровергают указанную выше «концепцию» Хардта.

Попутно отметим, что приведенные в статье Хардта данные о выполнении пятилетних планов ввода новых мощностей на электростанциях занижены. Например, по Хардту в пятом пятилетии введено 15,8 Гвт при плане 19,2 Гвт, в действительности же в этом пятилетии введено 17,82 Гвт при плане 19,65 Гвт, т. е. план выполнен на 91%, а не на 82%. По Хардту первый пятилетний план ввода мощностей выполнен на 70...78%, а в действительности на 97—99%¹⁰. Лишь цифры по четвертой пятилетке, приведенные Хардтом, соответствуют действительным.

Обращает на себя внимание то, что Хардт для иллюстрации невыполнения планов ввода мощностей использует данные за третью пятилетку, называя этой пятилеткой период с 1938 по 1945 г. Он приводит цифру выполнения плана 37% с примечанием о потере мощности в результате войны 5 млн. кВт. Советский народ потерял в период войны не только 5...6 млн. кВт электрической мощности; он отдал миллионы жизней своих лучших людей и спас не только свою страну, но и весь мир от гитлеровской коричневой чумы. А Хардт пишет о проценте выполнения плана в этот период, чтобы иллюстрировать свое положение о том, что невыполнение планов является характерной особенностью советской энергетики.

Хардт признает, что план выработки электроэнергии в 1960 г. может быть выполнен даже при невыполнении плана ввода новых мощностей. Но и на этот случай у него имеется готовое «обоснование» невозможности выполнения пятилетнего плана промышленного производства по «вине» энергетики. Он утверждает, что нельзя будет выделить достаточного количества мощности и электро-

энергии для нужд механизации промышленного производства из-за резкого увеличения расхода электроэнергии на технологические нужды (электротехнические и электролитические процессы) и особенно на нужды производства атомного вооружения.

По данным Хардта¹¹ в 1955 г. расход электроэнергии на технологические нужды промышленности СССР составил 37,4 млрд. кВт·ч и в 1960 г. должен возрасти более, чем до 70 млрд. кВт·ч, если удельный вес электротехнологии в электробалансе останется неизменным, на уровне 1955 г. (по данным Хардта—22%). Этот рост, по мнению Хардта, может иметь место только за счет снижения удельного веса энергии, расходуемой на нужды механизации.

По утверждению Хардта, Советскому Союзу предстоит в текущей пятилетке догнать США по расходу электроэнергии на нужды атомного вооружения. Хардт приводит данные Комиссии по атомной энергии США (АЕС), согласно которым в 1955 г. на эти нужды было израсходовано 62,3 млрд. кВт·ч (9,5% общей выработки электроэнергии в стране). По оценке Комиссии Пейли минимальный расход электроэнергии на эти нужды в 1960 г. должен составить 76 млрд. кВт·ч. Рост потребления электроэнергии в Советском Союзе на производство атомного вооружения, по мнению Хардта, будет также происходить за счет сокращения расхода электроэнергии на нужды механизации промышленности. Однако и эта «концепция» Хардта ошибочна.

Как известно, с электротехнологией связаны наиболее прогрессивные линии развития промышленной техники. Освоение новых методов электротехнологии в советской промышленности явилось основой создания автоматизированных поточных линий, цехов и заводов. Неправильно противопоставлять расход электроэнергии на нужды механизации расходу на нужды электротехнологии. Нельзя также отождествлять расход электроэнергии на механизацию только с расходом на двигательную силу, как это делает Хардт. Закономерной является тенденция замещения в отдельных производствах процессов, обслуживаемых двигательной силой, электротехнологическими процессами, например, электроискровой обработкой металлов.

Что касается утверждения Хардта о том, что Советскому Союзу придется соревноваться с Соединенными Штатами Америки в области расхода электроэнергии на атомное вооружение, то следует напомнить неоднократные заявления государственных деятелей нашей страны о том, что Советский Союз хочет соревноваться с США в области мирного использования атомной энергии, а не в области производства атомного вооружения. Мы надеемся, что эти заявления, единодушно поддерживаемые советским народом и всем прогрессивным человечеством, найдут в конце концов положительный отклик среди государственных деятелей США.

Говоря о невозможности удовлетворить необходимым количеством электроэнергии нужды механизации промышленности, Хардт утверждает, что состояние электроснабжения непромышленных потребителей в Советском Союзе и, в частности городов, неудовлетворительно. Для подтверждения этого он ссылается на статью, опубликованную в газете «Бакинский рабочий». В этой газете 26 февраля 1954 г. действительно была опубликована статья под названием «Улучшить электроснабжение населения Баку». Но Хардт глубоко искажил ее направленность.

В статье отмечались успехи, достигнутые в области электрификации Азербайджана. В частности, в ней говорилось, что начали работать первые агрегаты крупнейшей на Кавказе Мингечаурской ГЭС, что «количество электроэнергии, вырабатываемой электрическими станциями республики, обеспечивает удовлетворение растущих потребностей народного хозяйства и бытовых нужд населения. . .», что «В 1953 г. электростанции системы Азэнерго не только успешно выполнили план производства электроэнергии, но и выработали сверхплана много десятков млн. кВт·ч», что расход электроэнергии на нужды населения Баку увеличился в два раза. Вместе с тем в статье

¹¹ Мы не знаем источников, из которых Хардт взял эти данные. По опубликованным Центральным статистическим управлением СССР данным (Вестник статистики, № 5. 1956 г., стр. 65), в 1955 г. расход электроэнергии на технологические нужды составил 30 млрд. кВт·ч, или 17,6% электробаланса СССР в целом.

⁴ «Правда», 25 декабря 1956 г.
⁵ Сообщение Госплана и ЦСУ СССР об итогах выполнения пятого пятилетнего плана развития СССР, Госполитиздат, стр. 4, 1956.
⁶ Сообщение Госплана СССР и ЦСУ СССР об итогах выполнения четвертого пятилетнего плана СССР, Госполитиздат, стр. 3, 1951.
⁷ Итоги выполнения второго пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР, изд. Госплана СССР, Москва, стр. 19, 1939.

⁸ Итоги выполнения первого пятилетнего плана развития народного хозяйства, изд. Госплана СССР, Москва, стр. 12, 1933.
⁹ Первая цифра относится к оптимальному варианту пятилетнего плана, а вторая — к отработанному.

критиковалась деятельность Бакинского Горисполкома и других организаций в области развития городской электросети и приводились факты неудовлетворительного состояния электроснабжения отдельных квартир и улиц (низкое качество электроэнергии, частые перебои), причиной которых был не дефицит электроэнергии, а низкая пропускная способность городских распределительных сетей в некоторых районах города.

Заметим, что по отчетно-статистическим данным за период с 1929 по 1955 г. производство электроэнергии на душу населения в Азербайджанской ССР за 1929—1955 гг. возросло со 180 до 1390 *квт·ч*, т. е. в 7,7 раза.

Большое место в своей статье Хардт отводит строительству и эксплуатации гидроэлектростанций, утверждая, что эта область энергетики СССР находится на низком качественном уровне. Основную причину невыполнения планов ввода мощностей Хардт видит в том, что строительства гидроэлектростанций не укладываются в назначенные сроки. В качестве примера он приводит строительство Куйбышевской ГЭС. «В августе 1955 г., — пишет Хардт, — в «Правде» было объявлено, что станция начнет давать энергию 20 декабря 1955 г. В феврале 1956 г. в советской печати сообщалось, что первая очередь ГЭС, представляющая небольшую часть общей мощности, начала действовать».

В нашей общей и научно-технической печати указывалось на возможность сокращения сроков строительства гидроэлектростанций. Наши строители внимательно изучают передовые образцы сооружения гидроэлектростанций в зарубежных странах, в том числе в США, стараясь позаимствовать все лучшее в мировом опыте гидроэнергостроительства. Но советский народ вправе гордиться успехами своих гидроэнергостроителей, построивших ряд уникальных гидроэлектростанций. К их числу относятся: Днепровская, введенная в эксплуатацию в мае 1932 г., а затем восстановленная из руин на новой более совершенной основе; Свирская, строительство которой проходило в исключительно трудных геологических условиях; Щербаковская (Рыбинская); Мингечаурская и др.

Что касается Куйбышевской ГЭС, то можно привести следующие факты¹²: первый железнодорожный состав с грузами прибыл на стройку 30 ноября 1950 г.; первый бетон в блок дна нижних судоходных шлюзов уложен в декабре 1952 г.; первый агрегат Куйбышевской ГЭС дал промышленный ток 29 декабря 1955 г.; в 1956 г. вступили в эксплуатацию 11 агрегатов гидроэлектростанции общей мощностью 1155 *Мвт*; в 1957 г. будут введены остальные агрегаты, и гидроэлектростанция достигнет своей проектной мощности в 2,1 *Гвт*.

Главный инженер строительства Куйбышевской ГЭС Н. В. Разин с полным основанием писал¹³: «Можно без преувеличения сказать, что темпы 1955 г. и масштабы монтажных работ в 1956 г. никем не превзойдены в мировой практике гидротехнического строительства».

Как известно, после освоения гидроэнергетических ресурсов Днепра, Волги и Камы центр тяжести советского гидроэнергостроительства переносится на сибирские реки — Обь, Ангара и Енисей. Мощность начатой строительством Братской ГЭС будет в 1½...2 раза больше мощности Куйбышевской ГЭС. Наши гидроэнергостроители не пугают те трудности освоения сибирских рек, о которых пишет Хардт с целью доказать, что строительство сибирских гидроэлектростанций будет еще более затяжным. Мы уверены, что эти трудности будут преодолены и советские гидроэнергостроители впишут новую славленную страницу в историю прогресса своей родины. Об этом свидетельствует опыт успешно заканчивающегося строительства Иркутской ГЭС.

Хардт пишет далее о примитивных методах расчетов водообеспеченности при эксплуатации ГЭС, якобы применяемых в Советском Союзе. При этом Хардт ссылается на журнал «Гидротехническое строительство», не указывая ни номера журнала, ни названия статьи. По-видимому, имеется в виду статья Н. М. Чупракова «За повышение уровня эксплуатации гидроэлектростанций», опубли-

кованная в № 1 журнала «Гидротехническое строительство» за 1955 г.

В своей статье Н. М. Чупраков дает обзор опыта эксплуатации советских гидроэлектростанций, работающих в системах различной структуры, отмечает особенности эксплуатации и ряд достижений в этой области (автоматизация и телемеханизация, каскадирование и т. д.). Наряду с этим, он указывает на отдельные недостатки, которые были предметом обсуждения на четвертом научно-техническом совещании по эксплуатации гидроэлектростанций в октябре 1954 г. Чтобы видеть, насколько Хардт искажил отмеченные Н. М. Чупраковым недостатки, целесообразно сопоставить соответствующие выдержки из статей Чупракова и Хардта.

В статье Н. М. Чупракова говорится: «При отсутствии долгосрочных гидрологических прогнозов планирующие организации вынуждены при разработке годовых и квартальных планов выработки электроэнергии ГЭС принимать водность рек равной 75% обеспеченности. И если этот процент обеспеченной водности является достоверным как средний для множества рек, то для отдельных рек и в разные годы он может колебаться в пределах 45...98%. Таким образом, в планирование выработки электроэнергии гидростанциями вносится элемент случайности, прямо влияющий также и на результат выполнения плана себестоимости, так как известно, что эксплуатационные расходы на гидростанциях почти не зависят от выработки электроэнергии. Этот же элемент случайности далее входит в показатели премирования персонала за выполнение плана, а также в размер начисляемого фонда директора предприятия. Бывает так, что в многоводный год при перерасходе эксплуатационной сметы руководство гидростанции незаслуженно получает положительную оценку своей работы и даже премии. И, наоборот, при экономном расходовании сметы эксплуатации, но невыполнении плана выработки электроэнергии по причине маловодья, работники гидростанции лишаются всех видов поощрений».

Такая система планирования и премирования не может стимулировать улучшение эксплуатации гидростанций и должна быть пересмотрена»¹⁴.

Хардт же в своей статье пишет: «В 1955 г. было признано, что Центральный институт прогнозов избегает долгосрочных предсказаний о количестве воды, которая будет протекать в советских реках, и что прогнозы Института даже на один месяц вперед не точны. Для целей планирования в советской практике принято использовать цифру, представляющую 75% от объема обеспеченного стока в период составления планов. Эта практика плоха тем, как пишет в передовой статье советский журнал «Гидротехническое строительство», что в маловодные годы действительное количество воды может упасть до 45% от «среднего» уровня. Это означает, что если незарегулированная гидроэлектрическая станция мощностью примерно 100 тыс. *квт* может использовать весь располагаемый сток данного года, то расчеты на будущий год делаются, исходя из мощности 75 тыс. *квт*. Действительная же рабочая мощность может упасть до 45 тыс. *квт* в маловодные годы. Эта станция, таким образом, использовала бы только 60% своей расчетной мощности»¹⁵.

Легко видеть, что Хардт допускает грубую ошибку, отождествляя два совершенно различных показателя: обеспеченность (интегральную вероятность) годового стока и сток, выраженный в процентах от среднего стока. Н. М. Чупраков, анализируя принятую при планировании обеспеченности стока в 75%, считает ее достоверной в качестве среднего значения для множества рек, но отмечает, что для отдельных рек в разные годы она может колебаться от 45 до 98%. Каждому специалисту известно, что сток обеспеченностью 45% больше среднего стока, обеспеченность которого равна 50%, а не составляет от него 45%, как это пишет Хардт. Следовательно, расчет Хардта, выполненный для гидроэлектростанции мощностью 100 *Мвт*, является ошибочным.

Долгосрочное прогнозирование речного стока в СССР имеет такую же степень точности, как и в зарубежных странах, в том числе и в США. В связи с этим, советские

¹² «Правда» от 6 апреля 1957 г.

¹³ Там же.

¹⁴ Гидротехническое строительство, № 1, 1955.

¹⁵ Electrical Engineering, стр. 981—982, № 11, 1956.

гидроэнергетики предложили метод диспетчерского регулирования, который позволяет вести эксплуатацию гидроэлектростанции без долгосрочного прогноза стока. При диспетчерском регулировании участие ГЭС в балансах мощности и энергии системы обеспечивается с принятой степенью гарантии. Гидрологические же прогнозы используются лишь для уточнения режима использования избыточного стока, т. е. для повышения экономичности работы гидроэлектростанций в системах.

Приведенных фактов достаточно, чтобы судить, насколько «объективен» Хардт. Поэтому не будем останавливаться на всех других вопросах, столь же тенденциозно изложенных в статье, а ограничимся лишь некоторыми из них.

Хардт пишет, что 1 июля 1956 г. по линии электропередачи Куйбышев — Москва должен был пройти первый ток, но что этого не произошло, и до сих пор неясно из советских сообщений, окончена эта электропередача или нет.

Отвечаем: уникальная электропередача Куйбышев — Москва находится в эксплуатации; первая ее цепь введена в строй в мае 1956 г., а вторая в ноябре того же года.

Хардт пишет, что после некоторого ослабления контроля со стороны США над советскими закупками товаров основной статьей этих закупок, по показанию в сенате Джона Холлистера, был медный провод. По мнению Хардта, это, возможно, указывает на одно из серьезных современных узких мест, сдерживающих сооружение воздушных линий электропередач, высокого напряжения в Советском Союзе. Однако всем известно, что высоковольтные воздушные линии электропередач в СССР выполняются не медным, а сталеалюминиевым проводом.

Хардт пишет: «По перспективным советским планам на 1960 г., намеченным Сталиным в 1946 г. и повторенным Председателем Совета Министров Булганиным в июле 1955 г., требовалось установить 60 млн. кВт». В действительности, И. В. Сталиным 9 февраля 1946 г. было сказано: «...нам нужно добиться того, чтобы наша промышленность могла производить ежегодно до 50 млн. тонн чугуна, до 50 млн. тонн стали, до 500 млн. тонн угля, до 60 млн. тонн нефти. На это уйдет, пожалуй, 3 новых пятилетки, если не больше»¹⁶. В докладе Н. А. Булганина на Пленуме ЦК КПСС¹⁷ от 4 июля 1955 г. цитируется приведенное выше высказывание Сталина.

Как видно, в выступлении, на которое ссылается Хардт, нет и намека на киловатты. Следует предположить, что Хардт смешал тонны с киловаттами, введя в заблуждение читателей.

Хардт в другом месте статьи пишет, что «...большой приток рабочей силы из деревни в период текущего пятилетнего плана, по-видимому, невозможен, вследствие «кризиса советского с.-х. производства».

Известно, что в нашей стране за последние годы освоено 35,5 млн. га новых сельскохозяйственных площадей. Известно также, что в 1956 г. наша страна собрала рекордный урожай и увеличила государственные заготовки и закупки хлеба по сравнению с 1955 г. более, чем на 1 млрд. пудов. И это Хардт называет «кризисом сельского хозяйства».

Известно, что в США «планируется» сокращение сельскохозяйственных площадей. Известно также, что в США разоряются сотни тысяч мелких фермеров. Это, по-видимому, Хардт называет «процветанием». Мы придерживаемся иного мнения: систематический рост сельскохозяйственных площадей, неуклонный рост сельскохозяйственного производства в СССР — это и есть крутой подъем, процветание.

* * *

В заключение полезно напомнить, как буржуазная печать встретила первый план развития народного хозяйства молодой советской республики, план государственной электрификации России (ГОЭЛРО), разработанный под руководством В. И. Ленина в 1920 г. Буржуазная печать оценивала план ГОЭЛРО как «бред жестоких

фанатиков». Немецкий журнал «ETZ» писал о плане ГОЭЛРО: «...весь план электрификации представляет собой при данных условиях фантастическое вредное начинание»¹⁸. Даже автор фантастических романов Герберт Уэлс, посетивший нашу страну в 1920 г. и беседовавший в Кремле с В. И. Лениным, в своей книге «Россия во мгле» с иронией отзывался о ленинском плане электрификации¹⁹. По этому поводу писатель Анри Барбюс писал: «В том единственном случае, когда предсказания Уэльса — этого литературного архитектора будущих отношений — было проверено, оказалось, что будущее он видит навыворот. Как жаль, что он не может навсегда вычеркнуть из своих произведений эту страницу. За нее теперь так сурово разделяется с ним каждый школьник»²⁰.

Но уже тогда среди интеллигенции Запада были отдельные представители, в том числе электротехники, которые понимали все величие плана переустройства России на новых началах, на основе электрификации. Среди них был известный американский электротехник Карл Штейнмец (1865—1923), выразивший в своем письме В. И. Ленину «восхищение удивительной работой по социальному и промышленному возрождению, которую Россия выполняет при таких тяжелых условиях»²¹.

За период, прошедший со времени плана ГОЭЛРО, в экономике Советского Союза произошли большие изменения. Сейчас в нашей стране каждые сутки производится электроэнергии больше, чем за весь 1920 г., когда разрабатывался план ГОЭЛРО.

В Советский Союз приезжают делегации энергетиков многих стран для изучения опыта развития энергетики СССР. Советские энергетики, в свою очередь, посещают зарубежные страны для изучения передового опыта энергетики этих стран, встречаются с зарубежными энергетиками на общих и специальных мировых энергетических конференциях, где обмениваются опытом и делятся результатами научных исследований в различных областях энергетического хозяйства. Все это способствует укреплению взаимопонимания, сотрудничества и дружбы между учеными и инженерами всех стран независимо от их государственного и общественного устройства, что очень важно в наше время. К сожалению, статья Хардта на страницах журнала «Electrical Engineering» не способствует этому.

¹⁸ ETZ, стр. 1057, 1922.

¹⁹ Wells H., *Russia in Shadows*, London, 1921.

²⁰ А. Барбюс. «Сталин». М., стр. 187, 1927.

²¹ Соч. В. И. Ленина, 3-е издание, т. XXVII, стр. 275.

АМЕРИКАНСКИЙ ЖУРНАЛ О СОВЕТСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

В прошлом году в Советском Союзе побывали Andrew W. Kramer и Richard H. Morris. Первый из них является редактором, а второй издательским директором американского журнала «Power Engineering». Вот что они писали в своем журнале¹ о состоянии и развитии советской энергетики.

«Во многих областях прогресс русских является очевидным. Большинство их работ в области машиностроения — расчет и конструкция машин и особенно электрооборудования — указывает на исключительно хороший проект и мастерство изготовления.

В отношении развития электроэнергетики их прогресс достаточно очевиден. Развитие происходит в постоянно увеличивающихся темпах и в части строительства линий электропередач высокого напряжения и большой протяженности их достижения выдерживают сравнение с наилучшими сооружениями стран западного мира».

«За последние 10 лет достигнут громадный прогресс в расширении советской энергосистемы, особенно в строительстве гидроэлектростанций большой мощности и сооружения магистральных линий для передачи значительных количеств энергии на большие расстояния.

¹⁶ И. В. Сталин. Речь на предвыборном собрании избирателей Сталинского избирательного округа г. Москвы 9 февраля 1946 г., Госполитиздат, 1946.

¹⁷ «Правда» от 17 июля 1955 г.

¹ Power Engineering, стр. 78—81, октябрь 1956 г.

Только недавно вторая линия электропередачи 400 кв между Москвой и Куйбышевым была сдана в эксплуатацию.

В Куйбышеве уже установлены два агрегата, строительство продолжается. В конечном счете эта Волжская станция будет иметь мощность 2,1 Гвт и является лишь одной из многих станций большой мощности, которые должны быть построены на Волге в продолжение шестого пятилетнего плана.

Основной целью шестого пятилетнего плана является строительство единой системы, охватывающей всю Европейскую территорию Советского Союза, что вызвано действительно острой необходимостью в советском электроснабжении. Основными генерирующими установками, входящими в эту систему, являются сверхмощные гидроэлектростанции в Куйбышеве, Сталинграде и Горьком. Все эти гидроэлектростанции в данный момент находятся в различных стадиях строительства. Линии электропередачи 400 кв Москва — Сталинград, Москва — Куйбышев и несколько других будут представлять собой основные магистрали единой европейской системы, которая по окончании строительства свяжет между собой отдельные генерирующие установки общей мощностью до 30 Гвт.

Однако Европейская единая система Советского Союза является лишь только частью общего плана гидроэнергетического строительства. В восточной части СССР так же запланировано строительство чрезвычайно мощных гидроэлектростанций и некоторые из них уже сооружаются. Реки Ангара и Енисей исключительно удобны для использования их в целях гидростроительства. Общая мощность ГЭС, которые будут строиться только на этих двух реках, достигает 10 Гвт.

Одна из таких установок на Ангаре — громадная Братская ГЭС мощностью 3,2 Гвт — находится сейчас в процессе строительства. Другая — Красноярская ГЭС мощностью также 3,2 Гвт, строящаяся на реке Енисей, — будет также закончена в течение шестого пятилетнего плана.

Сооружение этих мощных гидроэлектростанций является серьезным стимулом для образования единой Сибирской энергосистемы, которая объединит все гидроэлектростанции на Ангаре, Енисее и Оби с тепловыми электростанциями в районе Иркутск — Черемхово и в других районах. В результате соединения этой Сибирской системы с Уральской и Европейской системами приведет к образованию единой объединенной системы, которая охватит весь Советский Союз. Для этого потребуются линии электропередачи протяженностью свыше 2 тыс. км, что в свою очередь вызовет необходимость повышения существующего напряжения с 400 до 600 или 800 кв. Изыскания производятся в этом направлении.

Большая исследовательская и экспериментальная работа проводится в данное время по развитию методов и усовершенствованию оборудования в связи с высоким напряжением этих линий электропередачи, тщательные испытания были проведены на линиях до сдачи их в эксплуатацию. Так, например, снимались характеристики, когда линия 400 кв Москва — Куйбышев, рассчитанная на нормальную частоту 50 гц испытывалась частотой от 40 до 130 гц. При этом одновременно использовалось 60 магнитных и 30 электронно-лучевых осциллографов, коммутационные перенапряжения на линии без реакторов превышали нормальное напряжение в два раза. Линия электропередачи была сдана в эксплуатацию в апреле 1956 г. и работает на своем номинальном напряжении 400 кв. Линия оборудована тремя проводами на фазу.

Для того чтобы облегчить возможности передачи энергии на большие расстояния, проводятся обширные изыскания по развитию систем высокого напряжения не только переменного тока, но и постоянного тока. Экспериментальная линия электропередачи постоянного тока 200 кв успешно работает в течение некоторого времени с нагрузкой 30 Мвт. Однако используемые ртутные выпрямители не удовлетворяют требованиям нормальной эксплуатации линии, вследствие чего проводится интенсивное изучение полупроводниковых выпрямителей. Необходимость в создании подходящего выпрямителя постоянного тока также задерживает усовершенствование этой линии электропередачи.

Большой интерес и гордость для русских представляет собой атомная электростанция 5 Мвт, находящаяся

на расстоянии около 130 км к юго-западу от Москвы. Эта станция питает электроэнергией город Обинское и по утверждению русских является первой атомной станцией в мире. Атомная электростанция находится в эксплуатации немногим больше двух лет. В США имеется экспериментальная атомная электростанция, принадлежащая комиссии по атомной энергии. Хотя эта электростанция генерирует электроэнергию в Идахо Фолс с декабря 1951 г., но она все же носит чисто демонстрационный характер, как и некоторые другие небольшие генерирующие установки, построенные после декабря 1951 г. В действительности русские правы, так как их атомная станция является действительно первой установкой, построенной специально для снабжения электроэнергией населения. Реактор с водой под давлением отличается излишне сложной конструкцией и имеет очень низкий ядерный и термический к. п. д.

Значительно большее впечатление, чем эта первая атомная станция 5 000 квт производит новый синхротрон, установленный в институте ядерных исследований Академии Наук СССР, в 130 км от Москвы, на северном конце канала Москва — Волга.

Этот ускоритель является одним из самых больших в мире мощностью 10 млрд. эв. Машина оставляет потрясающее впечатление и является для русских мощным орудием для дальнейших исследований в области ядерной физики».

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ ГЕРМАНИЕВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Значительные успехи в создании мощных германиевых выпрямительных элементов привели к применению германиевых выпрямителей в промышленных установках. Эти выпрямители имеют ряд достоинств, к которым относятся: очень низкое падение напряжения в проводящем направлении (порядка 0,6 в); высокий к. п. д., равный 97...98% в широком диапазоне нагрузок; высокая допустимая плотность тока, доходящая до 100 а/см²; высокое допустимое обратное напряжение до 150 в на один выпрямительный элемент; исключительно малые габариты выпрямительных элементов, а также простота и прочность их конструкции; выпрямители не нуждаются в создании вакуума; нагрузка может быть подключена к выпрямителям без затраты времени на подогрев; выпрямители можно выполнять как с водяным, так и с воздушным охлаждением; выпрямительный агрегат может быть выполнен любой формы в соответствии с имеющимся местом.

Недостатками германиевых выпрямителей являются высокая стоимость, низкая перегрузочная способность и неравномерное распределение обратного напряжения при последовательном соединении нескольких элементов.

Германиевые выпрямители применяют для получения как сравнительно небольших выпрямленных токов, так и токов порядка нескольких десятков тысяч ампер.

В тех случаях, когда необходим выпрямленный ток, превышающий значение предельно допустимого тока для одного выпрямительного элемента, они соединяются параллельно без специального отбора, так как падения напряжения в прямом направлении у отдельных элементов отличаются друг от друга незначительно. При помощи серьезных сопротивлений или реакторов можно предотвратить перегрузку отдельных элементов. Однако этот метод установки практически не применяется из-за его сложности и уменьшения к. п. д. Обычно просто снижают средний ток с таким расчетом, чтобы ни один из элементов не был перегружен. Параллельное соединение выпрямителей позволяет получать для электролитических целей ток до 42 000 а.

Германиевые выпрямители могут также работать параллельно с генераторами постоянного тока, игнтронами и т. д.

Вольтамперные характеристики отдельных выпрямительных элементов в непроводящем направлении могут существенно отличаться друг от друга, вследствие чего возможно неравномерное распределение между ними обратного напряжения. Поэтому при последовательном

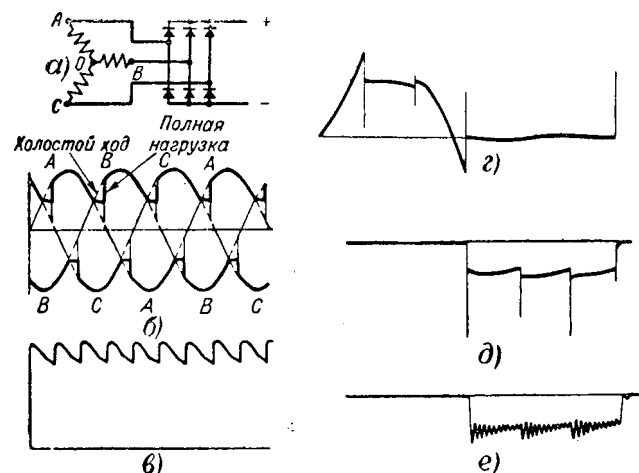


Рис. 1. Форма тока и напряжения при трехфазной мостовой схеме.

а — схема; б — форма волны линейного напряжения; в — форма выпрямленного напряжения; г — ток в выпрямительном элементе; д — напряжение на выпрямителе; е — напряжение на выпрямителе после подключения конденсаторов.

соединении элементов их подбирают так, чтобы они имели одинаковые вольтамперные характеристики в непереводящем направлении. В выполненных промышленных установках число последовательно соединенных элементов доходит до шести.

Иногда для обеспечения правильного распределения обратного напряжения между последовательно включенными выпрямительными элементами параллельно им включают высокоомные сопротивления.

Германиевые выпрямительные элементы можно соединять по любой из схем, применяемых в настоящее время для полупроводниковых выпрямителей старых типов. При мощности свыше 2 квт выпрямители обычно включают по трехфазной мостовой схеме.

Регулирование выпрямленного напряжения производят либо ступенчатым изменением переменного напряжения, которое подается на выпрямитель от вторичной обмотки трансформатора, либо при помощи дросселя насыщения, который может быть включен на первичной или вторичной стороне трансформатора. Второй метод обеспечивает плавное регулирование, но вызывает ухудшение коэффициента мощности установки.

Так как сопротивление выпрямителя в проводящем направлении очень мало, то для увеличения пределов регулирования выпрямленного напряжения желательно, чтобы сопротивление обмоток дросселей и трансформаторов было минимальным. При низком значении сопротивления схемы надежность защиты должна быть повышена.

В трехфазной мостовой схеме пульсация выпрямленного тока составляет 6% при частоте, равной шестикратному значению частоты питающего напряжения. Ток через выпрямительный элемент проходит только в течение $\frac{1}{3}$ периода. Остальное время к нему приложено обратное напряжение, приблизительно равное максимальному значению выпрямленного напряжения. Через вторичную обмотку трансформатора протекает только переменный ток, не имеющий постоянной составляющей. Преимуществом схемы является также малая расчетная мощность трансформатора. К недостаткам схемы относится то, что она требует большего числа плавких предохранителей и большего количества меди на соединительные шины, чем другие схемы.

Гармоники, образующиеся в питающем контуре, могут оказывать заметное влияние на телефонные сети. Пятые и седьмые гармоники могут быть уничтожены, если использовать два выпрямителя, соединенных по мостовой схеме со сдвигом вторичных напряжений на 30 эл. град.

Протекание тока в конце каждого полупроводящего периода в германиевом выпрямителе прекращается очень резко (явление провала заряда), вследствие чего в кривой напряжения появляются пики (рис. 1). Если не принять необходимых мер, то, несмотря на кратковременность дей-

ствия этого относительно высокого напряжения, оно может вызвать повреждение выпрямителей. Пики напряжения могут вызвать помехи радиоприему. Для уменьшения этих пиков, в случае необходимости, параллельно зажимам переменного тока моста включают конденсаторы.

Первое промышленное применение германиевые выпрямители нашли в электрохимической промышленности, где они заменили установленные ранее вращающиеся преобразователи. Это обстоятельство не является случайным. Известно, что стоимость электролитических процессов определяется главным образом стоимостью энергии. При низких напряжениях, применяемых при электролизе, германиевые выпрямители имеют более высокий к. п. д., чем другие виды выпрямителей; они не требуют тщательного ухода, как механические выпрямители, и длительное время работают в режиме полной нагрузки. Поэтому, несмотря на высокую первоначальную стоимость германиевых выпрямителей, их применение в данном случае оказалось целесообразным. Кроме того, если не считать кратковременного периода пуска, режим работы электролитических установок характеризуется постоянством тока нагрузки, что является очень важным для германиевых выпрямителей, не допускающих сколько-нибудь длительных перегрузок.

Выпрямители для электролитических установок монтируются в металлических шкафах. Германиевые выпрямительные элементы соединяются в последовательно-параллельные группы, образующие шестифазный мост. Выпрямители обычно имеют воздушное охлаждение, осуществляемое вентилятором пропеллерного типа. Воздух засасывается через отверстия в нижней части шкафа и выходит через отверстия, находящиеся сверху. Защита выпрямителя от перегрева в случае порчи вентилятора производится при помощи специального реле, которое включает сигнал, если скорость воздуха, проходящего через выпрямитель, падает до определенного минимума, и отключает выпрямитель через некоторое время, необходимое для перевода нагрузки на резервный агрегат. Для отдельных параллельных цепей, в которые группируются выпрямительные элементы, предусматриваются плавкие предохранители. Если они перегорают, то балансное токовое реле дает сигнал для обслуживающего персонала о том, что нагрузка на выпрямитель должна быть снижена.

Германиевые выпрямители для электролитических установок построены в Англии на мощность до 1 000 квт. Кроме того, в настоящее время там же строится установка на 18 000 квт для питания двух электролитических линий по 30 000 а каждая.

Успехи в производстве и эксплуатации мощных германиевых выпрямителей позволили использовать их для целей электрической тяги, применительно к которой они обладают рядом важных свойств, например, возможностью выполнения выпрямителя с воздушным охлаждением.

На рис. 2 дан общий вид германиевого выпрямителя мощностью 750 квт, который установлен на мотор-вагоне, предназначенном для одной из английских железнодорожных линий, электрифицированной для экспериментального определения свойств электрической тяги при токе нормальной частоты. В выпрямителе имеется 600 элементов, соединенных в последовательно-параллельные группы. Выпрямительные элементы смонтированы на вертикальных щитах и могут быть легко выдвинуты для осмотра. Охлаждение выпрямителя — воздушное. О результатах его испытания никаких сведений пока не опубликовано.

Американские фирмы выпускают германиевые выпрямители в виде комплектов устройств, состоящих из трансформатора, германиевых выпрямителей, вентилятора, необходимой аппаратуры и измерительных приборов. Все устройство монтируется в специальных шкафах. В правой части рис. 3 дана фотография одного из таких шкафов с германиевым выпрямителем мощностью 25 квт при напряжении постоянного тока 115 в. В левой части для сравнения показана аналогичная по мощности установка с селеновым выпрямителем.

Такие источники питания, вполне законченные с конструктивной точки зрения, можно соединять на стороне постоянного тока последовательно или параллельно с другими эквивалентными агрегатами, что очень облегчает решение проблемы питания постоянным током различных промышленных нагрузок.

В последнее время мощность выпрямителей, смонтированных в указанных шкафах, повышена до 50 кВт, и при напряжении 125 в они дают выпрямительный ток в 400 а. Коэффициент полезного действия всей установки составляет 94%, а коэффициент мощности 95%. Выпрямленное напряжение при изменении нагрузки от 0 до 100% изменяется на 5%. Несмотря на то, что выпрямители имеют воздушное охлаждение, габаритные размеры установки весьма невелики. При мощности выпрямителя в 50 кВт общий габаритный объем установки составляет 0,87 м³, а вес — около 540 кг.

Дальнейшим усовершенствованием выпрямителей описанного типа является автоматическая стабилизация их выпрямленного напряжения с точностью $\pm 1\%$ при колебаниях напряжения сети и тока нагрузки и при изменении температуры окружающей среды в пределах 0...40°С. После того как ток нагрузки достигает предельно допустимой величины, выпрямитель автоматически переходит в режим работы при постоянстве тока для предотвращения перегрева.

Такие характеристики получены при помощи схемы автоматического регулирования с применением полупроводниковых диодов, транзисторов и магнитных усилителей. В схеме выходное напряжение сравнивается с эталонным, получаемым на специальном кремниевом диоде. Разность этих напряжений подается на двухкаскадный транзисторный усилитель, управляющий магнитным усилителем. Такой выпрямитель с токовой отсечкой предназначен для зарядки аккумуляторов.

Мощные германиевые выпрямители появились сравнительно недавно — 4...5 лет тому назад, и их усовершенствование происходит так быстро, что через несколько лет следует ожидать существенного улучшения их свойств и характеристик. Первая публикация о мощных германиевых выпрямителях с *p-n* переходом была сделана в мае 1952 г. В ней был описан 25-кВт выпрямитель и указывалось, что он испытывался целый год. В январе 1954 г. был описан 120-кВт выпрямитель на выпрямленное напряжение 65 в. В мае 1954 г. появилось описание выпрямителей мощностью 300 кВт при выпрямленном напряжении 270 в с к. п. д., равным 98%, причем каждый выпрямительный элемент был рассчитан на ток в 50 а. В 1955 г. были изготовлены германиевые выпрямители мощностью около 1 500 кВт (12 000 а, 130 в выпрямленного напряжения) и,

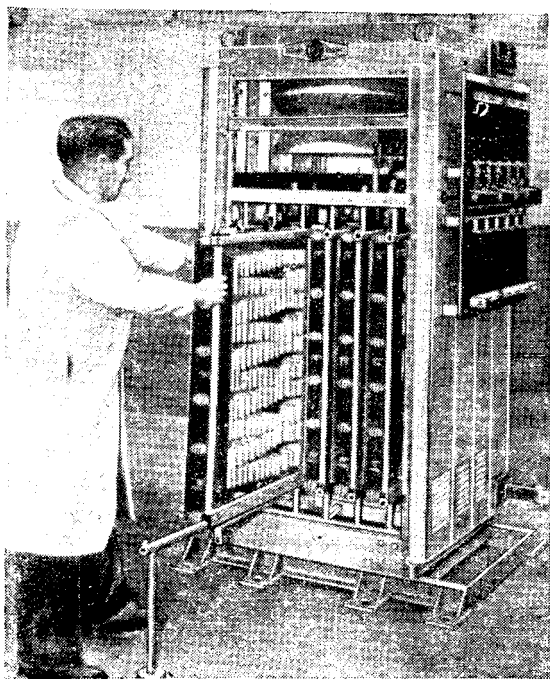


Рис. 2. Шкаф с германиевыми выпрямителями мощностью 750 кВт с воздушным охлаждением, установленный на одном из английских мотор-вагонов.

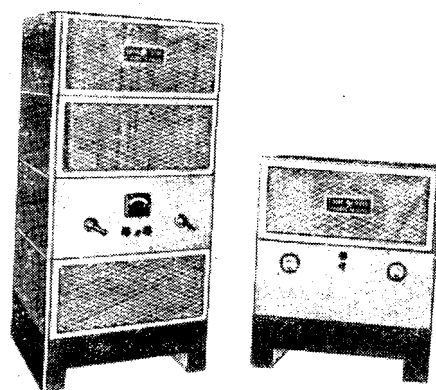


Рис. 3. Справа — шкаф с германиевым выпрямителем мощностью 25 кВт; слева — аналогичный по мощности селеновый выпрямитель.

наконец, в начале 1956 г. появилось сообщение о том, что изготавливается выпрямительная установка мощностью 18 000 кВт для питания двух электролитических линий по 30 ка каждая.

Диаграмма рис. 4 позволяет сравнить потери в выпрямителях различных типов с потерями в германиевом выпрямителе и установить диапазон напряжений, в пределах которого последний является наиболее эффективным. Повышение величины допустимого напряжения на каждый выпрямительный элемент ведет к уменьшению числа последовательно соединенных элементов и падению напряжения в прямом направлении, а следовательно, к повышению к. п. д.

При построении диаграммы рис. 4 принято, что максимальное значение обратного напряжения в схеме равно напряжению постоянного тока при двухполупериодном выпрямлении или удвоенному значению этого напряжения при однополупериодном выпрямлении. При таком допущении отношение падения напряжения в прямом направлении к напряжению постоянного тока практически не зависит от схемы.

Если предположить, что падение напряжения в прямом направлении у германиевого выпрямителя равно 0,6 в, то его способность успешно конкурировать с выпрямителями старых типов будет зависеть от того, какая может быть достигнута величина допустимого обратного напряжения на каждый выпрямительный элемент. Допустимое обратное напряжение, превышающее 40 в, дает возможность германиевому выпрямителю конкурировать с селеновым. Допустимое обратное напряжение в 100 в делает германиевый выпрямитель в области напряжений постоянного тока до 700 в конкурентоспособным с механическими и ртутными выпрямителями.

Совершенствование техники производства селеновых выпрямителей за последние 15 лет, особенно благодаря использованию селена высокой чистоты, позволило повысить их допустимое обратное напряжение с 20 до 40 в, причем теоретическим пределом является напряжение порядка 100 в. То обстоятельство, что значение допустимого обратного напряжения для германиевых выпрямителей существенно повышено всего за последние несколько лет, свидетельствует о том, что селеновые и механические выпрямители в недалеком будущем будут постепенно вытесняться германиевыми.

Для того чтобы к. п. д. германиевых выпрямителей при напряжении 1 000...3 000 в был выше к. п. д. ртутных выпрямителей, германиевые выпрямители должны иметь допустимое обратное напряжение на элемент около 150 в. Для выпрямителей с малой площадью перехода напряжения такого порядка уже получены. Возможно, однако, что потребуется продолжительное время, прежде чем будут получены промышленные образцы таких выпрямителей с большой площадью перехода, способные надежно работать при достаточно высоких температурах. Надо

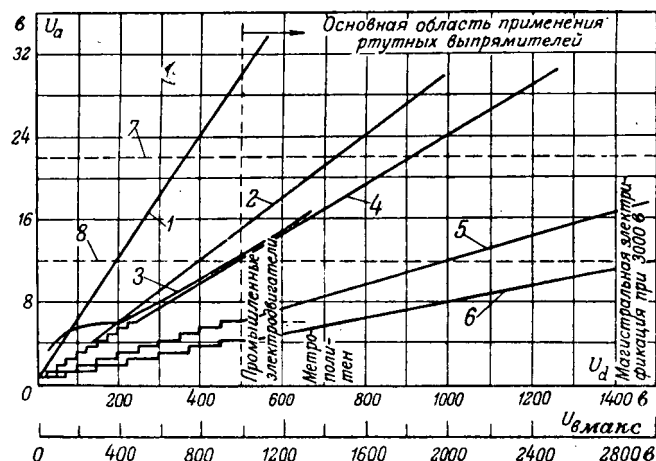


Рис. 4. Зависимость падения напряжения в проводящем направлении от выпрямленного напряжения для выпрямителей различных типов.

U_a — падение напряжения в проводящем направлении; U_d — выпрямленное напряжение, а также примерное значение максимального обратного напряжения, приложенного к выпрямителю, работающему по схеме двухполупериодного выпрямления при двух элементах, включенных последовательно; $U_{в макс}$ — примерное значение максимального обратного напряжения, приложенного к выпрямителю при однополупериодном выпрямлении.

1 — селеновый выпрямитель: падение напряжения в проводящем направлении — 0,6 В, максимальное значение обратного напряжения — 20 В; 2 — селеновый выпрямитель: падение напряжения в проводящем направлении — 0,6 В, максимальное значение обратного напряжения — 40 В; 3 — механический выпрямитель; 4 — германиевый выпрямитель: падение напряжения в проводящем направлении — 0,6 В, максимальное значение обратного напряжения — 50 В; 5 — германиевый выпрямитель: падение напряжения в проводящем направлении — 0,6 В, максимальное значение обратного напряжения — 100 В; 6 — германиевый выпрямитель: падение напряжения в проводящем направлении — 0,6 В, максимальное значение обратного напряжения — 200 В; 7 — падение напряжения в дуге современного ртутного выпрямителя; 8 — возможное падение напряжения в дуге ртутного выпрямителя.

также иметь в виду, что и ртутный выпрямитель может быть значительно усовершенствован. В настоящее время падение напряжения в дуге ртутного выпрямителя составляет около 22 В, но оно может быть снижено примерно до 12 В. Снижение падения напряжения в дуге до этой величины ограничивается потенциалом ионизации ртути, равным 10,8 В. Для того чтобы германиевые выпрямители могли успешно конкурировать с ртутными, они должны иметь обратное напряжение порядка 150..200 В.

Ртутные выпрямители будут еще долго превосходить по своим свойствам германиевые в тех случаях, когда сеточное регулирование используется как элемент системы управления мощными электродвигателями. Эквивалентным полупроводниковым устройством явился бы транзистор очень большой мощности или комбинация транзисторов и магнитных усилителей. Такие системы для больших мощностей пока не разработаны и неизвестно, окажутся ли они вообще приемлемыми по своей стоимости и характеристикам.

В отношении экономической целесообразности применения германиевых выпрямителей надо иметь в виду, что для выпрямителей большой мощности в ряде случаев эксплуатационные расходы имеют более важное значение, чем первоначальная стоимость агрегата. Конечно, изготовление выпрямительных элементов из германия высокой степени чистоты стоит очень дорого. Однако германиевые выпрямители проще по конструкции и занимают при данной мощности гораздо меньше места, чем ртутные выпрямители или двигатель-генераторы.

Стоимость германиевых выпрямителей в значительной мере определяется технологией их изготовления, которая непрерывно совершенствуется. Поэтому есть все основания полагать, что и в этом отношении они скоро станут вполне сравнимыми с выпрямителями других типов.

Приведенные в иностранной технической литературе сведения, касающиеся стоимости мощных германиевых выпрямителей, противоречивы и не дают достаточно четкой картины. Так, например, некоторые авторы утвер-

ждают, что в настоящее время германиевые выпрямители стоят дешевле, чем игнитроны на тот же номинальный ток. Если же вести сравнение не по току, а по мощности, то они стоят дороже, чем игнитроны, так как последние имеют более высокое обратное напряжение.

Литература

1. C. F. Machin. Мощные полупроводниковые выпрямители. Research, т. 8, стр. 262, № 7, 1955.
2. R. M. Crenshaw. Применение мощных германиевых выпрямителей. El. Eng., т. 74, стр. 418, № 5, 1955.
3. R. M. Crenshaw. Промышленное применение германиевых выпрямителей. El. Eng., т. 75, стр. 719, № 8, 1956.
4. The Engineer. т. 201, стр. 53, № 5216, 1956.
5. Германиевые выпрямители для электрической тяги Modern Transport, март 24, 1956:

Кандидат техн. наук, доц. И. Б. Башук

ГОРОДСКОЙ БЕЗРЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ ЗА РУБЕЖОМ¹

(Обзор)

Городской безрельсовый электротранспорт получает интенсивное развитие как в Европе, так и в США, начиная с 40-х годов настоящего столетия. В качестве массового безрельсового пассажирского электротранспорта находит применение троллейбус с питанием электроэнергией от контактной сети; менее распространен дизельэлектробус с автономным электроснабжением и транспорт с маховиковым аккумулярованием электроэнергии — электрогиробус. Область применения аккумуляторного электротранспорта ограничивается обслуживанием специальных перевозок (почта, торговая сеть, коммунальные перевозки, очистка улиц и др.).

Развитие троллейбусного транспорта. В США в 1903 г. имелся всего 1 троллейбус, в 1932 г. их было 227, в 1941 г. 2802, а в настоящее время насчитывается 7 000 шт. Современный уровень троллейбусного транспорта в США и его динамика видны из табл. 1. К началу

Таблица 1

Развитие троллейбусного транспорта в США

Годы	Подвижной состав на 1 января		Протяженность пути в однопутном исчислении		Годовой пробег за предыдущий год		Пассажироперевозки за предыдущий год	
	шт.	%	тыс. км	%	млн. машино-километров	%	млн. чел.	%
1931	173	0,2	0,235	0,23	9,6	0,24	16	0,1
1941	2802	3,8	3,1	3,2	138,0	3,35	534	4,0
1954	6958	8,5	6,1	5,7	326,0	7,35	1650	13,6

Примечание. Процентные отношения даны к итоговым показателям по всем видам массового пассажирского транспорта за рассматриваемый год.

второй мировой войны в Великобритании насчитывалось уже 3147 троллейбусов, эксплуатируемых в 34 городах, а в настоящее время их число возросло до 4000. Развитие троллейбусного транспорта в Великобритании видно из табл. 2.

По данным автора обзора, к началу второй мировой войны во всем мире насчитывалось около 170 троллейбусных предприятий, эксплуатировавших 8 500 троллейбусов. В настоящее время общее число троллейбусов во всем мире по самой осторожной оценке составляет не менее 17 000 шт. Имеется 25 крупнейших городов мира, в кото-

¹ По материалам иностранной периодики за последние 5 лет.

Таблица 2

Развитие троллейбусного транспорта в Великобритании

Годы	Подвижной состав на 1 января				Пробег за предыдущий год				Пассажироперевозки за предыдущий год			
	Всего		В том числе в Лондоне		Всего		В том числе в Лондоне		Всего		В том числе в Лондоне	
	шт.	%	шт.	%	млн. машино-километров	%	млн. машино-километров	%	млн. чел.	%	млн. чел.	%
1940	3 471	5,7	1 411	18,0	218	7,0	102,0	18,0	1 700	13,0	715	22,3
1950	4 086	5,3	1 764	18,4	257	6,6	126,0	18,4	2 005	12,0	891	22,7
1955	4 000	4,8	1 755	17,0	243	5,9	121,5	19,0	1 850	11,3	800	21,5

Примечание. Процентные отношения даны к итоговым показателям по всем видам массового пассажирского транспорта.

рых на каждые 3 автобуса приходится 7 троллейбусов. Лишь в Нью-Йорке, Лондоне и Париже автобусы преобладают над троллейбусами. Для сравнения укажем, что число городских автобусов достигает в США 54 тыс., а в Великобритании 77,3 тыс. шт. В Великобритании за последние 5 лет количество эксплуатируемых троллейбусов остается неизменным, например в Лондоне на уровне около 1 800 шт.

Несмотря на очевидную вредность выхлопных газов автотранспорта и загрязнение ими воздушных бассейнов современных городов, доля пассажироперевозок троллейбусного транспорта относительно невелика: она составляет в настоящее время по США 13,6% общих пассажироперевозок массового городского транспорта, а по Великобритании 11,3%, достигая в Лондоне 21,5%.

Помимо городских перевозок известно использование троллейбусов на линиях вылетного типа и для междугородней связи, например в Германии и Франции, где имеется самая длинная троллейбусная трасса в мире (Модин — Лансбург), протяжением 25 км. Эта линия проходит на высоте до 1 400 м и имеет подъемы, достигающие 100%. Наибольшие подъемы имеются на троллейбусных линиях в Юденбурге (Австрия) — 160%, в Кейптауне (Южно-Африканский Союз) — 145% и в Сиэтле (США) — 185%.

Троллейбусный транспорт обеспечивает высокую частоту движения, достигающую в современных городских условиях 30 машин в 1 ч, что соответствует провозной способности в 5 000 пассажиров в 1 ч. Для сравнения укажем, что частота движения легковых автомобилей может быть доведена до 715 машин в 1 ч на одну полосу движения при провозной способности только в 2,5 тыс. пассажиров в 1 ч.

Данные о современных конструкциях троллейбусов приведены в табл. 3. Во всем мире преобладают двухосные конструкции троллейбусов одноэтажного исполнения. В Дании, Швейцарии, а за последнее время в ГДР и ФРГ эксплуатация троллейбусов с прицепом носит массовый характер. Следует отметить немецкие троллейбусы (ГДР) типа W-602-A, предназначенные для эксплуатации как в одиночной тяге, так и с прицепом.

Троллейбус имеет автоматическую схему управления, предусматривающую 163 пусковых позиции, и оборудуется двухколлекторным тяговым двигателем, развивающим часовую мощность в 120 кВт при скорости вращения 1 500 об/мин. Аппаратура управления монтируется в передней части троллейбуса по агрегатной системе монтажа в одном блоке вместе с пусковыми сопротивлениями, охлаждаемыми принудительно. Максимальная скорость троллейбуса 52 км/ч при эксплуатационной скорости 19 км/ч. Троллейбус развивает пусковое ускорение 2,5... 2,7 м/сек² при максимальном тормозном замедлении 4,5 м/сек².

Благодаря наличию специального бензо-электрического агрегата мощностью 15 л. с. он может эксплуатироваться на мостах и площадях без контактной сети. При питании троллейбуса от вспомогательного агрегата он может развивать скорость на площадке в 20 км/ч.

При эксплуатации с прицепом относительные весовые показатели снижаются с 320 для одиночного троллейбуса до 227 кг/место для троллейбуса с прицепом. Энерговооруженность соответственно падает с 13,5 до 9,0 кВт/т.

Эффективность эксплуатации троллейбусов с прицепом подтверждается также опытом их эксплуатации в Швейцарии, например в городах Биле и Сант-Гален.

Современный троллейбусный прицеп весит 4,8 т, что соответствует относительному весу на одного пассажира в 68 кг, т. е. на 50% меньше, чем для обычных троллейбусов. Относительный вес троллейбуса с прицепом составляет 242 кг/место, или 108 кг/пассажира, т. е. меньше, чем у современных двухэтажных троллейбусов. Расход энергии троллейбусного поезда, несмотря на удвоенную провозную способность, лишь на 10...15% выше, а удельный расход на 58% ниже, чем для одиночного троллейбуса. Троллейбус с прицепом занимает на 16,7% меньше площади на улице по сравнению с двумя, следующими один за другим троллейбусами. Прицепы оборудуются специальными электрическими тормозами, обеспечивающими разновременное подтормаживание при поворотах передних и задних колес троллейбуса, благодаря чему троллейбусный поезд хорошо вписывается в кривые. Между троллейбусом и прицепом устанавливается электрическая сигнализация и громкоговорящая связь.

Автор обзора полагает, что вопрос эксплуатации троллейбусов с прицепом может представлять существенный интерес для некоторых троллейбусных линий в СССР, в особенности вылетного типа.

В 1956 г. в ГДР создан новый тип двухэтажных сочлененных троллейбусов. Такой троллейбус состоит из короткого (4,75 м) двухосного электротягача, на котором размещается кабина управления, а на крыше — токоприемники (рис. 1). Электротягач оканчивается задней площадкой, на которую при помощи специального амортизированного и изолированного шарнирного сочленения опирается один конец кузова пассажирского салона с двумя задними осями. Троллейбус оборудован двухколлекторным тяговым электродвигателем часовой мощностью 120 кВт. Все электрооборудование унифицировано со стандартным одноэтажным троллейбусом и смонтировано по агрегатной системе монтажа в передней части электротягача. Управление штангами токоприемников — пневматическое. Несмотря на значительную общую длину, достигающую 15 м, новый троллейбус с электротягачом может курсировать по узким улицам шириной до 6 м и хорошо вписывается в кривые с внутренним радиусом 3,3 м при внешнем радиусе 11 м.

При максимальной скорости 45 км/ч троллейбус может развивать эксплуатационную скорость 22 км/ч благодаря высоким пусковым ускорениям. Электрическое реостатное торможение обеспечивает троллейбусу снижение скорости до 8 км/ч; окончательное затормаживание осуществляется пневматическим тормозом. При нормальном наполнении вместимость троллейбуса достигает 101, а в часы пик — 140...150 пассажиров.

Автомеханическая часть троллейбусов нового типа полностью унифицирована с апробированными в массовой эксплуатации автобусами. Путем простой смены электротягача на автотягач двухэтажный сочлененный троллейбус может быть обращен в автобус для эксплуатации на загородных линиях. Троллейбус нового типа отличается малой энерговооруженностью, составляющей всего 6,55 кВт/т, против обычных для двухэтажных троллейбусов 7,7...11 кВт/т. Новый троллейбус сочлененного типа хорошо зарекомендовал себя в эксплуатации.

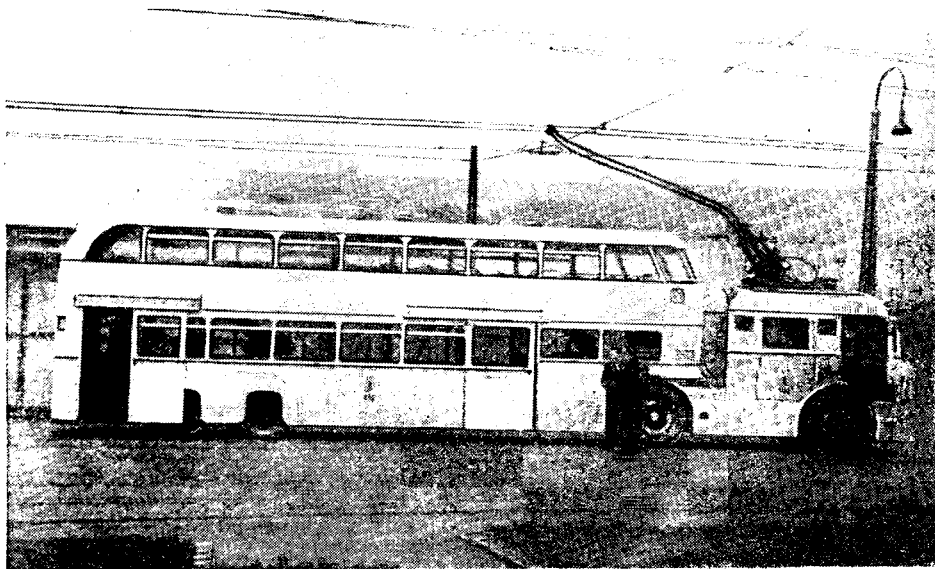


Рис. 1. Двухэтажный сочлененный троллейбус с тягачом, выпуска 1956 г. (ГДР).

На современных троллейбусах применяют тяговые двигатели как последовательного, так и смешанного возбуждения; последние главным образом в Великобритании. В настоящее время ощущается тенденция к отказу от рекуперативного торможения ввиду его малой эффективности и появления при рекуперации коммутационных перенапряжений в контактной сети, усложняющих ее нормальную эксплуатацию. Отдельные фирмы предусматривают устройства, исключающие рекуперацию, но обеспечивающие использование компаундных свойств двигателя для достижения плавного пуска. Широко распространены схемы ослабления поля, доводимого до 28% полного. Применяются компенсированные тяговые двигатели (рис. 2). В США преимущественно распространен одномоторный привод, тогда как в Европе, например в Германии, Швейцарии, Италии, известно применение сдвоенных и двухколлекторных двигателей.

Существуют следующие системы привода троллейбусов: 1) однодвигательный привод задней оси двухосного троллейбуса, 2) двухдвигательный привод двух задних осей трехосного троллейбуса, 3) привод от сдвоенного тягового двигателя двух задних осей трехосного троллейбуса, 4) привод от сдвоенного тягового двигателя задней оси двухосного троллейбуса, 5) привод от двух тяговых двигателей, приводящих левые и правые задние колеса трехосного троллейбуса, 6) однодвигательный привод двух взаимно сочлененных осей трехосного троллейбуса, 7) привод от двух тяговых двигателей, по одному на каждую заднюю ось трехосного троллейбуса с одновременным сочленением обеих осей, 8) привод от четырех тяговых двигателей, по одному на каждое заднее колесо трехосного троллейбуса. Из названных типов электропривода преимущественное распространение находит однодвигательный привод.

В США на троллейбусах применяют быстроходные тяговые двигатели со скоростью вращения, при часовом режиме 1600...1700 об/мин. В последнее время в Европе предпочитают тяговые двигатели со средней скоростью вращения, обеспечивающие больший пусковой момент при меньших пусковых токах.

Рис. 2. Сравнение компенсированного и некомпенсированного троллейбусного тягового двигателя.

а — расположение обмоток у компенсированного двигателя; б — расположение обмоток у некомпенсированного двигателя; в — магнитные характеристики двигателей. 1 — н. с. якоря; 2 — н. с. компенсационной обмотки; 3 — суммарная н. с. компенсированного двигателя; 4 — суммарная н. с. некомпенсированного двигателя; 5 — распределение индукции под главным полюсом компенсированного двигателя; 6 — распределение индукции под главным полюсом некомпенсированного двигателя.

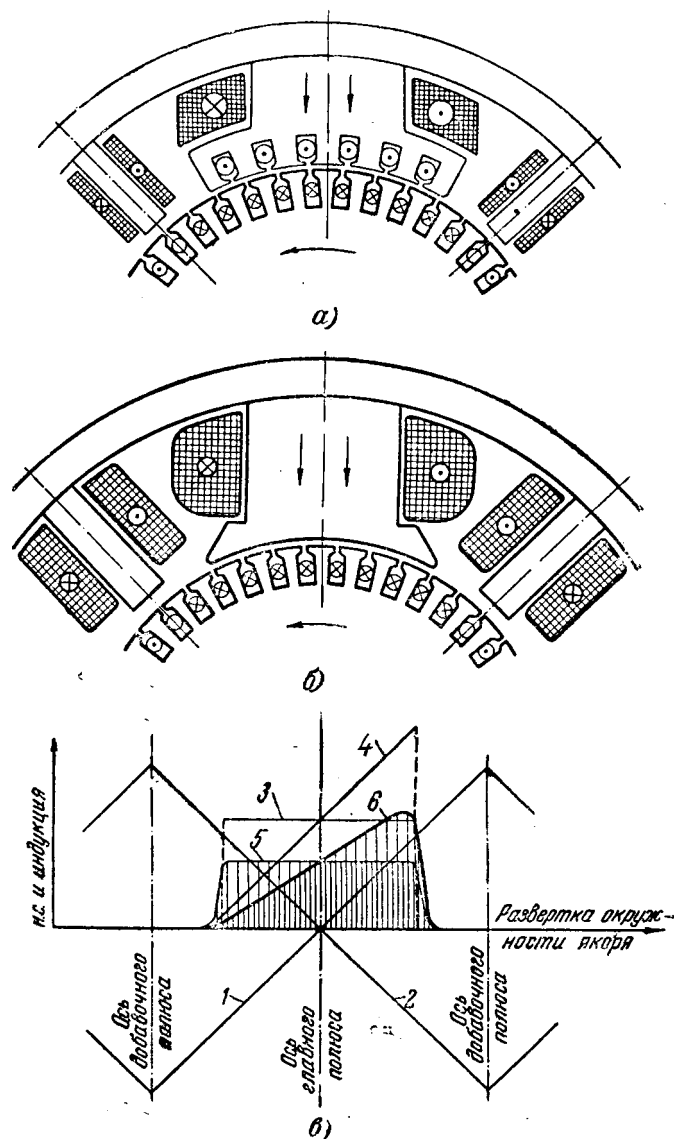


Рис. 3. Характеристики тяговых двигателей
фирмы Сименс-Шуккерт.

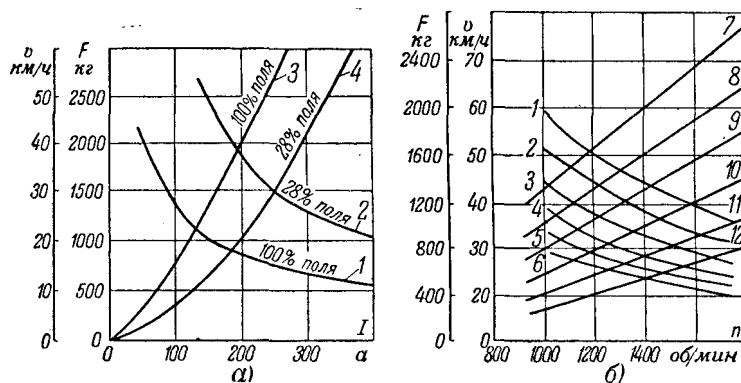
а — скоростные характеристики двигателя типа ЕКМ-90 одноколлекторного исполнения.

1 и 2 — зависимость скорости троллейбуса от тока тягового двигателя; 3 и 4 — тяговое усилие в зависимости от тока.

б — сравнительные характеристики тягового усилия троллейбуса, оборудованного тяговым двигателем фирмы Сименс-Шуккерт.

1...6 — зависимость тягового усилия от скорости вращения тягового двигателя; 7...12 — зависимость скорости троллейбуса от скорости вращения.

Кривые 1, 3, 5, 8, 10 и 12 — при передаточном числе трансмиссии 11,5; кривые 2, 4, 6, 7, 9 и 11 — при передаточном числе 9,5.



Сдвоенные, а также двухколлекторные тяговые двигатели имеют два самостоятельных якоря, размещенных в одном общем остове. Двухколлекторные тяговые двигатели позволяют осуществлять последовательно-параллельное соединение обмоток двигателя, чем обеспечивается снижение потерь в пусковых сопротивлениях. При эксплуатации на последовательном соединении обмоток двигателя возникает ходовая экономичная позиция с низколежащей скоростной характеристикой. Отсутствие последовательно-параллельного соединения в одноколлекторных тяговых двигателях способствует, однако, упрощению схемы управления. Первоначальная стоимость одноколлекторного двигателя ниже, чем двухколлекторного. Одноколлекторный двигатель в состоянии обеспечить показатели двухколлекторного при наличии низколежащих скоростных характеристик и возможности регулирования поля.

Технические параметры некоторых современных типов троллейбусных тяговых двигателей приведены в табл. 4.

Из приведенных данных видно, что современные тяговые двигатели обладают малым относительным весом — около 7,5 кг/квт, против 10 кг/квт 25 лет назад.

Скоростные и тяговые характеристики современных тяговых двигателей представлены на рис. 3. Тормозные схемы могут быть с самовозбуждением и с посторонним возбуждением; на рис. 4 приводится сопоставление этих схем и даются тормозные характеристики.

Применяя компаундный двигатель в режиме реостатного торможения, фирма Сименс-Шуккерт использует схему с посторонним возбуждением обмоток последовательного возбуждения. В двигательном режиме шунтовая обмотка отключается и двигатель работает как двигатель последовательного возбуждения. Современные схемы этой фирмы предусматривают управление двумя ножными педалями, ходовой и тормозной, работающими при приложении минимального усилия, а следовательно, обеспечивающими минимальную утомляемость водителя. Схемы управления создают полную надежность эксплуатации вследствие наличия принудительного торможения при всякого рода ошибочных включениях и отличаются простотой регулирования. Троллейбусы развивают максимальную скорость 60—65 км/ч, обладают максимальным пусковым ускорением 1,5 м/сек² и тормозным замедлением 1,6 м/сек².

Широкое распространение находят на троллейбусах полуавтоматические схемы управления с серводвигате-

Таблица 3

Современный подвижной состав зарубежного троллейбусного транспорта
(1952—1957 гг.)

Показатели	Чехословакия		Швейцария	Великобритания		США		Италия		Германия				Франция		Испания	Венгрия
	Одноэтажный	77-24		Одноэтажный	Двухэтажный	Одноэтажный	Сочлененный	Одноэтажный	Сочлененный	Одноэтажный	Сочлененный	Одноэтажный	Сочлененный	Одноэтажный	Сочлененный		
Тип																	
Число осей . . .	2	3	3	2	3	3	2	4	3	3	3	2	2	4	4	3	2
Число мест . . .	74	80	80	75	50	75	72	120	73	140	75	75	72	123	101	74	60
В том числе для сидения	22	28	19	23	36	70	48	58	23	50	45	25	28	59	59	70	26
Вес, т	9,6	10,5	10,0	9,4	8,6	9,0	8	12,6	9,0	14,0	12,3	9,8	8,9	13,4	18,4	10,5	7,5
Длина, м	10,7	11,2	10,7	10,8	9,8	9,5	12	14,2	10,4	18,3	10,5	10,0	10,8	20,0	15,0	10,0	10,0
Ширина, м . . .	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,4	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Высота, м	3,2	3,3	2,9	3,3	3,2	4,5	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,9	4,6	3,1
Максимальная скорость, км/ч	45	50	60	50	50	50	75	60	60	50	70	50	52	52	45	50	60
Общая часовая мощность, квт	100	120	120	81	74	70—100	103	184	85	103	110	100	120	120	120	74	147
Энерговооруженность, квт/т	10,4	10,4	12,0	8,7	8,6	7,7—11	12,8	14,5	9,3	7,6	8,8	10,2	13,5	9,0	6,55	12,0	9,8
Относительный вес, кг/квт	96	93	83	174	116	130—91	77,5	68	106	118	113	93	74,0	112,5	154,0	83	103
То же, кг/место	436	375	435	407	220	129	182	217	390	280	265	392	320	242	312	148	238
То же, кг/пассажира	130	131	130	125	170	120	111	105	124	100	161	131	124	108	183	140	125

Таблица 4

Троллейбусные тяговые двигатели

Фирма	Тип	Род двигателя	Рабочее напряжение, в	Часовая мощность, кВт	Скорость вращения, об/мин	Вес, кг	Вращающий момент кг·м	Относительный вес	
								кг/квт	кг/кг·м
Сименс-Шуккерт	DKM-100	Двухколлекторный	600	2×50	1 650	—	58,5	—	—
"	DKM-90	"	600	2 45	1 000	—	87,5	—	—
"	EKM-105	Одноколлекторный	600	105	1 700	—	60,5	—	—
"	Компенсированный I	—	600	90	1 000	615	87,5	6,8	6,3
"	Компенсированный II	—	600	110	1 200	700	88,0	7,0	8,0
АЕГ	USC-227a	Двухколлекторный	600	2×55	1 665	—	63,5	—	—
АЕГ	USC-4662	Одноколлекторный	600	100	1 250	750	78,0	7,5	9,7
Броун-Бовери	ALM-1273	—	600	85	1 600	—	51,5	—	—
Тяговые двигатели, применяемые на троллейбусах в Чехословакии		Двухколлекторный	600	2×45	1 240	1 120	70,0	13,3	15,8
		"	600	2 25	2 100	470	23,2	9,4	20,2
		Одноколлекторный	600	120	1 500	900	77,0	7,5	11,7
		"	600	81	1 080	850	72,5	10,6	11,8
		"	600	90	1 040	860	83,7	9,5	10,4
		"	600	93	1 700	600	54,5	6,25	11,0

лями, с маховиковым контроллером и с электропневматическим приводом. Наиболее современной является схема троллейбуса, разработанная и осуществленная фирмой АЕГ применительно к троллейбусам, предназначенным для Испании.

В отличие от общепринятого в полуавтоматических схемах реле ускорения АЕГ заложила в схему новый принцип регулирования с использованием специальных электромагнитных тормозных устройств механизма контроллера.

Привод контроллера АЕГ может осуществляться как от электропневматической системы, так и от электромагнитного привода. На рис. 5 представлена принципиальная схема электропневматического полуавтоматического пуска троллейбуса, основанная на разности давлений. Постоянное усилие на штоке поршня обеспечивает поворот контроллера в нулевое положение. Изменение направления

вращения контроллера осуществляется исключительно включением или отключением электромагнитного вентиля при помощи кнопочного управления. Для регулирования по времени прохождения ходовых позиций контроллера кулачковый вал связан с магнитным замедлителем, состоящим из короткозамкнутого якоря 9, вращающегося в магнитном поле, которое создается обмотками, питаемыми от напряжения сети 10 и от рабочего тока двигателя 11. Это обеспечивает одинаковое пусковое ускорение при колебаниях напряжения сети в широких пределах. Схема дает возможность применять любой вид торможения. В современных тормозных схемах находит применение реостатное торможение, обеспечивающее плавное нарастание тормозного усилия благодаря применению специальной тормозной схемы с подпиткой обмотки возбуждения от особого генератора, и дает возможность снижать скорости троллейбуса до 3...5 км/ч.

На троллейбусах США предусматриваются установки для кондиционирования воздуха. Электрооборудование американских троллейбусов располагается в заднем от-

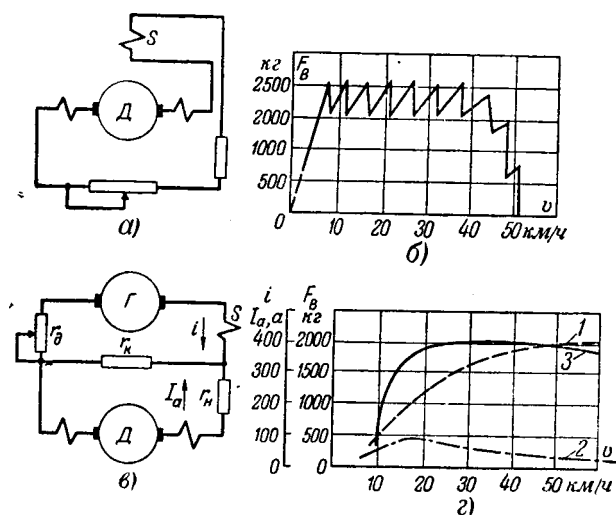


Рис. 4. Тормозные схемы и характеристики троллейбуса фирмы Сименс-Шуккерт.

а — схема реостатного торможения током двигателя. Д — тяговый двигатель; S — его обмотка последовательного возбуждения; б — зависимость тормозного усилия от скорости троллейбуса; в — комбинированная тормозная схема с вспомогательным тормозным генератором и стабилизирующим сопротивлением. Д — тяговый двигатель (обмотка последовательного возбуждения); Г — вспомогательный генератор; r_k — стабилизирующее сопротивление; r_d — регулируемое сопротивление в цепи вспомогательного генератора; r_n — нагрузочное сопротивление; г — тяговый двигатель; д — вспомогательный генератор; е — стабилизирующее сопротивление; ж — регулируемое сопротивление в цепи вспомогательного генератора; з — нагрузочное сопротивление.

з — тормозные характеристики при схеме в.
1 — зависимость тока якоря от скорости троллейбуса; 2 — зависимость тока возбуждения от скорости; 3 — зависимость тормозного усилия от скорости.

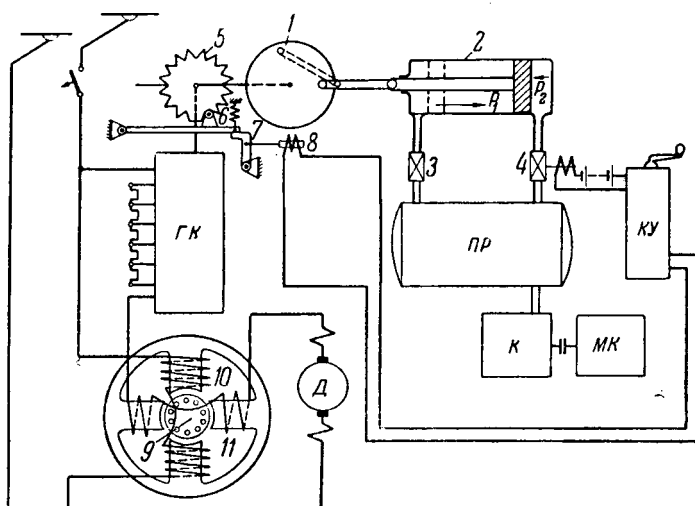


Рис. 5. Принципиальная схема автоматического управления троллейбусом фирмы АЕГ.

1 — кривошипно-шатунный механизм; 2 — поршень пневматической системы; 3 — редуктор пневматической системы; 4 — электромагнитный пневматический вентиль; 5 — зубчатый диск трещотки главного контроллера; 6 — фиксатор трещотки; 7 — запор механизма трещотки; 8 — электромагнит фиксатора; 9 — якорь электромагнитного замедлителя главного контроллера; 10 — обмотка параллельного возбуждения электромагнитного замедлителя; 11 — обмотка последовательного возбуждения электромагнитного замедлителя; Д — тяговый двигатель; Г — главный контроллер; КУ — контроллер цепи управления; ПР — резервуар сжатого воздуха; К — компрессор; МК — двигатель компрессора.

секе; такую систему начинают применять и некоторые европейские фирмы. Подобное расположение оборудования сокращает длину электрических коммуникаций и способствует снижению токов утечки.

Широкое распространение, например, в США получили троллей-автобусы, предназначенные для эксплуатации в черте города в качестве троллейбусов с питанием от контактной сети, а на вылетных маршрутах — в виде дизель-электробусов. К недостаткам машин этого класса следует отнести необходимость перевозки на всех городских маршрутах лишнего мертвого веса в виде полногабаритного двигателя внутреннего сгорания.

Электрическая передача находит, кроме того, распространение в современных дизель-электробусах, обеспечивая предельную простоту и плавность управления.

Новые виды безрельсового городского электротранспорта. Аккумуляторные электромобили. До второй мировой войны, по данным автора обзора, 11 крупных почтамтов Германии эксплуатировали 2 400 почтовых электромобилей. В Мюнхене и Гамбурге работали электромобили-такси. Число электромобилей в Великобритании достигало 6 000 шт., в США 22 000 шт. В настоящее время в Великобритании насчитывается 25 000 электромобилей, используемых преимущественно в торговой сети.

Констатируется значительное отставание в общем развитии электромобильного транспорта. Ограниченный мелкосерийный выпуск электромобилей промышленностью и многотипность обуславливают их высокую рыночную стоимость. Только в Великобритании 25 фирм производят 60 моделей электромобилей грузоподъемностью 200...1 000 кг при выпуске за 10 лет (с 1944 по 1954 г.) всего 17 000 шт. В перспективе на электромобильный транспорт могло бы быть переведено до 50% автомобилей, обслуживающих перевозки в черте города. Наиболее распространены электромобили грузоподъемностью до 1 т.

Крупным достоинством электромобилей является их относительная бесшумность. Так, громкость шума составляет для электромобиля 27...40, легкового автомобиля 40...60, грузового автомобиля 40...70, трамвая 40...75 и для рельсового транспорта 54...80 дб.

С ростом автомобильного движения в больших городах резко снизились скорости движения. Это делает электромобили конкурентоспособными с автомобилями в условиях городских перевозок, сопряженных с частыми остановками. Если автомобиль останавливается через каждые 400 м при продолжительности остановки 60 сек, то расход горючего возрастает в 2,5 раза по сравнению с номинальным. При сокращении расстояния между остановками до 100 м расход повышается до 3...5-кратного.

Электромобиль обеспечивает, по сравнению с автомобилем, на 80...60% меньшую стоимость энергии, обладая при этом 2...3-кратным сроком службы. Расходы на текущий ремонт составляют всего 25...40% по сравнению с автомобилем, а срок службы шин на 35...50% выше. Годовой пробег в 15 000 км обходится у электромобиля на 30% дешевле, чем у автомобиля; он может быть доведен до 20 000 км, что еще более повысит эффективность электромобильного транспорта.

В настоящее время радиус действия стандартного электромобиля грузоподъемностью 750 кг составляет 90...100 км на одну зарядку. Он может быть доведен до 150 км/сутки путем дополнительной дневной подзарядки аккумуляторной батареи в течение 1...2 ч. На централизованных зарядных станциях возможна быстрая замена разряженных батарей на заряженные.

Электромобиль обладает крупными гигиеническими преимуществами перед автомобилем вследствие полного отсутствия выхлопных газов, содержащих окись углерода.

Появление новых серебряно-никелевых и серебряно-цинковых аккумуляторов обуславливает возможность значительного снижения веса аккумуляторной батареи, а следовательно, и уменьшения веса электромобиля в целом. Серебряно-цинковые аккумуляторы обладают высоким к. п. д., превышающим 80%, и обеспечивают практический запас энергии в 100 Вт·ч/кг. Они обладают в 4 раза меньшим весом и в 7 раз меньшим объемом по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами.

Теоретический предел отдачи электроэнергии серебряно-цинковых аккумуляторов значительно выше практически достигнутых параметров, достигая 300 Вт·ч/кг веса батарей, что в 3...4 раза превышает возможность отдачи

электроэнергии свинцово-кислотными аккумуляторами. Однако стоимость серебряно-цинковых аккумуляторов в 5 раз выше, чем аккумуляторов обычного типа.

На базе серебряно-цинковых аккумуляторов во Франции построены опытные электромобили, которые уже прошли пробег в 100 000 км на машину. Легковой электро-мобиль общим весом в 1 т оборудуется аккумуляторной серебряно-цинковой батареей емкостью 300 ач, которая при рабочем напряжении 84 в весит всего 270 кг. На изготовление такой батареи требуется 50 кг серебра. Однако серебро отработанных батарей может быть повторно использовано для активной массы при изготовлении новых батарей.

Французский опытный электромобиль с серебряно-цинковыми аккумуляторами, оборудованный тяговым двигателем мощностью 6 л. с., обеспечил пробег на одну зарядку в 376 км при скорости в 45 км/ч и 319 км при скорости 60 км/ч.

Аккумуляторы нового типа допускают значительные кратковременные перегрузки, в связи с чем кривая напряжения при их работе почти горизонтальна. Аккумуляторная банка емкостью 100 ач при разрядном токе 100 а обеспечивает напряжение 1,5 в, а при токе 400 а еще сохраняет напряжение 1,35 в. Допускается кратковременное повышение разрядного тока до 1 800 а, т. е. в 18 раз против номинального. Нагрев аккумуляторов при разряде крайне незначителен, что открывает широкие возможности для снижения габаритных размеров аккумуляторных батарей.

Автор обзора полагает, что аккумуляторы нового типа обеспечат возможность интенсивного развития электро-мобильного транспорта и откроют, в частности, пути для создания вполне рентабельных электробусов, предназначенных для массовых городских перевозок.

Появление новых электрических атомных элементов, основанных на радиоактивном распаде, например стронциевых², обладающих сроком службы без какой-либо зарядки, измеряемым десятилетиями, может также сыграть существенную роль в перспективном развитии электро-мобильного транспорта.

Электрогиробусы. Идея создания экипажей с механическим аккумулярованием энергии при помощи маховика принадлежит русскому инженеру-новатору В. И. Шуберскому³, предложившему еще в 1860 г. конструкцию «маховоза». Первые электрогиробусы, пригодные для практических целей, были созданы швейцарской фирмой Эрликон. Они предназначаются для пассажиро-перевозок в городе и базируются на автомеханической части троллейбуса. Два электрогиробуса эксплуатируются в Ивердоне (Швейцария), три — на линии Гент — Мерельбек и 12 шт. изготовлены для Леопольдвилля (Бельгийское Конго).

Гиробус фирмы Эрликон оборудован маховиком, вращающимся в водородной среде, в целях снижения трения. Выбег маховика со скоростью вращения 3 000 об/мин в водородной среде происходит в течение 12 ч, тогда как в воздушной среде только за 4 ч. На конечных станциях маховик разворачивается при помощи электродвигателя трехфазного тока, питаемого от специальных откидных токоприемников, устанавливаемых под мачтами зарядных станций. Время зарядки маховика (с доведением скорости вращения от 2 000 до 2 925 об/мин) составляет всего около двух минут, так как перед началом эксплуатации, в ночное время, маховик предварительно разворачивается при работе двигателя на пониженном напряжении. Таким образом, на конечных станциях производится лишь доводка скорости вращения маховика до 3 000 об/мин.

При следовании гиробуса на линии маховик продолжает вращаться по инерции и приводит в движение пусковой электродвигатель, перешедший на генераторный режим. Главный генератор гиробуса питает специальный строенный электродвигатель, обеспечивающий возможность получения шести различных экономических скоростей путем включения того или иного двигателя, чем достигается изменение скорости движения гиробуса от 10 до 50 км/ч. Мощность каждого работающего тягового двигателя составляет при этом 73,6 кВт.

² Электродвижущая сила стронциевого элемента составляет 0,75 в. Срок службы атомных элементов определяется периодом полураспада, равным 25 годам для стронция-90.

³ См. Электричество, стр. 13, № 5, 1955.

Запасенная кинетическая энергия маховой установки электрогиробуса составляет порядка 9 кат·ч. Суммарный к. п. д. может быть оценен в 50%.

Радиус действия электрогиробуса на одну зарядку, до полного истощения запасенной энергии, составляет 10...15 км. Практически в эксплуатационных условиях реализуется меньший радиус действия в 2,5 км, так как подзарядка производится задолго до полного истощения запасенной энергии. Потребное время подзарядки может быть оценено в 6,5 сек на 1 км пройденного пути при средней скорости электрогиробуса в 22,5 км/ч.

Расход электроэнергии в эксплуатационных условиях составляет 2,2 кат·ч на машино-километр, что соответствует удельному расходу электроэнергии в 132 вт·ч/т км.

Автор обзора отмечает, что гиробусный транспорт, известный в нашей стране по опытным рудничным электровозам, бесспорно заслуживает самого тщательного изучения в целях применения его в области безрельсового пассажирского транспорта.

Проекты и опытные линии скоростного внеуличного безрельсового транспорта. Быстрый рост автомобильного индивидуального пассажирского транспорта создает угрозу движению массового пассажирского транспорта современных городов. Выдвигается ряд проектов с целью упорядочения массовых пассажиро-перевозок в городе.

Предложен проект башенной канатной воздушной электрической городской дороги для Милана, предусматривающий размещение в городе, по многокраннику 13 башен. Между башнями, отстоящими на 650 м одна от другой, имеется в виду проложить 4 канатных линии, по которым могут курсировать пассажирские кабины воздушной канатной дороги, каждая из которых рассчитана на 50 пассажиров. Посадка пассажиров в кабины будет осуществляться путем доставки их на подъемниках на опорные башни с посадочными площадками. Воздушная дорога сможет обеспечить пропускную способность в 16 тыс. пассажиров в 1 ч в обоих направлениях движения.

В Италии и Франции разрабатываются проекты внеуличных самодвижущихся городских дорог, предназначенных для разгрузки уличных магистралей с особо интенсивным движением, достигающим 25...30 тыс. пассажиров в 1 ч. Предусматривается: а) сооружение параллельно уличным магистралям подземных туннелей с пандусами, предназначенными для эксплуатации троллейбусов и автобусов на повышенных скоростях; б) сооружение туннелей небольшого сечения, в которых по замкнутому кольцу должны двигаться электрические пассажирские конвейеры, оборудованные кабинами для перевозки пассажиров; в) сооружение туннелей шириной 3,66 м и высотой 3,06 м с тремя платформами: неподвижной, шириной 1,07 м, с лестничными спусками к ней, рядом с ней второй платформы, движущейся с переменной скоростью по определенному циклу. Параллельно второй транспортной ленте предусматривается третья, шириной 1,37 м, движущаяся с постоянной скоростью 20...24 км/ч, на которой оборудуются сиденья для пассажиров.

К числу действующих пассажирских ленточных конвейеров следует отнести перронный транспортер города Джерси Сити. Конвейер оборудован резиновой лентой шириной 1 650 мм и расположен в одном из перегруженных переходов Эри-Стейшен протяжением около 40 м. Восмиленточные пассажирские транспортеры применяются на улицах, изобилующих подъемами в Чикаго. Их пропускная способность достигает 10 800 пассажиров в 1 ч на одну ленту движения.

Электроснабжение городского электротранспорта. Преимущественное развитие получает децентрализованная система электроснабжения контактной сети троллейбуса в

большинстве случаев совместно с трамваем от равномерно распределенных по сети тяговых подстанций небольшой мощности (300...600 кат) в современном исполнении, с отпаянными одноанодными безнасосными инверторами, с автоматическим дистанционным управлением.

Современный троллейбусный транспорт использует исключительно скользящий токосъем, преимущественно с двухштанговыми токоприемниками, хотя известны конструкции современных одноштанговых токоприемников.

Широкое распространение находят эластичные системы подвески троллейбусной и отчасти трамвайной контактных сетей. Эластичная система подвески контактной сети троллейбуса применяется уже в 47 троллейбусных предприятиях 16 стран мира и в том числе в Швейцарии, Германии, Венгрии, Италии и др.; на трамвае новая система подвески применяется, например, в Цюрихе (Швейцария) и Вене (Австрия)⁴.

В ряде стран, например в Польше, находит применение стале-алюминиевый контактный провод, состоящий из 30% стали и 70% алюминия, обеспечивающий экономию дефицитной меди. В США применяются долговечные медно-кадмиевые провода, удлиняющие срок службы контактной сети до 24 лет против 8 лет для медного контактного провода. В Японии удалось повысить термостойкость троллейбусного контактного провода до 200°С с одновременным повышением электрической проводимости и износостойкости путем добавления 0,12...2% серебра к меди, из которой изготавливается контактный провод.

Троллейбусный транспорт эксплуатируется в настоящее время на постоянном токе 550...600 в. Известны отдельные троллейбусные линии Швейцарии, работающие при напряжении постоянного тока 1 100 в.

В последнее время ставится вопрос об использовании переменного тока для питания троллейбусных контактных сетей (Италия). Предполагается применить систему однофазного тока нормальной частоты при напряжении 6...12 кВ с установкой на троллейбусе выпрямительных агрегатов.

Автор обзора полагает, что с появлением полупроводниковых, например германиевых, выпрямителей, уже применяемых в опытном порядке на подвижном составе пригородных железных дорог Англии для силовых целей, открываются широкие перспективы для развития выпрямительных вариантов подвижного состава троллейбусного транспорта, питаемого от контактной сети переменного тока, что значительно упростит систему электроснабжения.

Во всех странах мира ищутся пути повышения рентабельности и эксплуатационных качеств существующих видов массового пассажирского городского транспорта путем его совершенствования и модернизации на базе внедрения новых видов электрооборудования и автоматизации процессов эксплуатации, ремонта и управления. Применение атомной энергии на городском электротранспорте и, в частности, на троллейбусном транспорте, по аналогии с проектами атомных электровозов США, едва ли сможет иметь место из-за незначительной мощности силового оборудования отдельных транспортных единиц, а главное вследствие крайне громоздких устройств, необходимых для осуществления надежной защиты против радиоактивного излучения. Тем не менее, для городского электротранспорта открываются особо благоприятные перспективы, заключающиеся в использовании дешевой электроэнергии, выработанной центральными атомными электростанциями.

Кандидат техн. наук Ю. М. Галонен

⁴ Ю. М. Г а л о н е н. Износ контактного провода троллейбусной контактной сети. Электричество № 6, 1956.



XXII ПЛЕНАРНАЯ СЕССИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ КОМИССИИ В МОСКВЕ

2—12 июля 1957 г. в Москве состоялась XXII Пленарная сессия Международной электротехнической комиссии.

В работе сессии приняли участие делегации 27 стран мира: Австралии, Австрии, Англии, Бельгии, Венгрии, Германской Демократической Республики, Дании, Египта, Израиля, Индии, Италии, Канады, Нидерландов, Норвегии, Польши, Румынии, Соединенных Штатов Америки, Союза Советских Социалистических Республик, Федеральной Республики Германии, Финляндии, Франции, Чехословакии, Швеции, Швейцарии, Югославии и в качестве наблюдателей делегации: Китайской Народной Республики и Корейской Народно-Демократической Республики. Всего в сессии участвовало 420 делегатов (делегация СССР в составе 84 чел. возглавлялась Д. Г. Чижевским).

Международная электротехническая комиссия (МЭК) была основана в 1906 г. для рассмотрения вопросов стандартизации номенклатуры и норм электрических аппаратов и машин. В настоящее время в ее работе принимают участие 32 страны, работающие в 42 технических комитетах, тематика которых охватывает все области электротехники и радиотехники.

Работа МЭК в настоящее время направлена на координацию и унификацию национальных электротехнических стандартов путем составления рекомендаций, на основе которых страны-участницы разрабатывают национальные электротехнические стандарты. Таким образом создается возможность унификации основных требований в национальных стандартах. Это обеспечивает уменьшение расхождений, которые могли бы нанести вред международным связям.

В 1947 г. Международная электротехническая комиссия была включена в состав Международной организации по стандартизации ИСО в качестве ее электротехнического отделения.

При открытии заседания XXII Пленарной сессии участники сессии по предложению президента МЭК доктора П. Даншита почтили вставанием память одного из старейших деятелей Международной электротехнической комиссии выдающегося советского ученого и электротехника Михаила Андреевича Шателена.

Работа сессии проходила в 17 технических комитетах: Технический комитет № 2 (Вращающиеся машины), председатель Спинкс (Англия), советскую группу комитета возглавлял Л. Г. Мамиконянц. Технический комитет № 9 (Оборудование электротяги), председатель Д'Арбелла (Италия), советскую группу комитета возглавлял И. И. Иванов. Технический комитет СМТ (Международный смешанный комитет по электротяге), председатель А. Е. Алексеев (СССР). Технический комитет № 17 (Включающая и контрольная аппаратура), председатель Г. де Зутен (Нидерланды). Технический комитет № 17А (Включающая и контрольная аппаратура высокого напряжения), председатель Г. де Зутен (Нидерланды), советскую группу комитета возглавлял Г. В. Буткевич. Технический комитет № 17В (Включающая и контрольная аппаратура низкого напряжения), председатель Д. Ламберт (Англия), советскую группу комитета возглавлял Р. С. Кузнецов. Технический комитет № 20 (Электрические кабели), председатель Паландри (Италия), советскую группу комитета возглавлял Д. В. Быков. Технический комитет № 22-1 (Выпрямители), председатель Л. Мортон (США), советскую группу комитета возглавлял Д. Д. Александров. Технический комитет № 22-2 (Полупроводниковые выпрямители), председатель М. Эренспергер (Швейцария), советскую группу комитета возглавлял А. В. Астафьев. Технический комитет № 34 (Лампы и вспомогательная аппаратура), председатель М. Астор (Франция). Технический комитет № 34А (Лампы), председатель М. Астор (Франция), советскую группу комитета возглавлял Д. П. Трошенский. Технический комитет № 34В (Ламповые доколи и патроны), председатель Ф. Хавкинс (Англия), советскую группу комитета возглавлял М. Л. Зозуля. Технический комитет № 34С

(Вспомогательные устройства флуоресцентного освещения), председатель Л. Моррен (Бельгия), советскую группу комитета возглавлял В. М. Скобелев. Технический комитет № 35 (Батарейные элементы), председатель Р. Сандерсон (Англия), советскую группу комитета возглавлял И. И. Коваль. Технический комитет № 36-1 (Изолирующие втулки), председатель М. Сент-Джермен (Франция), советскую группу комитета возглавлял Г. И. Барашенков. Технический комитет № 37 (Разрядники), председатель И. Клифф (Англия), советскую группу комитета возглавлял Л. И. Сиротинский. Технический комитет № 1 (Техническая терминология), председатель Е. Бинер, советскую группу комитета возглавлял Н. К. Сухов.

В технических комитетах были рассмотрены намеченные на обсуждение вопросы. В техническом комитете по вращающимся машинам были приняты таблицы допустимых превышений температур для разных классов изоляции, нормальные расчетные температуры для определения потерь и к. п. д. вращающихся машин и перечень данных для табличек на электрических машинах. По вопросу о неправильности формы волны напряжения машин была создана рабочая группа в составе представителей: Германии, Италии, Франции, Румынии, СССР, Англии и США. Был также установлен состав технического подкомитета «по размерам угольных щеток» с председателем К. Эренспергером (Швейцария) и секретариатом из представителей Германии.

В техническом комитете по оборудованию электротяги подготовлены для редакционной комиссии правила для вспомогательного оборудования и электроприводов моторных вагонов, а также рассмотрены правила для испытания электрического и подвижного состава после изготовления и перед пуском в эксплуатацию, подготовленные Международным железнодорожным союзом.

В техническом комитете по выключающей и контрольной аппаратуре высокого напряжения были обсуждены и приняты следующие рекомендации: координация номинальных напряжений, номинальных разрывных мощностей и номинальных токов высоковольтных выключателей, правила для определения прочности изоляции, правила выбора высоковольтных выключателей, правила для монтажа и обслуживания высоковольтных выключателей в условиях эксплуатации и рекомендации для косвенных методов испытания высоковольтных выключателей. Был рассмотрен в первой редакции стандарт на разъединители высокого напряжения; вместе с поступившими замечаниями проект был передан на дальнейшее редактирование.

В техническом комитете по выключающей и контрольной аппаратуре низкого напряжения были рассмотрены проекты рекомендаций на низковольтную аппаратуру распределительных устройств (автоматы) и аппаратуру управления (контакты), которые после рассмотрения переданы на окончательную редакцию в комиссию, которая соберется 14 октября 1957 г. в Париже. В состав комиссии вошел также представитель СССР.

В техническом комитете по электрическим кабелям были рассмотрены и переданы на дальнейшее рассмотрение национальным комитетам рекомендации для испытаний наслонаполненных кабелей с бумажной изоляцией и металлической оболочкой на напряжении до 275 кВ и арматуры к ним. Была создана рабочая группа по пересмотру проекта для испытания газонаполненных под давлением кабелей и арматуры к ним на напряжении до 275 кВ.

В техническом комитете по выпрямителям были рассмотрены и приняты рекомендации для ртутно-выпрямительных преобразователей. Делегация Советского Союза поддержала предложение индийской делегации, сделанное ею на заседании в Лондоне в 1955 г., о разработке специальных норм для тепловых испытаний выпрямителей для тропических условий.

В техническом комитете по полупроводниковым выпрямителям приняты рекомендации по поликристалличес-

ским выпрямителям и переработанные рекомендации по монокристаллическим выпрямителям для рассылки национальным комитетам и вторичного обсуждения на следующей сессии. Были рассмотрены также климатические условия при испытаниях полупроводников. В рабочую комиссию, созданную для подготовки документов, вошел представитель СССР.

В техническом комитете по лампам и их арматуре были рассмотрены и приняты рекомендации по техническим условиям на лампы накаливания общего применения и люминесцентным лампам, а также кодификация проекционных ламп, нормирование световых характеристик ламп фотовспышек к рекомендациям по автомобильным лампам. Были рассмотрены и приняты для утверждения рекомендации по калибрам для проверки контактирования и безопасности патронов с резьбой Е-27 и Е-40 и системе обозначения цоколей ламп, а также приняты изменения по ранее действующей рекомендации на цоколь Е-10 и Е-40. По вспомогательной аппаратуре для люминесцентного освещения была рассмотрена и принята рекомендация по техническим нормам на балласты для люминесцентных ламп и приняты на дальнейшую разработку рекомендации по требованиям безопасности, предъявляемые к балластам для люминесцентных ламп.

В техническом комитете по первичным элементам и батареям были приняты рекомендации по величинам емкостей для различных типов первичных элементов и батарей, пополнены стандарты по изделиям гальванических элементов окисно-ртутных и марганцевых элементов и приняты рекомендации по их испытаниям. Были рассмотрены также вопросы эксплуатации и испытания батарей в тропических условиях.

В техническом комитете по изолирующим втулкам аппаратов рассмотрены и переданы редакционной комиссии рекомендации для втулок переменного тока напряжением свыше 1 000 в.

Для обсуждения вопросов методики испытаний создана рабочая комиссия, в которую вошел представитель СССР.

В техническом комитете экспертов по разрядникам были рассмотрены вопросы испытания и определения условий для производства стреляющих разрядников напряжением до 110 кВ и подготовлены вопросники для представления рекомендаций по этим вопросам.

В техническом комитете по терминологии был рассмотрен доклад члена-корр. Академии наук СССР Л. Р. Неймана «Терминологические работы в СССР в области теоретической электротехники и предложения Академии наук СССР по международному электротехническому словарю (основные определения)».

На Пленарной сессии были прочитаны лекции: 1) доктора Реджинальда О. Каппа (Англия) памяти Шарля Лемэтра, видного французского ученого, одного из создателей Международной электротехнической комиссии; 2) академика М. П. Костенко об энергетике СССР и ее развитии; 3) члена-корр. Академии наук СССР А. Е. Алексеева о развитии электротехнической промышленности в СССР.

Было установлено, что в дальнейшем все рекомендации и другие документы МЭК будут публиковаться на

трех языках: английском, французском и русском. Рекомендации и правила, принятые XXII сессией, будут изданы и направлены заинтересованным организациям.

За время пребывания в Москве делегаты Пленарной сессии посетили ряд предприятий, научно-исследовательских институтов и выставок: ТЭЦ № 11 Мосэнерго (Сталинская), ТЭЦ № 20 Мосэнерго (Калужская), завод «Москабель», лаборатории Московского государственного университета, лаборатории Московского энергетического института, электрифицированный участок железной дороги Москва — Ожерелье — Павелец, Телевизионный центр, Всесоюзный электротехнический институт имени Ленина, Научно-исследовательский институт постоянного тока в Ленинграде, заводы «Электросила» и «Светлана» в Ленинграде, Днепровскую ГЭС имени Ленина, Запорожский трансформаторный завод и Всесоюзную сельскохозяйственную и промышленную выставки. Большое впечатление на зарубежных гостей произвело посещение в г. Ногинске подстанции 400 кВ передачи Куйбышевская ГЭС — Москва. В интервью для радио президент МЭК доктор П. Даншит сказал: «Эта подстанция оборудована самой новейшей высоковольтной техникой. Она является, безусловно, одной из самых лучших подстанций такого типа в мире. Большой интерес имеет также наше знакомство с системой передачи высоковольтной энергии Куйбышевской гидроэлектростанции по проводам в Москву. Это замечательная система».

Ознакомление с высшими учебными заведениями вызвало со стороны иностранных делегатов одобрение; в том же интервью П. Даншит сказал: «Знакомство с Московским энергетическим институтом, готовящим инженеров-энергетиков разных профилей, было для нас очень полезно. Система подготовки специалистов в Советском Союзе очень хороша и подходит для всех стран».

В Большом Кремлевском дворце состоялся прием в честь делегатов сессии. Министр электростанций А. С. Павленко от имени Совета Министров СССР и Министерства электростанций тепло приветствовал делегатов.

Делегаты со своей стороны выразили удовлетворение как организацией работы сессии в Москве, так и ее результатами, чему во многом способствовало единодушное участие участников сессии при решении всех наиболее важных вопросов развития международной техники.

На приеме, посвященном окончанию сессии, президент МЭК П. Даншит сказал, что в СССР широко проводится электрификация страны. Высоко оценивая работу сессии, президент особо подчеркнул вклад советской делегации и поблагодарил советских энергетиков за сердечное гостеприимство.

XXII Пленарная сессия МЭК сыграла большую роль в дальнейшем укреплении и расширении международного сотрудничества в области науки и техники и содействовала установлению личных контактов ученых и инженеров-электриков СССР и главных стран мира.

XXIII Пленарная сессия МЭК будет проведена в июле 1958 г. в г. Стокгольме.

Инж. К. А. Левицкий
Ученый секретарь Советского
комитета МЭК

ПОПРАВКА

В статье Л. П. Шиниберзэ, в № 10, 1956 г. первую формулу снизу на стр. 42 (правая колонка) следует читать:

$$I_p = 2,03 + 3,12e^{-40t} - 5,20e^{-24t};$$

на стр. 43 в 22-й строке сверху (левая колонка) следует читать $MT_s \lambda_i p^2$.

МЕЖВУЗОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИЧЕСКОМУ И МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

С 9 по 16 мая в Московском энергетическом институте происходила межвузовская конференция по применению физического моделирования в электротехнических задачах и математического моделирования. Конференция была организована научно-техническим советом Министерства высшего образования СССР совместно с Московским отделением Научно-технического общества энергетической промышленности. В конференции приняло участие около 400 представителей вузов, научно-исследовательских институтов, проектных организаций, технических управлений министерств, крупных заводов и ведомств.

Более 70 докладов и сообщений, сделанных на конференции, были посвящены теории моделирования, конкретным электромоделирующим устройствам и полученным при помощи электромоделей результатам исследований. В прениях было заслушано более 250 выступлений.

Вступительное слово на пленарном заседании проф. **А. В. Негушила** и доклады проф. **В. А. Веникова** и доц. **И. М. Тетельбаума** были посвящены важнейшим задачам конференции. **В. А. Веников** (руководитель секции физического моделирования) отметил существенный процесс в теории и особенно в практике физического моделирования, достигнутый за три года, прошедшие после первой конференции по физическому моделированию (Электричество, № 5, 1954). На физических моделях за эти годы было решено много практически важных задач. В ряде электротехнических задач, связанных с обработкой эксперимента, стали широко применяться методы теории подобия. Физические моделирования распространились на разнообразные отрасли (моделирование короны, дуги, заземлителей, магнитогидродинамических и феррорезонансных явлений, гидравлического удара, ртутных вентилей, процессов внутри электрических машин и др.), которые ранее казались недоступными для моделирования. Исследования на физических моделях должны обязательно сочетаться с аналитическими исследованиями и исследованиями на математических моделях, на счетных машинах и с опытами в натуре.

Приводя материалы по зарубежным физическим моделям электрических систем, докладчик отмечает, что в ряде стран сооружаются модели, заимствующие частично опыт советских институтов в этой области.

Вопросы теории подобия и ее приложения к моделированию электромагнитных явлений, магнетомеханических явлений в бегущем магнитном поле были освещены в докладах сотрудников Института физики Академии наук Латвийской ССР к. т. н. **И. М. Кирко** и инж. **Ю. К. Круминя**. В их докладах были рассмотрены задачи о поверхностном эффекте и поперечных силах, возникающих в проводящей среде в бегущем магнитном поле.

Развитие теории подобия и практики физического моделирования применительно к явлениям короны на линиях переменного и постоянного тока, дуги, к процессам в импульсных заземлителях показали в своих докладах к. т. н. **Н. Н. Тиходеев** (НИИПТ), к. т. н. **В. Л. Левитов** (ЭНИН), к. т. н. **А. В. Корсунцев** (НИИПТ) и инж. **А. С. Майкопар** (ЦНИЭЛ).

В докладах сотрудников ВЭИ к. т. н. **А. В. Стукачева**, к. т. н. **В. В. Воскресенского** и инж. **Н. С. Лазарева** были изложены основы теории моделирования и методика рационального выбора масштабов моделей электропередач постоянного тока высокого напряжения и указаны границы возможных отступлений от идеальных критериев подобия.

Теоретическое и экспериментальное решение новой задачи моделирования гидравлического удара в полной физической модели энергосистемы дали действительный член Академии наук Армянской ССР инж. **И. В. Егназаров** и инж. **З. А. Зорян** (ВЭНИ АН Арм. ССР).

О возможности моделирования гидротурбин с разными быстроходностями при помощи одной быстроходной модельной осевой турбины двигателя постоянного тока, снабженного специальными схемами с магнитными усилителями, сообщили инж. **Б. Л. Буниatian** (ВЭНИ АН Арм. ССР) и инж. **В. В. Семенов** (ИЭМ АН СССР).

Глубокое освещение на конференции получили вопросы дальнейшей разработки электрических машин моделей (синхронных генераторов и компенсаторов, силовых трансформаторов, реакторов, трансформаторов тока, компенса-

торов активных сопротивлений и др.). В общем докладе **В. А. Веникова** была поставлена задача моделирования процессов внутри машины и намечены пути применения аффинного подобия для расширения возможностей моделирования. Подробное освещение этих вопросов содержалось в докладе к. т. н. **А. В. Иванова-Смоленского**.

Созданию машин для динамических моделей были посвящены доклады и выступления работников МЭИ, ИЭМ АН СССР, НИИПТ, ЛПИИ акад. м. **П. Костенко** и инж. **Л. А. Суханова**, **А. В. Иванова-Смоленского**, инж. **Г. В. Карпова**, к. т. н. **Т. А. Глебова**, к. т. н. **В. В. Фетисова**, к. т. н. **А. И. Важнова**, к. т. н. **В. С. Раздоники** инж. **В. К. Сиротко**, к. т. н. **В. В. Когена**, инж. **П. И. Ляпченко**, инж. **В. А. Карпова**. В этих докладах впервые указаны пути создания генераторов моделей на повышенной частоте, показана необходимость и возможность создания серии модельных генераторов, разграничены области применения различных машин моделей, показаны способы моделирования сложных систем возбуждения и трансформаторов тока, устанавливаемых на моделях для изучения работы релейных защит и т. д.

В совместном докладе **В. А. Веникова**, **А. В. Иванова-Смоленского**, к. т. н. **И. В. Литкенс**, инж. **Э. Л. Бронштейна** и инж. **Э. Хаджимерян** (МЭИ, ЦНИЭЛ, Арменэнерго) освещены вопросы опытной проверки точности моделирования электрических систем. Опыты были поставлены на длинной линии электропередачи высокого напряжения при установке на ее генераторах регуляторов возмущения сильного действия. Исследования показали хорошее совпадение характера процесса и пределов статической и динамической устойчивости, областей устойчивости и настройки регуляторов в натуре и на модели при правильном соблюдении условия подобия всех элементов.

Описание существующих и вновь сооружаемых динамических моделей (МЭИ, ЦНИЭЛ, ВЭИ, Энергетической лаборатории им. М. А. Шателена, ЭНИН АН СССР) и задач, стоящих перед действующими моделями (МЭИ, ВЭНИ АН Арм. ССР, НИИПТ), содержалось в докладах **В. А. Веникова**, **В. А. Карпова**, **Э. Л. Бронштейна**, к. т. н. **В. В. Худякова**, к. т. н. **С. Р. Глинерника**, инж. **К. Х. Овсепяна** и к. т. н. **Ю. А. Розовского**. Было показано, что развитие моделей электрических систем идет при мощностях генераторов моделей от 5 до 30 квт. Как уменьшение, так и увеличение мощностей не представляется целесообразным. Количество машин в моделях колеблется от 7...8 до нескольких десятков.

Большая группа докладов была посвящена результатам исследований, проведенных на существующих физических моделях (МЭИ, ИЭМ АН СССР, НИИПТ, ВЭИ, ВЭНИ, АН Арм. ССР, Институт физики Латв. ССР, Энергетической лаборатории им. М. А. Шателена). В частности, были освещены результаты работ динамической модели МЭИ по изучению режимов сложных автоматически регулируемых электрических систем явлений резонанса и самовозбуждения, асинхронных режимов, различных способов регулирования частоты и др. (**В. А. Веников**, к. т. н. **А. И. Долгинов**, к. т. н. **Д. А. Федоров**, к. т. н. **О. В. Ледянкин**, инж. **Ю. М. Горский**, к. т. н. **В. Л. Козш**, инж. **И. Йозефус**).

Результатами работ, проведенных на динамической модели ИЭМ АН СССР, направленных на изучение динамики регулирования частоты и исследования релейных защит и системной автоматики, были посвящены доклады инж. **А. А. Первозванского** и к. т. н. **В. И. Иванова**.

Особое место заняло на конференции обсуждение работы, поставленной по исследованиям индукционного нагрева арматуры железобетона в переменном магнитном поле (инж. **Г. К. Гринберг** АН Латв. ССР), где в связи с проведенными исследованиями был сделан ряд предложений по методике расчета и способам уменьшения потерь.

В докладе инж. **Л. Г. Коваленко** (МЭИ) было дано описание измерительных установок, специально разработанных для исследований как на моделях, так и при проведении испытаний в действующих системах.

Заседания секции математического моделирования происходили под председательством доц. **И. М. Тетельбаума**. Круг задач секции математического моделирова-

ния был ограничен электрическими моделями-аналогами, поскольку модели, построенные по типу счетно-решающих устройств (так называемые структурные модели или электронные моделирующие устройства с усилителями) неоднократно за прошедшие несколько лет обсуждались научно-технической общественностью. В области моделирования краевых задач математической физики большое внимание было уделено дальнейшему усовершенствованию методов моделирования в сплошных средах: сообщения к. т. н. В. С. Лукошкова и инж. Л. А. Шерель (НИИ МРТП) об электрических ваннах с токовводящими элементами сообщения к. т. н. В. М. Брейтмана и д. т. н. С. Г. Гутмана (ВНИИ гидротехники) о различных подходах к решению уравнений для двухмерной области на трехмерных моделях. Осуществление конформных отображений при помощи электрического моделирования рассмотрели: к. т. н. Г. Ю. Степанов (ЦИАМ), инж. А. М. Люксембург (НИИ МАП и инж. О. В. Тозони (Новочеркасский политехнический институт). Задачам электрического моделирования тепловых полей с граничными условиями третьего рода было посвящено сообщение к. т. н. М. М. Литвинова (ЦИАМ).

По вопросам точности метода электрической ванны и моделирования бесконечно-протяженной области выступили: инж. К. С. Демирчян (ЛПИ), к. т. н. Ю. М. Шамаев (МЭИ) и инж. В. В. Ниццкий (МЭИ). Последний рассмотрел сочетание электрической ванны с электрической сеткой и рассказал об осуществленных им неискажающих ваннах. По вопросам построения различных типов траектографов для задач электроники выступили: инж. Э. П. Тевелева (НИИ МРТП), инж. И. М. Блейвас (НИИ МРТП), к. т. н. А. А. Жигарев (МИФИ), инж. Г. П. Притковский (МИФИ), инж. Э. Н. Цыганов (МИФИ).

Опытом моделирования на электропроводной бумаге поделились: к. т. н. Ю. В. Благовещенский, к. т. н. В. И. Остапенко, инж. В. И. Панишин, д. т. н. П. Ф. Фильчаков, канд. физ. мат. наук В. Е. Шаманский (Институт математики АН УССР), М. М. Литвинов (ЦИАМ), И. М. Тетельбаум (МЭИ), инж. В. А. Бушманов (ВНИИ гидротехники).

Модели, основанные на приближенном представлении систем с распределенными параметрами при помощи цепочечных схем замещения были рассмотрены в применении к задачам электрического моделирования переходных процессов в нижнем бьефе ГЭС (Н. И. Челноков, И. М. Тетельбаум, к. т. н. В. И. Обрезков) и применительно к исследованиям поверхностного эффекта в ферромагнитном металле (к. т. н. В. Г. Битолс, И. М. Кирко).

О применении реостатных электрических сеток для решения осесимметричных задач теории упругости методом последовательных приближений сообщил инж. И. С. Бобарь (КГУ). О результатах использования для подобных целей реактивных сеток в лаборатории проф. С. В. Лукьянова сообщил к. т. н. М. Д. Головки (НИИ МПС).

Приближенный метод моделирования уравнения Фурье при помощи дискретно задаваемых последовательных интервалов времени был рассмотрен проф. С. Н. Нумеровым (ВНИИ гидротехники).

В области моделирования физических систем основное место заняло обсуждение различных видов электрических моделей стержневых систем и выяснение границ возможного их применения в статических и динамических задачах строительной механики по работам: Таганрогского радиотехнического института проф. Г. Е. Пухов, П. М. Чеголин, О. В. Ильенко), Ростовского инженерно-строительного института (проф. К. Н. Керопян), МГУ (проф. С. П. Стрелков, инж. А. Е. Орланович), МЭИ (И. М. Тетельбаум), ЦНИИ МПС (инж. Р. А. Насыров), и др.

Моделированию автоколебательных систем (флаттер) были посвящены сообщения проф. С. П. Стрелкова, инж. В. И. Смылова, инж. А. А. Харламова (МГУ и ЦАГИ). Авторами было произведено сочетание физической модели крыла самолета с математической моделью аэродинамических воздействий. Об опыте работы нелинейного расчетного стола для моделирования гидравлического режима трубопроводных сетей сообщил к. т. н. Н. М. Зитер (ВТИ). Расчетный стол ВТИ построен из элементов, разработанных проф. Л. Р. Нейманом и к. т. н. В. Ф. Берединой (ЛПИ). Трансформаторная модель для решения системы линейных алгебраических уравнений рассмотрена инж. Я. Я. Даубе (Институт физики АН Латв. ССР).

К области регулирования относились сообщения инж. К. П. Тенилина (МЭИ) о разработке электролитической ванны для исследования электрических цепей и сообщение к. т. н. С. А. Гинзбурга и инж. В. А. Брика (ЦНИЭЛ) о разработанном ими электромеханическом устройстве для исследования характеристических уравнений системы автоматического регулирования.

В своих решениях конференция единодушно отметила большое значение методов физического и математического моделирования, полезных во всех областях техники, и подчеркнула, что правильным является объединенный подход к изучению явлений, при котором как равноправные слагающие должны использоваться результаты опыта и исследования на математических моделях.

Конференция отметила целесообразность представления результатов исследований в относительных, безразмерных единицах и важность нахождения критерияльных зависимостей, устанавливающих подобие моделей и натур. Отмечена необходимость более широкого производства материалов и элементов, необходимых для выполнения моделирующих устройств (усилителей проводящей бумаги, проводящих красок, реостатов и т. п.).

*Кандидат техн. наук И. В. Литкенс
и кандидат техн. наук, доц, И. М. Тетельбаум
Москва*



Библиография

М. В. МЕЕРОВ. ВВЕДЕНИЕ В ДИНАМИКУ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, стр. 418, ц. 22 руб. Академиздат, 1956

Литература, обобщающая результаты применения общей теории автоматического регулирования к задачам регулирования электрических машин очень ограничена. Между тем при их эксплуатации ставятся серьезные задачи по автоматическому регулированию. Книга М. В. Меерова посвящена теории переходных процессов в электрических машинах, описанию типовых элементов, применяющихся в схемах систем регулирования генераторов и двигателей, а также изложению общей теории автоматического регулирования. Применение методов этой теории широко иллюстрируется примерами регулирования электрических машин и следящих систем.

Монография состоит из введения и семнадцати глав. В главе I выводятся уравнения электрических машин. В главе II описываются типовые элементы их систем регулирования. В главе III излагаются основы теории преобразований Фурье и Лапласа. Вся остальная часть книги по существу относится к общей теории регулирования. В главах IV—XII излагается теория обыкновенных линейных систем непрерывного действия. Глава XIII посвящена теории импульсных систем. В последних четырех главах содержится изложение методов и задач нелинейной теории регулирования. Особое внимание автора обращено на решение проблем качества систем регулирования

и синтеза систем, обладающих сколь угодно малой установившейся ошибкой. Здесь подробно излагаются результаты его соотнесенных исследований.

В настоящей рецензии рассматриваются главным образом научные результаты автора и все разделы, относящиеся к задачам регулирования электрических машин.

В кратком введении сформулированы основные принципы построения систем автоматического регулирования и указаны их характерные особенности. Справедливо подчеркивается вспомогательная роль принципа регулирования по нагрузке, который, как правило, не может иметь самостоятельного значения, но служит часто существенным фактором повышения качества систем, построенных по принципу отклонения. Здесь же приводится небольшая очерк развития теории автоматического регулирования. Изложение этого очерка вызывает некоторые возражения. Он далеко не полон, излишне перегружен множеством имен, роль которых в разработке теории и техники регулирования в книге не раскрыта.

Первая глава посвящена рассмотрению свойств электрических машин как объектов регулирования. Выведены уравнения динамики для генератора постоянного тока, синхронного генератора и двигателей постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением. Рассмотрены физические процессы в генераторах при внезапном изменении сопротивления нагрузки в цепи якоря. Приведены формулы, определяющие скачки тока возбуждения и напряжения на зажимах генераторов. Подробный анализ процессов в синхронном генераторе выполнен на основе применения преобразования Лоренца — Парка. При этом автором уточнено выражение для постоянной времени статорных цепей машины с учетом параметров цепей нагрузки.

Полученные уравнения электрических машин используются в последующих разделах книги при исследовании соответствующих систем регулирования.

Пробелом в изложении являются отсутствие указаний по определению постоянных времени на основании опытных и паспортных данных машины. Дело в том, что конструктивные параметры, от которых зависят постоянные времени и коэффициенты усиления, как правило, не известны эксплуатационному персоналу и специалистам в области автоматического регулирования, так как им приходится иметь дело с уже готовой машиной.

Можно было бы также высказать упрек автору в том, что он не привел вывод уравнений асинхронных двигателей. В маломощных следящих системах часто применяются двухфазные двигатели этого типа. Небольшие трехфазные двигатели с магнитным управлением используются в качестве исполнительных механизмов регуляторов технологических процессов. Математическое описание их динамических свойств необходимо для расчета указанных систем.

Во второй главе дается описание и выводятся уравнения измерительных элементов и усилителей, типичных для систем регулирования электрических машин. Наиболее подробно рассмотрены свойства электромашиного усилителя и соленоид, применяющийся в качестве чувствительного элемента некоторых типов регуляторов напряжения. Уравнения соленоида с противодействующей пружиной выведены для случаев статической и астатической настроек измерительного элемента.

При объяснении способа получения астатической настройки указанного элемента автор допускает некоторую неточность. Он полагает, что тяговое усилие соленоида при постоянном напряжении не зависит от положения его якоря в катушке. Между тем тяговая характеристика электромагнита в пределах рабочего хода якоря является линейной функцией его перемещения. Изменением начального положения якоря производится изменение наклона указанной характеристики. При этом астатическая настройка достигается в момент, когда наклон тяговой характеристики соленоида и силовой характеристики противодействующей пружины совпадают.

Уравнения электромашиного усилителя выведены в предположении линейности характеристик холостого хода обоих его каскадов для случаев полной и частичной компенсации реакции якоря. Здесь же приведены справочные данные, касающиеся серии отечественных усилителей мощностью до 5 квт. К сожалению, в таблице не

указаны постоянные времени короткозамкнутых цепей усилителей, которые в основном определяют инерционные свойства этих машин.

Небольшая по объему глава III посвящена изложению основных свойств преобразования Фурье и в особенности преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа применено для вывода операторных уравнений переходного режима синхронного генератора.

В главе VII приводится предложенный автором метод определения качества систем регулирования при помощи кривой Д-разбиения по одному любому параметру. Этот метод позволяет весьма просто построить действительную частотную характеристику, которая обычно используется для построения кривых переходного процесса. Здесь указываются также косвенные оценки качества системы, определяемые непосредственно из свойств кривой Д-разбиения.

Важные результаты автора содержатся в главе IX, которая посвящена анализу влияния малых параметров. Подробно исследован вопрос о влиянии параметров, повышающих порядок дифференциального уравнения системы. Показано, что параметр, повышающий порядок этого уравнения более чем на две единицы, всегда делает систему неустойчивой. Здесь же дана количественная оценка влияния малых параметров на устойчивость и дано обоснование возможности расчета переходного процесса по вырожденному уравнению системы, которое получается в случае пренебрежения малым параметром. Значительный интерес к этим выводам определяется тем фактом, что почти в любой системе имеются малые параметры и практически часто встает задача о законности пренебрежения ими.

В главе XI автором исследованы структурные схемы систем регулирования, допускающие безграничное увеличение коэффициента усиления. Такие системы, естественно, обладают весьма малой установившейся ошибкой и приближаются по своим свойствам к астатическим системам. Характерной особенностью этих систем является применение гибкой обратной связи, охватывающей часть звеньев. Здесь установлены правила включения обратной связи указанного типа, одинаково пригодных как для систем с сосредоточенными параметрами, так и для систем с запаздыванием. Изложение теоретических выводов подробно иллюстрировано численными примерами.

В этой же главе исследовано влияние на коэффициент усиления первой производной, введенной в закон регулирования. Для этого использованы свойства кривой Д-разбиения по одному параметру.

Глава XII посвящена примерам расчета систем регулирования по заданным статической и динамической точностям. В первых параграфах рассматриваются два варианта систем регулирования скорости вращения двигателей. Особый интерес представляет параграф, посвященный исследованию статической устойчивости энергосистемы при регулировании скорости, частоты и напряжения. Здесь рассмотрена весьма актуальная для практики система, состоящая из двух сравнимых по мощности электрических станций, связанных линией передачи. Процессы в системе исследованы при действии на нее скачкообразных возмущений в виде изменения проводимости внешней нагрузки генераторов и изменения момента сопротивления на одном из эквивалентных генераторов. Автор пришел к выводу, что увеличение коэффициента усиления в системе регулирования напряжения уменьшает ее влияние на систему регулирования частоты даже при одинаковой по существу инерционности обеих систем.

Этот вывод вносит новую идею в теорию регулирования систем с взаимосвязанными регулируемыми величинами. Развязка этих систем оказывается возможной не только путем наложения дополнительных внешних связей, как этого требуют условия автономности И. Н. Вознесенского. Она может быть практически осуществлена простым увеличением коэффициентов усиления каждой из взаимосвязанных систем.

В главе XIII излагается теория систем регулирования прерывистого действия, основанная на применении дискретного преобразования Лапласа. Материал охватывает вопросы устойчивости, качества и построения переходных процессов в системах этого типа. Автор использовал методы теории для исследования процессов в системе с известным регулятором напряжения типа СН-91. Анализ этой

системы доведен до численного расчета, в результате которого показана необходимость введения гибкой обратной связи для достижения устойчивости и высокой динамической точности регулирования. При найденном значении постоянной времени обратной связи построен переходный процесс в системе регулирования.

В главах, посвященных нелинейным задачам теории регулирования, приведена классификация типичных нелинейностей и изложены основные методы исследования нелинейных систем: метод фазовой плоскости и теория точечных преобразований, которые применимы главным образом для систем до третьего порядка, а также метод, основанный на принципе гармонического баланса, применимый для расчета систем любого порядка. Подробно приводятся результаты работы А. А. Андропова, Н. И. Баутина и Г. С. Горелика, в которой была решена задача И. А. Вышнеградского об устойчивости системы регулирования машины при наличии сухого трения.

Недостатком книги является относительно большой объем материала по общей теории регулирования, который непосредственно не связан с задачами регулирования электрических машин. Желательно более подробно изложить принципы регулирования именно этих объектов, провести анализ типичных конструкций автоматических регуляторов, указать пути развития техники в этой области регулирования, дать необходимый справочный материал о динамических свойствах электрических машин. Анализ схем регулирования электрических систем должен иметь самостоятельное значение, а не только как пример применения общих методов теории.

Наименование некоторых глав не полностью соответствует содержащемуся в них материалу. Так, глава XIV посвящена только классификации типичных нелинейностей, а называется — «Нелинейные системы регулирования».

Глава V именуется — «Проблема устойчивости систем автоматического регулирования электрических машин»; глава VII — «Качество систем автоматического регулирования электрических машин». Но обе эти главы не имеют специфического значения для техники регулирования электрических машин. Поэтому из наименования этих глав следует исключить упоминание об электрических машинах.

Несмотря на отмеченные недостатки, монография М. В. Меерова имеет ряд достоинств, делающих ее ценным пособием для инженеров и учащихся. Положительной особенностью книги является рассмотрение многих примеров, иллюстрирующих технику применения теоретических методов. Примеры, взятые из области регулирования электрических машин, доходчивы для инженера-электрика. В монографии содержатся также решения некоторых сложных задач регулирования электрических машин, интересных не только в качестве примера применения общей теории, но и имеющие самостоятельное значение.

Книга встретила положительную оценку среди учащихся; она будет полезна также инженерам-электрикам как пособие для изучения теории применительно к практике регулирования электрических машин.

Рецензия обсуждена и одобрена на кафедрах автоматического контроля и регулирования и электрификации промпредприятий Всесоюзного заочного энергетического института.

Доктор техн. наук, проф. Я. З. Цыпкин
Кафедра автоматического контроля
и регулирования ВЭИ

Кандидат техн. наук, доц. И. И. Петров
Кафедра электрификации промпредприятий ВЭИ

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. Переводы статей под ред. Е. Г. Дудникова и В. М. Рушинского. Вып. I. Общие вопросы автоматизации. 32 стр., ц. 2 руб. Госэнергоиздат.

Айвазян В. Г. ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. Основные положения. 77 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Андрянов К. А., Эпштейн Л. А. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛЮДИНИТА. 94 стр., ц. 3 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.

Атабеков Г. И. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ. 344 стр., ц. 19 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

Гейлер Л. Б., Дозоров Н. И. АНГЛО-РУССКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ. 2-е изд. испр. и доп. 711 стр., ц. 23 руб. 95 коп. Гостехиздат.

Гуревич И. Г., Симкин М. М. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ТРИОД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ. Под ред. Г. И. Атабекова, 220 стр., ц. 9 руб. Академиздат БССР.

Донской А. В., Рамм Г. С., Вигдорович Ю. Б. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ЛАМПОВЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ. 307 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Карандеев К. Б. ГАЛЬВАНОМЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. Теория и применение. 170 стр., ц. 5 руб. 15 коп. Изд. Львовского университета.

Лебедев М. Е. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ. 394 стр., ц. 10 руб. 15 коп. Коммухозиздат.

Радовский М. И. ИЗОБРЕТАТЕЛЬ РАДИО — АЛЕКСАНДР ПОПОВ (1859—1906). 130 стр., ц. 7 руб. На англ. яз. Изд. иностр. литературы.

Ракушев Н. Ф. СВЕРХДАЛЬНЯЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ ПО РАЗОМКНУТЫМ ЛИНИЯМ. Основы теории и электр. расчета. 160 стр., ц. 5 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

Сморчков А. Д. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ. 61 стр., ц. 2 руб. 50 коп. ОРГЭС. Госэнергоиздат.

Стекольников И. С., Борисов В. Н., Смирнов И. Г. ГРОЗОЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ. 87 стр., ц. 2 руб. 10 коп. Коммухозиздат.

Сторм Г. Ф. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ. Пер. с англ. О. М. Авена и др. под ред. Б. С. Сотскова. 568 стр., ц. 24 руб. 20 коп. Изд. ин. лит.

Стюарт Мак Лайн. ЛЕКЦИИ ПО ТЕХНИКЕ РЕАКТОРОСТРОЕНИЯ. Пер. с англ. под ред. и с вступит. статьей А. А. Канаява. 212 стр., ц. 17 руб. 90 коп. Судпромгиз.

Цейров Е. М. ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. 312 стр., ц. 16 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

Чистяков Н. И. ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ. 64 стр., ц. 1 руб. 40 коп. Трудрезервиздат.

Шаломов М. И. ОПЫТ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИКОВ ЗАВОДА «ТАШСЕЛЬМАШ». 42 стр., ц. 1 руб. 45 коп. Госиздат УзССР.

Шкурин Г. П. СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ И РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРАМ. Изд. 2-е, переработ. и доп. 912 стр., ц. 19 руб. 15 коп. Воениздат.

Шац Е. Л. ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. 496 стр., 7 руб. 55 коп. Сельхозгиз.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Сборник статей. Труды ВЭИ, вып. 7. 326 стр., ц. 13 руб. Госэнергоиздат.

Яковлев С. М. УСТРОЙСТВО ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ. 11 стр., ц. 3 руб. Академиздат.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андриянов, Н. И. Борисенко, Г. В. Бутнавич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дюзов (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 почтамт, почтовый ящик № 648.

Сдано в пр-во 17/VI 1957 г.

T-06797

Бумага 60×92¹/₂

Объем 12 п. л.

Уч.-изд. л. 16,5

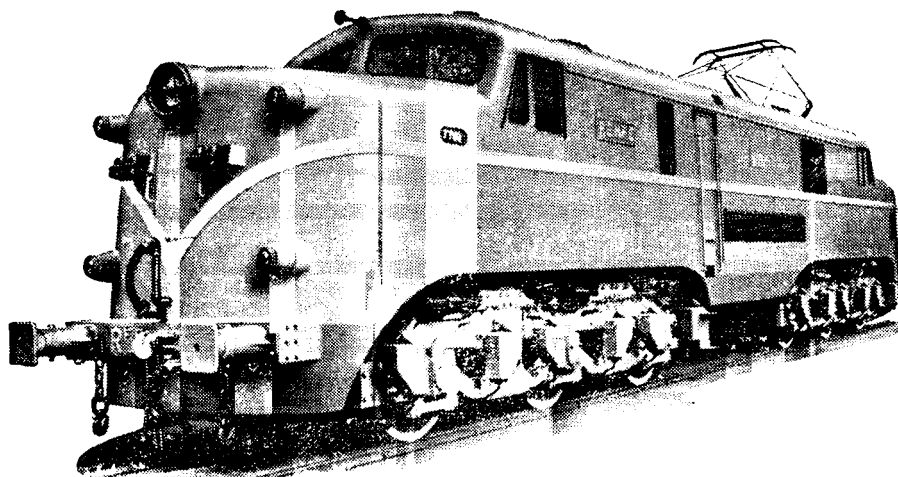
Подписано к печати 17/VIII 1957 г.

Тираж 17 880 экз.

Заказ 336

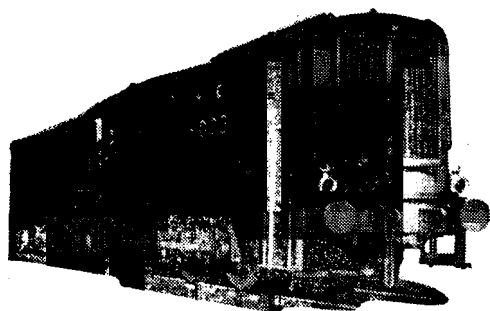
Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлязовая наб., 10.

Наши Достижения по Электротяге



Один из шестидесяти-электровозов «Инглиш Электрик» 3600 э.с., 3000 вольт пост. тока для пассажирского и грузового транспорта в Кантабрианских Горах, которые являются одними из наиболее трудных участков Государственных Испанских железных дорог. Вес электровоза 118 тонн, тяговое усилие 29937 кг., максимальная скорость до 109 км — час. Электровоз имеет трехосные тележки с электродвигателями на всех осях, оборудован для сочленения с другими электровозами и регенеративным торможением.

Фирма «Инглиш Электрик» до настоящего времени поставила тяговое оборудование для 77 железных дорог в 30 различных странах мира. Среди английских производителей электровозов и тепловозов фирма «Инглиш Электрик» является единственной, которая может полностью проектировать и производить на своих заводах комплекты локомотивов, автомотриссы, включая поставку оборудования для силовых станций и подстанций.



Стандартный дизель-электрический маневровый тепловоз спроектированный в 1933 г. В настоящее время на различных железных дорогах мира имеется в эксплуатации более 700 таких тепловозов, либо полностью изготовленных фирмой, либо с силовым оборудованием фирмы «Инглиш Электрик».

В течение более 70 лет фирма «Инглиш Электрик» занимает одно из ведущих мест в вопросах электрификации железнодорожного транспорта. Результатом долголетней работы в этой области является : первая железная дорога, питаемая от гидростанции ; первый метрополитен с электроприводом ; первое применение постоянного тока высокого напряжения (3600 в) для тяги и многое другое, включая исследовательскую работу по применению переменного тока для электрификации железных дорог.

Электротяга

'ENGLISH ELECTRIC'

THE ENGLISH ELECTRIC COMPANY LIMITED, QUEENS HOUSE, KINGSWAY, LONDON, W.C.2 АНГЛИЯ

Заводы : В Стаффорде, Престоне, Рагби, Брадфорде, Ливерпуле, Аккрингтоне.

Цена 8 руб.

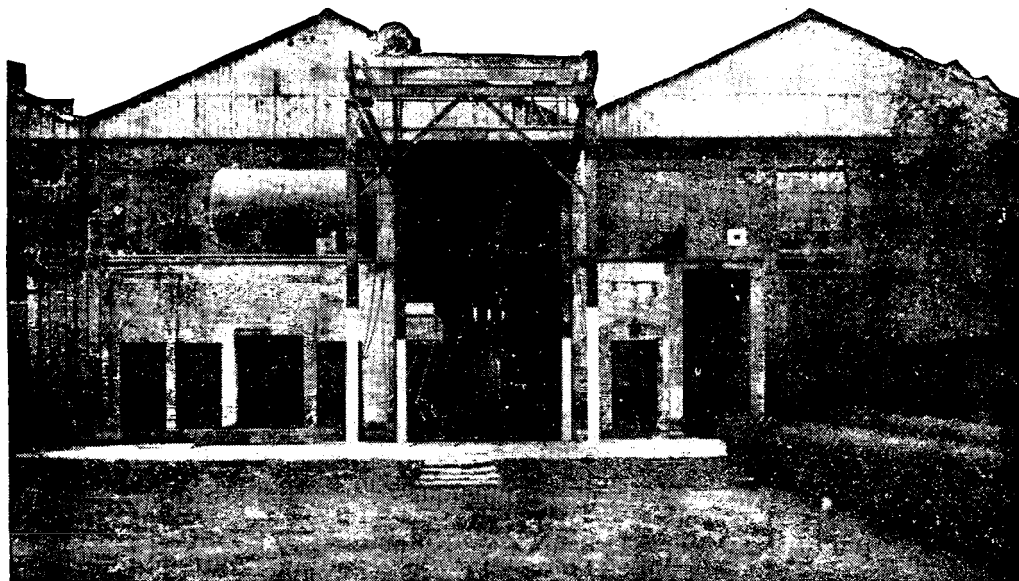
ИСПЫТАНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Испытательная Станция Разрывной Способности выключателей завода «Crompton Parkinson Ltd.» является одной из самых усовершенствованных во всей Европе.

Она служит как для испытаний новых типов выключателей в стадии их развития, так и для окончательных приемных испытаний в условиях, более строгих, чем встречающиеся при самой эксплуатации. На основании этих испытаний, Общество Испытательных Станций Разрывной Способности («A.S.T.A.») выдает свидетельство о мощности испытанного оборудования. Завод «Crompton Parkinson Ltd.» является членом Общества «A.S.T.A.»

Вы можете с полным доверием обращаться к «Crompton Parkinson Ltd.» со всеми вопросами, касающимися коммутационной аппаратуры. Он изготовляет обширный выбор аппаратуры, и его инженеры обладают большим, широко приобретенным, опытом.

Главный генератор и перевозбудитель, установленные на Испытательной Станции Разрывной Способности завода Crompton Parkinson Ltd, расположенной рядом с фабрикой коммутационной аппаратуры.



Crompton Parkinson

LIMITED

Хорошее имя в коммутационной аппаратуре



CROMPTON PARKINSON LTD. OVERSEAS DIVISION, CROMPTON HOUSE, ALDWYCH, LONDON, W.C.2, АНГЛИЯ.

www.booksite.ru

Телеграммы: CROMPARK LONDON