

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1951



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

10

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

10
1951
ОКТАБРЬ

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

СОДЕРЖАНИЕ

В. И. Попков — Каскадный генератор с высокочастотным питанием накала кенотронов	3
И. С. Бессмертный — Методика проектирования и расчетные показатели коммунальных электросетей	6
Г. С. Солодовников — Защитная арматура высоковольтных линий электропередачи	15
А. Я. Усиков, И. Х. Ваксер — Импульсный метод определения повреждений в кабелях	20
В. А. Смирнов — Опытное определение параметров синхронных машин по кривым затухания	24
В. В. Енько — Аналитическое выражение нормальной характеристики холостого хода	28
В. И. Серебриер — Двигатель постоянного тока с разрезными полюсами	30
К. В. Урнов — Некоторые вопросы динамики электропривода	35
Н. Н. Дружинин, А. Е. Гуревич — Электропривод скоростных непрерывных станов холодной прокатки	40
Г. В. Дершварц, М. Я. Смелянский — Электродинамическое моделирование электротермических устройств	47
П. А. Ионкин — Схема замещения и круговая диаграмма активного четырехполюсника	51
Г. К. Нечаев — Температурная компенсация элементов электрических цепей	55
И. Н. Кротков — Расчет наибольшей чувствительности электрических измерительных цепей	59
И. Б. Негневицкий — Кривые одновременного намагничивания постоянным и переменным полями магнитного усилителя с обратной связью	66
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
М. Н. Осокин — О методах нормирования расхода электроэнергии на обработку металлов резанием	73
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Восьмой Всероссийский электротехнический съезд. К 30-летию обращения В. И. Ленина к 8-му съезду	75
П. Н. Листов — Испытания электропуга в 1921 г. К 30-летию посещения В. И. Лениным учебно — опытного хозяйства МВЗИ	79
ДИСКУССИИ	
К статье Б. А. Ягунова „Об основных принципах стандартизации графических условных обозначений в электрических схемах“—А. А. Юматов, Л. Г. Рашковский	81
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
О коэффициентах несимметрии	82
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Советский электробур. Электронный измеритель влажности бумаги и целлюлозы. Применение бактерицидного действия ультрафиолетового излучения для обеззараживания питьевой воды. Электростанции, работающие на вулканическом паре. Ветроэнергетика за рубежом. Прибор для измерения напряженности электрического поля. Термозлемент как преобразователь энергии. Ионно-электронная техника промышленного электропривода. Электрогидравлические домкраты	83
ХРОНИКА	
В комиссии по истории физико-математических наук. Совещание по использованию ветроэнергии	90
БИБЛИОГРАФИЯ	
В. Ю. Ломоносов — Книга Л. Р. Неймана „Руководство к лаборатории электромагнитного поля“	92
М. Е. Крестьянов — „Энергоснабжение электрифицированных железных дорог“	92
В. Г. Аветиков — Книга Н. В. Никулина „Производство фарфоровых изоляторов“	95
Новые книги по электричеству и электротехнике	96



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.

Адрес для телеграмм: Москва **Электричество**

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,
почтовый ящик № 648

Каскадный генератор с высокочастотным питанием накала кенотронов

Доктор техн. наук В. И. ПОПКОВ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Испытания на высоких постоянных напряжениях внедряются в практику высоковольтных лабораторий. Весьма удобным источником напряжения для этих целей оказываются

каскадные конденсаторно-кенотронные установки с многократным умножением напряжения, которые нетрудно собрать из деталей промышленного выпуска. Схемы таких установок достаточно известны; одна из них, с некоторыми дополнительными устройствами, показана на рис. 1. Из-за трудностей, однако, возникают в отношении питания накала выпрямителей (K_1, K'_1, K'_2, K_2 и т.д., рис. 1). В каскадных схемах потенциалы этих выпрямителей относительно земли возрастают от каскада к каскаду, достигая нескольких сотен или даже тысяч киловольт. Питание накала особенно усложняется при применении кенотронов, требующих для накала достаточно значительной мощности (80...100 вт на вентиль), в 10 раз большей, чем газотроны (8—10 вт на вентиль). Поэтому некоторые схемы и способы накала (в частности, накал от аккумуляторов или электрических машин малой мощности, приводимых во вращение с помощью изолирующих устройств), находящие удачное применение при газотронах, оказываются практически малоприменимыми при кенотронах.

В литературе описывались установки, где применяется питание нитей накала через систему каскадно-включенных изолирующих трансформаторов. Такая схема позволяет передать любую необходимую мощность, но при этом узел питания вентиля по сложности, стоимости и габаритам становится соизмеримым со всей остальной установкой.

Весьма изящное решение задачи дает применение высокой частоты. На схеме рис. 1 можно видеть, что, переключив цепи рабочих конденсаторов $C_1—C_4$ и $C'_1—C'_4$, с помощью шунтирующего конденсатора C_6 мы получаем цепочку последовательно соединенных емкостей, по которой при применении достаточно высокой

частоты легко передать с уровня низкого потенциала на уровень с любым потенциалом энергию, необходимую для цепей накала. Высокочастотные трансформаторы накала T_n вклю-

чаются при этом последовательно с рабочими конденсаторами (рис. 1). Силовой трансформатор T_1 , дающий выпрямляемое напряжение 50 гц, и источник высокой частоты ГВЧ работают параллельно на общую зарядную шину ЗШ; T_1 подключается через запорный дроссель D_1 , рассчитанный на практическое запираение тока высокой частоты; ГВЧ — через малую емкость C_5 , рассчитанную на запираение тока 50 гц. Для уменьшения падения напряжения для тока высокой частоты в малых емкостях C_5 и C_6 последовательно с ними подключаются индуктивности L_5, L_6 , настроенные в резонанс с C_5 и C_6 на частоту f_n цепи накала.

В литературе имеются указания о применении высокой частоты, однако лишь при газотронах и малой мощности всего устройства. Представляется небезынтересным описать здесь положи-

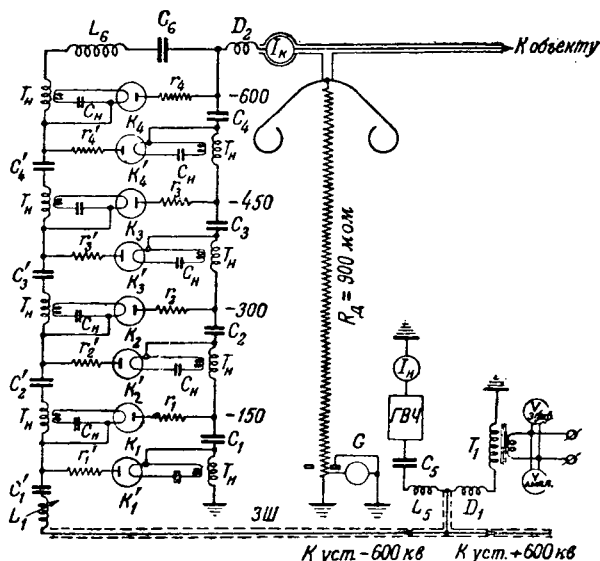


Рис. 1.

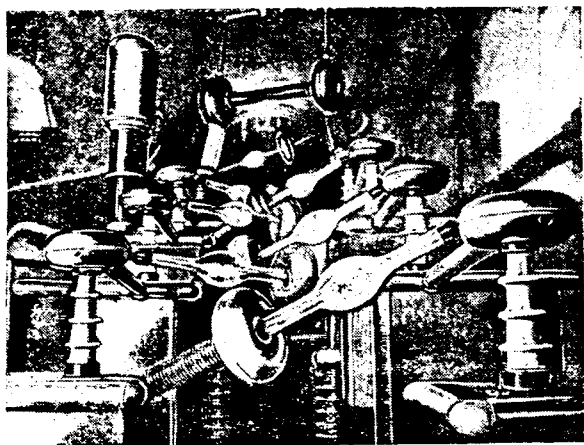


Рис. 2.

тельный опыт применения высокой частоты для питания накала выпрямителей в установках с кенотронами союзного производства (типа КР-220) при большом числе (до 16) одновременно накаливаемых вентилях.

Высоковольтная установка¹. Высокочастотный накал кенотронов применялся в мощных конденсаторно-кенотронных установках, собранных из бумажно-масляных конденсаторов² емкостью около 0,65 мкф в банке. Установки питались от сети или от двигатель-генератора с частотой 50 гц. Вначале были сооружены две трехкаскадные установки с напряжением ± 450 кв относительно земли и 900 кв между полюсами, в которых одновременно работало 12 кенотронов КР-220. Через несколько месяцев эксплуатации установки были перестроены на четырехкаскадные с соответственным напряжением ± 600 кв относительно земли и 1200 кв между полюсами с 16 кенотронами. По этой установке также имеется более чем годичный опыт работы.

На рис. 2 можно видеть общий вид части одной из установок. В обоих аппаратах кенотроны КР-220 имели анодное сопротивление величиной от 50 ком в нижних ступенях до 100 ком в верхних. Конструктивные особенности этих сопротивлений, снабженных экранами диаметром 24 см в месте сочленения с кенотроном, видны на рис. 2. На бакелитовом цилиндре диаметром 100 мм намотан хлопчатобумажный шнур, поверх которого плотно намотано сопротивление изолированным проводом ПШДК 0,07. Намотка ведется на токарном станке. Сопротивление имеет около 2 ком/м.

Параметры высокочастотной цепи. При выборе частоты и значения тока в первичных обмотках трансформаторов накала T_n приходится учитывать ряд обстоятельств. С одной стороны, увеличение частоты в разумных пределах позво-

ляет достичь существенного упрощения конструкции ряда основных деталей: трансформатора накала, конденсаторов C_5 и C_6 , запорных дселей D_1 и D_2 , колебательного контура генератора ГВЧ и др. С другой стороны, увеличение частоты приносит ряд отрицательных моментов. Частота $f_n \geq 150$ кгц лежит уже в радиовещательном диапазоне. Во избежание радиопомех приходится принимать меры по экранированию как установки, так и помещения. С частотой резко увеличиваются потери на излучение, что приводит к необходимости иметь завышенную мощность генератора ГВЧ. Наконец, с повышением частоты начинают все более сказываться влияние паразитных емкостей деталей установки относительно земли. В частности, это приводит к различию токов протекающих в последовательно соединенных трансформаторах T_n , и необходимости индивидуальной настройки каждого из них.

В описываемой установке была применена довольно высокая, почти предельная для этих целей частота $f_n = 396$ кгц.

Значительное увеличение тока i_n невыгодно повышает потери мощности в обмотках и конденсаторах и может повести к неприятному нагреву изоляции конденсаторов при плохом проветривании. Чрезмерное занижение i_n связано с повышением напряжения, осложняющим delicate задачу изоляции цепей высокой частоты. Приемлемые значения i_n лежат в пределах 0,5...1 а.

Трансформаторы накала. Как видно из схемы на рис. 1, наличие емкости C_n во вторичной обмотке каждого трансформатора позволяет настроить его цепь на минимум падения напряжения в первичной обмотке T_n . Настройка осуществляется при подключенной нити накала кенотрона.

При этом имеет место следующее соотношение для индуктивностей обмоток трансформатора:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{(\omega M)^2}{r_2^2 + X_2^2},$$

$$X_1 = \omega L_1, \quad X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2},$$

а коэффициент трансформации тока

$$m = \frac{i_2}{i_1} = \sqrt{\frac{X_1}{X_2}}.$$

Подставляя в (1) известные формулы для индуктивностей L_1 и L_2 и взаимной индуктивности катушек M , легко получить расчетную формулу позволяющую найти размеры катушек и число витков. Например, для однослойных цилиндрических первичной и вторичной обмоток будет иметь место соотношение:

$$\frac{r_2^2 + X_2^2}{X_2} = \frac{\omega^4 D_2^2 \cdot 10^{-8}}{D_1^2} \cdot \frac{l_1}{(l_1^2 + D_1^2) k},$$

где D , l , ω — соответственно, диаметр, длина намотки и число витков первичной или вторичной катушки;

k — известный из справочников коэффициент в формуле индуктивности

¹ В разработке конструкции и в сооружении установки большое участие принимали инженеры М. А. Пескин и С. П. Владимиров.

² Производства Ленинградского политехнического института им. Калинина.

Следует подчеркнуть, что параметры нити накала кенотрона при высокой частоте отличны от каталожных данных, измеренных при 50 гц, что объясняется увеличением сопротивления нити вследствие поверхностного эффекта и влиянием индуктивности нити. Например, при нормальном накале на частоте $f_n = 396 \text{ кгц}$ напряжение на нити кенотрона КР-220 почти вдвое превосходило номинальное. По этой причине, а также ввиду приближенности формул для L и M , расчет дает лишь ориентировочные данные, которые приходится уточнять опытным путем. Следует, впрочем, отметить, что проведенные испытания ряда конструкций трансформаторов, рассчитанных по (3), при учете действительных параметров нити показало хорошее согласие расчета и опыта.

На фотоснимке рис. 3 показаны детали трансформаторов, примененных в описываемых установках. Их основные размеры (мм) приведены в таблице.

	Марка и диаметр провода	w	D	l
Первичная обмотка . . .	ПЭЛБО, 1,2	125	60	155
Вторичная обмотка . . .	ПБО, 4,0	12	55	50

Первичная обмотка намотана на бакелитовый цилиндр, вторичная — бескаркасная, вставлена в центр бакелитового цилиндра.

Ниже приведены данные испытания трансформатора, показывающие влияние емкости C_n на ток и напряжение в первичной цепи при неизменном и нормальном накале кенотрона:

$C_n, \text{мкф}$	0,0296	0,036	0,0416
$i_{1n}, \text{а}$	0,4	0,57	0,68
$U_{T1}, \text{в}$	370	210	220

В описываемой установке большинство трансформаторов работало с оптимальной емкостью $= 0,036 \text{ мкф}$. Ток в первичной цепи накала — около 0,5а.

Возможность перемещения вторичной обмотки относительно первичной, позволяющая регулировать коэффициент трансформации, является важной особенностью трансформаторов T_n . Ввиду упомянутого уже влияния паразитных емкостей на работу высоковольтной установки токи i_n в цепи последовательно соединенных трансформаторов и соответственно накалы кенотронов оказываются неодинаковыми. Это различие можно выравнять соответственным изменением коэффициента трансформации m , например, установкой более низкого коэффициента на первых ступенях питания трансформаторах. В некоторых случаях для более значительного изменения приходится изменять x_2 путем измене-

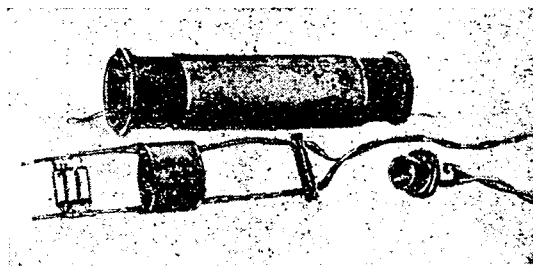


Рис. 3.

Весьма скромные геометрические размеры трансформаторов позволяют располагать их внутри конструктивных деталей установки, в частности внутри экранов, на корпусах конденсаторов C_1, C_1' и т. д. или внутри соединительных шин между конденсаторами.

Конденсаторы C_5 и C_6 являются весьма ответственными деталями установки. Оба они подвергаются воздействию тока высокой частоты и полного напряжения высоковольтного трансформатора T_1 . Конденсатор C_6 , кроме того, находится под полным постоянным потенциалом установки и в некоторых случаях может подвергаться воздействию высокого постоянного напряжения. В качестве емкости C_5 , так же как и C_6 , достаточна емкость 100—300 см. При меньших емкостях оказываются громоздкими катушки L_5 и L_6 и становятся значительными напряжения на них $i_n \omega_n L$ и $\frac{i_n}{\omega_n C}$. При больших C_5

и C_6 силовой трансформатор нагружается значительным емкостным током.

В качестве емкости C_5 и C_6 были бы удобны конденсаторы с газом под давлением. Возможно применение керамических высокочастотных конденсаторов. В описываемой установке конденсатор C_6 на рабочее амплитудное напряжение до 125 кв был собран из пяти последовательно включенных слюдяных конденсаторов в керамической оболочке типа ТЗКР1-25—0,001 мкф на 25 кв каждый. Конденсаторы снабжались кольцами, выравнивающими потенциал, и после покрытия их торцевых поверхностей маслоупорным лаком помещались в бакелитовый цилиндр, заполненный маслом. В тот же цилиндр помещалась и индуктивность L_6 . Такой конденсатор C_6 , снабженный по концам алюминиевыми экранами, виден на рис. 2. Параллельно C_6 устанавливается защитный искровой промежуток (шаровые электроды, рис. 2) для защиты C_6 при повышении напряжения, возникающих в случае резкого разряда цепи конденсаторов $C_1—C_4$, при погасании кенотронов и тому подобных случаях.

Отметим некоторые другие особенности установки.

При подключении к одному генератору высокой частоты двух параллельных цепей кенотронов, как на схеме рис. 1, возникает задача выравнивания накалов в обеих цепях. Это достигается с помощью небольшой последовательной

индуктивности L_1 , увеличение которой приводит к возрастанию³ тока накала соответствующей из параллельных цепей. Подключение испытываемых объектов, в особенности если производится измерения с высокой степенью точности, как, например, при изучении короны, осуществляется через последовательные ограничивающие дроссели D_2 , имеющие целью не пропустить токи высокой частоты во внешнюю цепь. Величину D_2 нетрудно определить, зная емкость внешней цепи, электростатических экранов, делителей напряжения, объекта, соединительных проводов и т. п. и задавшись допустимым напряжением высокой частоты на объекте.

Генератор высокой частоты можно выбрать любого типа. Два мероприятия являются всегда желательными: 1) хорошее сглаживание напряжения, питающего генератор, что необходимо для предотвращения возникновения помех на низкой частоте; 2) осуществление индуктивной связи цепи нагрузки с колебательным контуром генератора посредством вариометра, поворот

которого позволяет производить весьма плавное и одновременное регулирование канала всех кенотронов.

При подборе оптимальной величины связи и настройки контура генератора приходится учитывать особенности колебаний связанных систем с разными частотами.

В построенной установке с 16 кенотронами общий к. п. д. всей цепи накала — отношение мощности, потребляемой кенотронами, к мощности, потребляемой генератором высокой частоты, составляет около 50%. В генераторе работают в параллель две лампы типа ГК-300.

Следует иметь в виду одну особенность генератора с высокочастотным питанием накала. Вследствие выпрямления кенотронами и уменьшения напряжения высокой частоты на установке появляется небольшое постоянное напряжение при включении только цепи накала и о включенном высоковольтном трансформаторе.

[И. 4. И]



Методика проектирования и расчетные показатели коммунальных электросетей

Кандидат техн. наук И. С. БЕССМЕРТНЫЙ

Гипржкоммунэнерго

Вопросы проектирования электрических сетей привлекают сейчас внимание в связи с необходимостью повышения надежности электроснабжения, снижения потерь электроэнергии и другими задачами. В частности, очень важно рассмотрение материалов по применению в качестве расчетного условия экономических плотностей тока [Л. 2...5].

Решающее значение экономических расчетов сетей было всесторонне мотивировано В. М. Хрущевым 20 лет назад [Л. 6]. Несмотря на эти и последующие исследования [Л. 7], получившие официальное признание, существующая методика проектирования коммунальных, преимущественно воздушных, электросетей, сложившаяся на основе устаревших «Руководящих указаний» [Л. 1], лишена достаточных обоснований.

³ Это обусловлено тем, что высоковольтная установка представляет для генератора ГВЧ главным образом емкостно-активную нагрузку.

Приведены сравнительные данные сетей, рассчитанных по рекомендуемым потерям напряжения и по экономическим плотностям тока. Показано улучшение показателей затрат металла и потерь энергии при последнем способе расчета. Предлагается изменить действующие рекомендации в отношении расчета по заданным потерям напряжения и на «минимум металла». Предлагается при проектировании использовать критерии экономичности, а также обобщенные величины коэффициентов распределения и средневзвешенной плотности тока.

Печатается в порядке обсуждения в связи с пересмотром «Руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей» [Л. 1].

Характерная для проектной практики недостаточная оценка экономических расчетов приводит часто к неудовлетворительным решениям, иллюстрацией чего может служить график, приведенный на рис. 1. На графике показаны удельные затраты проводникового металла, заимствованные

из типичного варианта проекта городской воздушной электросети 380/220 в. Каждая точка графика отвечает отдельной линии низкого напряжения и связывает запроектированную длину ее магистральной части L_n с плотностью линейной нагрузки D . Удельные затраты алюминия на три фазных провода (g_p , кг/квт), представленные на рис. 1 стрелками, получены из расчета на постоянную потерю напряжения $\Delta U_n = 4\%$ согласно [Л. 1].

Для оценки потерь мощности $\Delta P\%$ в сети низкого напряжения, состоящей из разветвленных линий, при смешанной нагрузке (равномерной

распределенной и сосредоточенной) можно исходить из формул обычного вида:

$$\Delta P\% = \frac{100\mu_p PL}{\gamma S U^2 \cos^2 \varphi}; \quad \Delta U_a\% = \frac{100\mu_U PL}{\gamma S U^2}. \quad (1)$$

При этом необходимо обратить внимание на подбор коэффициентов, позволяющих учесть особенности распределения нагрузки и конфигурации сети.

Коэффициент распределения по мощности μ_p вызывает изменение потерь максимальной мощности до $1/3$ их величины в равномерно нагруженных линиях сравнительно с линиями, имеющими нагрузку, сосредоточенную на конце. Коэффициент распределения по напряжению μ_U вызывает аналогичное изменение наибольшей потери напряжения до $1/2$ ее величины. В дальнейшем будет применен также коэффициент распределения по току

$$\mu_I = \sqrt{\frac{1}{\mu_p}} = 1 \dots 1,73.$$

онем, для связи между потерями мощности и напряжением можно использовать относительный коэффициент распределения

$$\mu_* = \frac{\mu_p}{\mu_U} = \frac{1}{1} \dots \frac{0,33}{0,5} = 1 \dots 0,67.$$

в разветвленной сети со смешанной нагрузкой, может принимать как промежуточные значения, так и выходящие из этих пределов. Таким образом, учитывая отношение, связывающее потери максимальной мощности и годовые потери энергии $\Delta W\%$, можно приближенно считать их по следующей зависимости от $\Delta U_a\%$:

$$\frac{T}{\tau} \Delta W\% = \Delta P\% = \frac{\mu_*}{\cos^2 \varphi} \Delta U_a\%. \quad (2)$$

в рассматриваемом случае можно принять $\mu_* = 1,0$, $\Delta U_a\% = \Delta U_n\% = 4\%$, $\mu_* = 0,8$; относительные продолжительности использования максимальной мощности $\frac{T}{\tau} \gg \frac{2500}{1000} \approx 2,5$, считая нагрузку преимущественно осветительной. В результате получаем: $\Delta P\% = 3,2\%$; $\Delta W\% = 1,3\%$. Видно из графика (рис. 1), малые потери энергии и энергии в данной сети низкого напряжения соответствуют весьма различным затратам алюминия на отдельные разветвленные линии. Эти затраты находятся в прямой зависимости от длины магистралей и изменяются от 1 до 30 кг/квт. Следует заметить, что проектные показатели, но приведенные к меди, имели более большую величину.

Обращают на себя внимание большие различия в затратах алюминия при одной и той же плотности нагрузки. Это является следствием принятого способа определения района обслуживания каждого из трансформаторных пунктов.

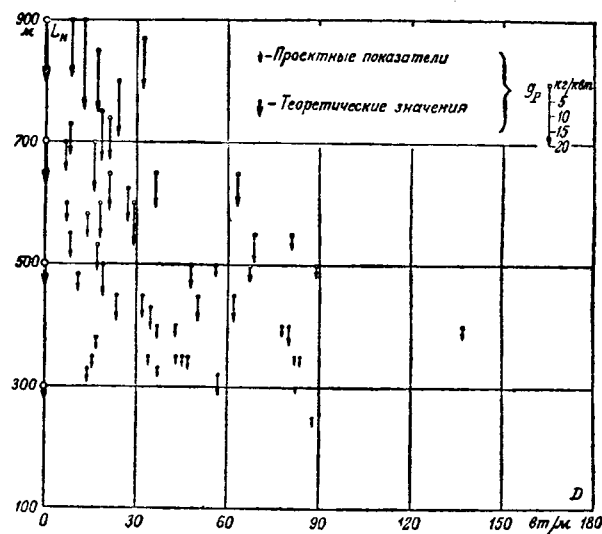


Рис. 1. Затраты алюминия в сети низкого напряжения при $\Delta U_n = 4\%$ (теоретические значения на оси ординат согласно табл. 2).

При выборе мощности или числа трансформаторных пунктов, исходя из средней плотности нагрузки на большой территории, как это рекомендуется в [Л. 1], длина отдельных магистралей неизбежно определяется случайными обстоятельствами. После расстановки трансформаторных пунктов на плане города производится привязка к ним потребителей. Проектировщик добивается полной загрузки трансформаторов, руководствуясь условием питания нагрузок по кратчайшим расстояниям. В то же время количество и длина линий не считаются заданными и не могут быть увязаны с идеализированными схемами конфигурации, положенными в основу формулы, рекомендованной в [Л. 1]. Последующий расчет сети на потерю напряжения сводится к чисто формальному определению сечений проводов без критической оценки принятой конфигурации.

Таким образом, вслед за длинами линий сечения проводов также оказываются в конечном счете случайными. Этого можно избежать только путем непосредственного учета экономических длин или расстояний, что, по выражению В. М. Хрущева [Л. 6], дает единственно правильный критерий размещения трансформаторных пунктов, который, к сожалению, обычно не применяется.

Нужно отметить, что этот критерий устанавливает экономическую соразмерность звеньев сети или, иначе говоря, дальность передачи энергии при первичном и при вторичном напряжениях.

Для полноты обоснования проектов требуется учитывать особенности развития сетей. Поэтому можно говорить о втором критерии — экономической последовательности построения сетей.

Учет динамики роста нагрузок приводит в некоторых случаях к построению однородных (неизменного сечения) сетей низкого напряжения, допускающих увеличение пропускной способности путем постепенного добавления трансформаторных пунктов. В основу расчета таких сетей не могут

быть положены ни мощности, ни расстояния между трансформаторными пунктами, наивыгоднейшие для одного расчетного срока. Требуется оценка вариантов сечений и мощностей за весь проектный период и по его частям. Однако особый характер стоимостных кривых иногда позволяет говорить о зоне наивыгоднейших значений в данном диапазоне роста нагрузок.

Последнее положение удастся широко использовать для тех видов сетей низкого напряжения, которые наиболее часто встречаются в проектной практике. Сюда относятся обычно наиболее целесообразные магистральные (частично-однородные) сети, в которых главные линии или магистрали сохраняют неизменное сечение, а для ответвлений принимаются провода меньших сечений или даже стальные провода. Сюда же относятся неоднородные сети со ступенчатыми сечениями всех линий, что влечет за собой полную их реконструкцию по истечении расчетного срока.

Вследствие меньших затрат последний вид сетей может еще долгое время сохраняться в практике, несмотря на его низкую надежность. Рост нагрузок в этом случае можно учитывать упрощенно при помощи расчетных коэффициентов. Так, поступает, например, А. А. Глазунов в своей формуле для экономической плотности тока [Л. 7, 8]. Введенные в эту формулу коэффициенты позволяют говорить о возможных (узких) пределах соотношения затрат металла и потерь энергии. Эти пределы интересно сопоставить с данными из практики проектирования.

В сетях низкого напряжения, рассчитанных по потере напряжения, экономические плотности тока не соблюдаются и тем самым нарушается третий критерий — экономическая уравновешенность затрат металла и потерь энергии в проводах. Одинаковым процентным величинам потерь мощности и энергии в этих сетях соответствуют различные удельные затраты металла.

С другой стороны, на основе расчета сети по предельному току нагрева в аварийном режиме Б. Л. Айзенберг [Л. 9] предложил новую формулу мощности трансформаторного пункта, годную, по его мнению, «для любых сетей с двусторонним питанием магистралей». Эта формула может быть и применима к рекомендуемому Б. Л. Айзенбергом типу неавтоматической замкнутой сети низкого напряжения, требующей симметричных контуров и не допускающей добавления промежуточных трансформаторных пунктов, что является, между прочим, крупным недостатком этой сети. При росте нагрузок такую сеть необходимо либо коренным образом реконструировать, либо проектировать с большими запасами.

Для более совершенных сетей, удовлетворяющих условиям развития, новая формула не может заменить сравнения вариантов по разным срокам. Для общего случая формула неприемлема с точки зрения экономических критериев¹.

¹ В частности, неправильно обоснование формулы расчетом линий по $1/2$ предельного тока, во всяком случае для воздушных сетей низкого напряжения, которые следует согласно нижеизложенному рассчитывать по

Упомянутые выше различия в удельных затратах металла (30-кратные и более) отражаются на значениях удельных потерь, т. е. на отношении годовых потерь энергии к весу металла, использованному в довоенное время проектных организациями в качестве основного расчетного условия. Тогда при выборе медных и алюминиевых проводов высокого напряжения допускались следующие предельные значения этого показателя:

$$\Delta w_M = 15 \dots 25 \text{ квтч/кг},$$

$$\Delta w_A = 25 \dots 40 \text{ квтч/кг}.$$

Таким образом, устанавливался определенный уровень потерь в линиях применительно к существовавшим требованиям экономии цветных металлов. С изменением условий этот уровень был признан завышенным. В настоящее время роль критерия уравновешенности затрат металла и потерь играют экономические плотности тока.

Действительно, годовые потери энергии в проводах трехфазной линии при постоянной плотности тока, соответствующей максимальной нагрузке, равны:

$$\Delta W = \frac{3}{10^3 \gamma} j^2 L s \tau = \frac{1}{\gamma g_0} j^2 G \tau \text{ квтч}; \quad (3)$$

где L — длина, м;

s — сечение, мм²;

G — вес трехфазных проводов, кг;

g_0 — удельный вес, г/м · мм²;

γ — удельная проводимость, м/ом · мм².

Для меди $\gamma g_0 = 500$, для алюминия $\gamma g_0 = 32$.

Из выражения (3) следует, что удельные потери изменяются пропорционально времени потерь и квадрату плотности тока, составляя для медных проводов

$$\Delta w_M = \frac{\Delta W}{G_M} = \frac{1}{500} j^2 \tau \text{ квтч/кг}$$

и для алюминиевых

$$\Delta w_A = \frac{\Delta W}{G_A} = \frac{1}{32} j^2 \tau \text{ квтч/кг}$$

Поскольку с возрастанием τ значения экономических плотностей тока j_e убывают, удельные потери Δw изменяются относительно мало. Это показано в табл. 1 для j_e , рекомендованных Правилами устройства [Л. 2], а также подсчитанных по формуле А. А. Глазунова [Л. 8]. При подсчете в формулу вводился коэффициент, учитывающий последовательность развития нагрузок, изменения стоимостных составляющих и т. д. Поэтому в табл. 1 даны два значения (крайние)

экономической плотности тока с проверкой по потерям напряжения. В табл. 2, приведенной Б. Л. Айзенбергом для доказательства противоположного, вызывает удивление подмена фактически применяемых алюминиевых проводов медными, сечением более 16 мм². Для первых рекомендуемые плотности тока ($j_{нач} \approx 1,5 \dots 1,73 \text{ а/мм}^2$) лежат ниже половины предельных по нагреву, тогда как вторые вообще не применяются, что, конечно, известно каждому специалисту.

Таблица 1

Экономические плотности тока и удельные потери энергии

Время использования максимума, час . . .	2 000		3 000		4 000		5 000		6 000	
Время потерь, час	650 (1 200)		1 200 (2 000)		2 000 (2 800)		3 000 (3 700)		4 200 (4 800)	
Экономические плотности тока и удельные потери энергии	j_s	Δw	j_s	Δw	j_s	Δw	j_s	Δw	j_s	Δw
<i>Для медных проводов</i>										
Правилам устройства*	2,5	8	—	—	1,75	12	—	—	1,25	13
формуле А. А. Глазунова:										
верхнее значение	2,4	7,5	1,8	7,5	1,5	9	1,3	10	1,1	10
нижнее значение	1,7	3,5	1,25	3,5	1,0	4	0,9	5	0,8	5,5
<i>Для алюминиевых проводов</i>										
Правилам устройства*	1,5	16	—	—	1,0	22	—	—	0,75	25,5
формуле А. А. Глазунова:										
верхнее значение	1,5	16	1,15	17,5	1,0	22	0,85	23	0,7	23
нижнее значение	1,0	7	0,8	8	0,7	10,5	0,6	11,5	0,5	11,5

Примечание. Время потерь приведено для $\cos \varphi = 1$ и в скобках для $\cos \varphi = 0,8$. Удельные потери подсчитаны по времени потерь $t_{\text{пот}} = 1$.

экономических плотностей тока и удельных потерь.

Сравнение удельных потерь, приведенных в табл. 1 с применявшимися до войны, показывает снижение этого показателя в 1,5 . . . 2 раза. Можно потребовать дальнейшего его понижения вплоть до нижних значений, подсчитанных по формуле А. А. Глазунова. Однако отступления от заданного уровня должны быть, очевидно, ограничены довольно узкими пределами, особенно в данной величине τ .

Чтобы дать оценку проектным величинам удельных потерь, необходимо обобщить их связь с плотностью тока. Предполагавшееся выше состояние j по длине линии имеет место в случае однородной линии с нагрузкой, сосредоточенной на конце. В более сложных случаях приходится учитывать изменение плотности тока по длине линии, ввиду чего экономическое значение j_s необходимо относить к некоторой средней величине j_{cp} . Определение последней и введение ее в расчет вызывает иногда затруднения. Воздушные сети низкого напряжения состоят из большого числа линий, различающихся как по конфигурации, так и по распределению нагрузки. В случае равномерно нагруженной, неразветвленной, однородной линии затруднения легко решаются расчетом по плотности тока в начале линии $j_{нач} = \mu_1 j_{cp} = 1,73 j_s$. Коэффициент распределения по току $\mu_1 = 1,73$ определяется из условия равновесия потерь энергии в данной линии и потерь ей, но несущей по всей длине нагрузку, в свою начальную.

В общем случае коэффициент μ_1 можно считать равным отношению начальной плотности тока к некоторой условной средней. Последняя определяется иногда как среднеквадратичная по длине линии $j_{ск}$ для каждого конкретного случая, что бывает сложно. Поэтому при расчете можно пользоваться условной величиной

средневзвешенной плотности тока $j_{св}$, определяемой одинаково для всех случаев по значению удельных потерь. При этом независимо от вида линии и ее нагрузки для плотности тока в начале линии сохраняется одинаковое выражение

$$j_{нач} = \mu_1 j_{св} \quad (5)$$

Средневзвешенная плотность тока согласно определению находится в результате простого преобразования выражений (3) и (4) для удельных потерь:

$$j_{св} = \sqrt{\frac{\gamma g_0 \Delta w}{\tau}} = \sqrt{\gamma g_0 \Delta p} = \sqrt{\frac{\gamma g_0 \Delta P \rho_0}{100 g_p}}; \quad (6)$$

здесь $\Delta w = \frac{\Delta W}{G}$ квтч/кг — удельные годовые потери энергии;

$\Delta p = \frac{\Delta P}{G}$ квт/кг — удельные потери максимальной мощности;

$g_p = \frac{G}{P}$ кг/квт — удельные затраты металла.

Пользуясь формулой (6), легко установить, что в рассматриваемой сети низкого напряжения (рис. 1) средневзвешенная плотность тока изменяется для отдельных линий от 0,3 до 1,7 а/мм², удельные потери энергии — от 1 до 32 квтч/кг и удельные потери мощности — от 1 до 32 квт/т.

Из сопоставления этих данных с приведенными в табл. 1 видно их резкое различие. Поэтому интересно более подробное сравнение расчетов по заданной потере напряжения и по экономической плотности тока.

Для этого необходимо выяснить расчетные показатели различных линий при упрощенных условиях. Затраты металла и потери в сети могут быть определены на основе исследований В. М. Хрущева, который показал допустимость применения к развитым сетям формул, выведенных для простейших линий. Учет особенностей, присущих встречающимся на практике более

сложным линиям, достигается подбором соответствующих значений коэффициентов распределения μ и конфигурации χ . Методика расчетов и сами расчеты даны в приложении I.

Данные, полученные для сетей низкого напряжения, следует рассматривать совместно с показателями сетей высокого напряжения. Результаты расчета по потере напряжения даны в табл. 2, а по экономической плотности тока — в табл. 3.

Таблица 2

Показатели сетей, рассчитанных по потере напряжения

Расчетная длина магистралей, м	Удельные затраты алюминия, кг/квт	Средне- взвешенная плотность тока, а/мм ²	Удельные потери энергии, квтч/кг	
<i>Сети низкого напряжения</i>				
300	2,3	1,12	13,9	Сохраняют по- стоянную величину: $\Delta U_{\%} = 4,0\%$ $\Delta P_{\%} = 3,2\%$
500	6,5	0,67	4,9	
700	12,7	0,48	2,5	
900	21,0	0,37	1,5	
<i>Сети высокого напряжения</i>				
5 000	1,5	2,0	90,0	$\Delta U_{\%} = 8,0\%$ $\Delta P_{\%} = 6,5\%$

Таблица 3

Показатели сетей, рассчитанных по экономической плотности тока

Расчетная длина магистрали, м	Удельные затраты алюминия, кг/квт	Потери максимальной мощности, %	Наибольшие потери напряжения, %	
Сети низкого напряжения				
300	2,8 (1,9)	3,0 (4,5)	3,8 (5,6)	Сохраняют постоянную величину: $j_{св} = j_{э} = 1,0 (1,5) \text{ а'мм}^2$ $\Delta\omega_A = 11 (16,5) \text{ квтч/кг}$
500	4,6 (3,1)	5,0 (7,5)	6,3 (9,4)	
700	6,5 (4,3)	7,0 (10,5)	8,8 (13,2)	
900	8,3 (5,6)	9,0 (13,5)	11,2 (16,9)	
Сети высокого напряжения				
5 000	2,8	3,1	4,5	$\Delta\omega_A = 22 \text{ квтч/кг}$

Рассматривая данные табл. 2, нельзя не обратить внимания на резкое различие между показателями сетей низкого и высокого напряжения. Удельные затраты металла в линиях высокого напряжения незначительны по сравнению с сетями низкого напряжения и составляют при малых плотностях нагрузки ($L_n = 500 \dots 700 \text{ м}$) только 15% от суммарных. Удельные потери энергии соответственно больше в 25 раз. Такие различия объясняются тем, что плотности тока в линиях низкого напряжения значительно ниже, а в линиях высокого напряжения значительно выше, чем экономические.

Напрашивается вывод о целесообразности перераспределения затрат металла между сетями низкого и высокого напряжения для того, чтобы получить примерно одинаковые показате-

ли. Как видно из табл. 3, этого можно добиться при расчете сетей по экономической плотности тока.

Для наглядного сравнения важнейшие показатели сетей, рассчитанных по потере напряжения и по экономической плотности тока, представлены на рис. 2 и 3 в виде зависимостей длины линий низкого напряжения. При малых плотностях нагрузки и наиболее соответствующих им длинах ($L_n = 500 \dots 700 \text{ м}$) переход заданных потерь напряжения ($\Delta U_n = \Delta U_s = 8\%$) к постоянной плотности тока ($j_s = 1,0 \text{ а/мм}^2$) приводит к значительному улучшению показателей. Уменьшение веса проводов линий низкого напряжения не только компенсирует увеличение затрат металла на линии высокого напряжения, но дает экономию металла. В то же время снижаются суммарные потери максимальной мощности. При малых длинах ($L_n < 500 \text{ м}$), т. е. при больших плотностях нагрузки, имеет место некоторое снижение потерь мощности за счет большого перерасхода металла. Обратные результаты наблюдаются при очень больших длинах ($L_n > 700 \text{ м}$).

Результаты сравнения подтверждают эффективность применения расчета сетей по экономической плотности тока. Но они не могут дать исчерпывающей оценки эффекта, поскольку не удается учесть в общем виде соотношение участков сети низкого напряжения, имеющих разную длину. Кроме того, принятый случай линий высокого напряжения также не является исчерпывающим. В конкретных проектах встречаются разнообразные сочетания питающих и распределительных линий высокого напряжения. Сечения проводов этих линий (или жил кабелей) часто определяются величинами потерь напряжения (или предельного тока) в аварийном режиме. Наконец, и принятые величины T , τ , μ , χ , \cos и др. могут заметно изменяться.

Однако до накопления материалов можно все же сослаться на некоторые конкретные расчеты.

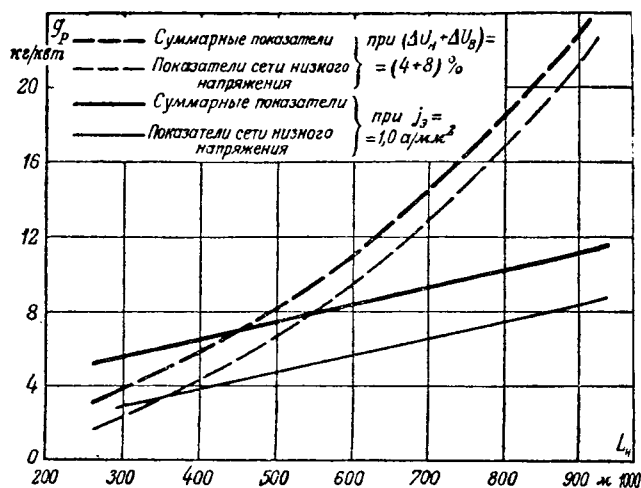


Рис. 2. Затраты алюминия в сетях низкого и высокого напряжения (теоретические значения).

Таблица 4

**Результаты расчета городской сети по заданным потерям напряжения (1-й вариант)
и по экономической плотности тока (2-й вариант)**

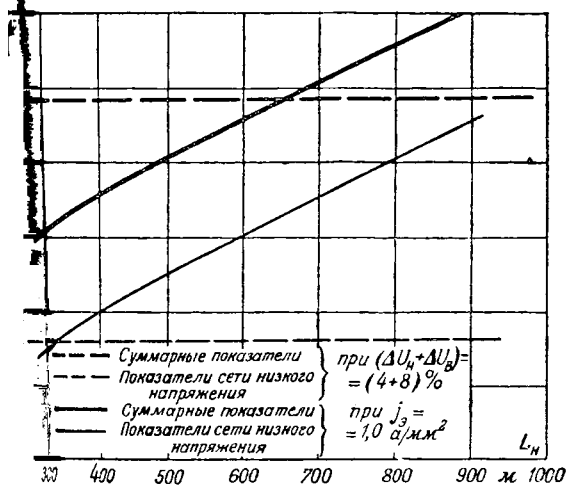
	Вес алюминия, кг		Потери максимальной мощности, кВт		Годовые потери энергии, кВт·ч		Удельные потери энергии, кВт·ч/кг	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Варианты расчета								
по низкому напряжению . . .	17 000	12 600	93,5	113,5	112 000	136 000	6,5	10,8
по высокому напряжению . . .	10 900	17 300	340,5	133,5	680 000	266 000	62,0	15,2
Всего	27 900	29 900	434,0	247,0	792 000	402 000	28,5	13,5

Результаты одного из таких расчетов, полученные при проектировании сети города на заданную мощность по высокому напряжению 100 кВт, в том числе по низкому напряжению 100 кВт, приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, расчет сети по 2-му варианту дал снижение потерь мощности на 43% и потерь энергии — на 49% при совершенно незначительном увеличении затрат металла (7%). Нашло отражение и в улучшении показателей удельных потерь.

Как известно, расчетные величины экономической плотности тока регламентированы пока только для сетей высокого напряжения [Л. 2]. Отсутствие этой величины для воздушных линий алюминиевыми проводами при $T \geq 3000$ час составляет 1 а/мм².

Если рассматривать сети низкого напряжения с относительно малыми нагрузками от бытовых приборов и мелких электродвигателей, то для них можно говорить о несколько меньшем числе ответвлений большей плотности тока (до 1 а/мм²). Однако следует учитывать повышение стоимости энергии и удешевление строительства линий. Поэтому целесообразно впрямь окончательного выяснения вопроса принять и для сетей низкого напряжения $j_s = 1,0$ а/мм², ориентируясь на нижний предел значений, предложенный по формуле А. А. Глазунова.



3. Потери мощности в сетях низкого и высокого напряжения (теоретические значения).

Что касается весьма важного вопроса о допусках потерях напряжения, то расчет по экономической плотности тока приводит к перераспределению этих потерь между сетями низкого и высокого напряжения. При этом суммарная потеря напряжения в обоих звеньях может быть сохранена прежней, около 12% (не считая трансформаторов). Именно такая рекомендация дана в резолюции Первой научно-технической сессии по городским электросетям [Л. 4] и подтверждается ориентировочным расчетом (приложение II).

Очевидно, суммарная потеря напряжения в сетях высокого и низкого напряжения может быть различной в зависимости от режима напряжения на шинах питающих центров. Если принять, согласно § 29 действующих „Правил устройства“ [Л. 2], что на шинах центральных станций или подстанций обеспечивается встречное регулирование напряжения ($\delta U' = +5\%$), то допускаемая величина $\Delta U_v + \Delta U_n = 11 \dots 12\%$.

При расчете сети по экономической плотности тока эта величина соблюдается, если длины линий низкого и высокого напряжения этой сети не превосходят следующих величин: $L_n = 500$ м, $L_v = 5000$ м или $L_n = 700$ м, $L_v = 2500$ м (см. данные табл. 3).

При больших длинах и в особых случаях требуется снижение расчетной плотности тока или применение местных (индивидуальных или групповых) устройств для регулирования напряжения. Относительная немногочисленность таких случаев позволяет считать, что это не вызовет особых технических или экономических затруднений.

Расчетные условия полностью изменятся, если будет принята формулировка указанного параграфа „Правил устройств“, предложенная М. К. Харчевым [Л. 3], согласно которой встречное регулирование на шинах питающих центров не является обязательным. В этом случае расчет сетей должен производиться из условий естественного изменения напряжения на шинах: $\delta U' = -5\%$, а допускаемую потерю напряжения в сетях придется ограничить величиной $\Delta U_v + \Delta U_n = 1 \dots 2\%$.

Очевидная невозможность проектирования обычных сетей при таких условиях потребует независимо от способа расчета массового применения местных регулирующих устройств, что является более затруднительным

и менее целесообразным, чем централизованное регулирование напряжения.

Выводы. 1. Методику расчета коммунальных сетей и связанные с ней вопросы следует рассматривать применительно к данному виду сети. Построение сетей разных видов (однородных, частично-однородных и неоднородных) определяется условиями их развития, требованиями надежности электроснабжения и другими факторами.

2. При проектировании электросетей необходимо уделять внимание экономическим критериям, особенно такому критерию, как уравнишенность затрат металла и потерь энергии. Ввиду этого выбор сечений и сравнение вариантов должны производиться на основе расчета сетей по экономической плотности тока.

3. Такие расчеты во всех случаях могут быть произведены путем использования обобщенных величин средневзвешенной плотности тока в линиях и коэффициента распределения (по току), представляющего отношение начальной плотности тока к средневзвешенной.

4. Расчет неоднородных сетей по экономической плотности тока позволяет определить наиболее выгодное соотношение сечений проводов отдельных участков. Рекомендательный «Руководящими указаниями» [Л. 1] расчет на минимум металла является неполноценным, а дополняющий его расчет экономических потерь напряжения усложняет дело и совершенно не нужен при расчете по экономической плотности тока (приложение III). Сохраняется только необходимость последующей проверки по допускаемым отклонениям напряжения и по предельному току нагрева.

5. Независимо от способа расчета необходимо сохранить редакцию § 29 «Правил устройства», требующую обязательного применения встречного регулирования напряжения на шинах питающих центров.

6. Не следует забывать, что рассмотренное в статье применение к электросетям критерия экономической уравновешенности связано с общей электротехнической задачей о целесообразном повышении к. п. д. за счет затрат активных металлов. Решение этой задачи для разных видов электроустановок, электромашин и т. п. требует учета некоторых особенностей, но должно соответствовать общим технико-экономическим директивам, которыми в данном случае являются рекомендуемые плотности тока.

Приложение I. При расчете сети по потере напряжения в обычную формулу, определяющую сечение (а следовательно, и вес) проводов простейшей линии, вводится произведение $\mu_U \cdot x_1$. По заключению В. М. Хрущева [Л. 6], коэффициент μ_U в городских сетях лишь в исключительных случаях выходит за пределы 0,4...0,6 и в большинстве случаев весьма близок к 0,5. Точно так же при расчете сети по экономической плотности тока в обычную формулу вводится отношение x_1/μ_I , причем коэффициент μ_I принимается равным 1,73. Это может быть принято для сетей как низкого, так и высокого напряжения, так как отклонения в ту или другую сторону одинаково вероятны.

Коэффициент конфигурации x_1 представляет отношение веса проводов разветвленной линии к весу ее стальной части. В результате исследования сетей, летворяющей условию постоянной плотности тока, удалось возможным установить [Л. 6] теоретическое значение $x_1 = 1,0 \dots 1,33$ в зависимости от расположения трансформаторных пунктов и числа присоединений к линии кварталов. Ввиду того, что вес проводов стальной постоянной сечения не отличается от стального при постоянной плотности тока и одинаков при одинаковом напряжении [Л. 10], эти значения x_1 справедливы и для частично-однородной сети.

Соотношения резко меняются, если сечения проводов или длины линий ненормально велики. Очевидно, ввиду недостаточности более детальных и проверенных практически данных x_1 принят равным 1,3 независимо от длины магистралей. По этой же причине теряет смысл и дальнейшее уточнение коэффициентов распределения, поэтому для сетей низкого напряжения принимаем

$$\mu_U \cdot x_1 = 0,5 \cdot 1,3 = 0,65$$

и

$$\frac{x_1}{\mu_I} = \frac{1,3}{1,73} = 0,75.$$

Для распределительных линий высокого напряжения можно считать $x_1 = 1$, как для неразветвленных. При этих значениях коэффициентов и связанных с ними результаты расчетов нужно будет подвергнуть уточнению после накопления практических данных.

Таким образом, при расчете сети по потере напряжения теоретические показатели веса алюминия в фазных проводах сети 380/220 в могут быть получены видоизмененной формулы для определения сечения

$$g_P = \frac{100 g_0 \mu_U x_1}{\gamma U^2 \Delta U_n \%} L_n = \frac{100 \cdot 2,7 \cdot 0,5 \cdot 1,3}{34 \cdot 220^2 \cdot 4} L_n \text{ кг/км}.$$

Для этих же условий потери мощности и напряжения можно считать постоянными и равными:

$$\Delta P \% = 0,8 \cdot \Delta U_n \% = 3,2 \%.$$

Средневзвешенная плотность тока и удельные потери энергии при $T = 2500$ час и $\tau = 1000$ час

$$j_{cs} = \sqrt{0,92 \frac{\Delta P \%}{g_P}} = \frac{1,7}{\sqrt{g_P}} \text{ а/мм}^2;$$

$$\Delta \omega_A = \frac{1}{92} j_{cs}^2 \tau = \frac{32}{g_P} \text{ квтч/кг} = \Delta p_A \cdot 10^3 \text{ квт/т}.$$

При расчете по экономическим плотностям и удельные затраты алюминия на сети низкого напряжения будут равны:

$$g_P = \frac{\sqrt{3} g_0 x_1}{j_a U_a \mu_I} L_n = \frac{1,73 \cdot 2,7 \cdot 1,3}{(1,0 \dots 1,5) 380 \cdot 1,73} L_n \text{ кг/км}.$$

Для других показателей сохраняют силу прежние значения.

Из разнообразных случаев, встречающихся в практике проектирования коммунальных сетей высокого напряжения, остановимся на сети 6 кв, состоящей только из воздушных распределительных линий, которые присоединены непосредственно к центру питания (центральной электростанции или подстанции). В этом случае линии высокого напряжения имеют, как правило, большую длину. Допускаемая потеря напряжения при делении их сечения рекомендуется равной 8% [Л. 1].

При обычных нагрузках (до 1000 квт) и для линий (до 5 км) соотношение активной и индуктивной потерь напряжения мало изменяется и составляет:

$$\Delta U_{cu} \% = 100 \mu_U \frac{P L_g}{U_a^2} x_0 \sin \varphi = 100 \cdot 0,5 \cdot \frac{1 \cdot 5}{6^2} \cdot 0,4 \cdot 0,6 = 1,1$$

$$\Delta U_{ca} \% = 8 - 1,7 \approx 6 \%.$$

Потери максимальной мощности при $\mu_* = 0,7$ (ответвления и выделяющиеся по величине нагрузки отсутствуют)

$$\Delta P\% = \frac{\mu_*}{\cos^2 \varphi} \Delta U_{ca}\% = \frac{0,7 \cdot 6}{0,8^2} = 6,5\%.$$

Удельные затраты алюминия определяются так же, в случае сетей низкого напряжения, но при $x_1 = 1$.

$$g_P = \frac{3 \cdot 100 \cdot 2,7 \cdot 0,5}{34,6 \cdot 0,0002 \cdot 6} \cdot 5 \cdot 000^2 = 1,5 \text{ кг/км}.$$

Плотности тока и удельные потери при $T = 3 \cdot 000 \text{ час}$ и $\tau = 2 \cdot 000 \text{ час}$

$$j_{св} = \sqrt{0,92 \frac{6,5}{1,5}} = 2,0 \text{ а/мм}^2;$$

$$\Delta w_A = \frac{1}{92} \cdot 2,0^2 \cdot 2 \cdot 000 = 90 \text{ втч/кг};$$

$$\Delta P_A \cdot 10^3 = 45 \text{ вт/м}.$$

При расчете по экономической плотности тока при тех же воздушные линии 6 кВ большой длины. Считаем эти линии однородными, неразветвленными с расчетной нагрузкой, принимаем: $x_1 = 1$;

$\mu_* = 1,73$; $\mu_* = 0,7$; $\cos \varphi = 0,8$; $T = 3 \cdot 000 \text{ час}$ и $\tau = 2 \cdot 000 \text{ час}$.

и

$$g_P = \frac{1,73 \cdot 2,7 \cdot 5 \cdot 000}{1,0 \cdot 6 \cdot 000 \cdot 0,8 \cdot 1,73} = 2,8 \text{ кг/км};$$

$$\Delta w_A = \frac{1}{92} \cdot 1,0^2 \cdot 2 \cdot 000 = 22 \text{ втч/кг};$$

$$\Delta P_A \cdot 10^3 = 11 \text{ вт/м};$$

$$\Delta P\% = \frac{100}{92} j^2 g_P = 1,1 \cdot 1,0^3 \cdot 2,8 = 3,1\%;$$

$$\Delta U\% = \frac{0,8^2}{0,7} \Delta P\% = 2,8\%; \quad \Delta U_g\% = 2,8 + 1,7 = 4,5\%.$$

Приложение II. Если исходить из того, что отклонения напряжения от номинального у электроприемников не превосходят $\pm 5\%$ или $\delta U'' = 10\%$, то при расчете необходимо обеспечить, чтобы в эти пределы входили: 1) отклонения от среднего уровня напряжения при изменении нагрузки (во времени) от минимального до максимальной и 2) отклонения среднего уровня напряжения от номинального у потребителей, расположенных в различных точках сети (по месту).

Отклонения, связанные с местом расположения потребителей, можно ограничить использованием ответвлений в обмотках сетевых трансформаторов, допускающих отклонение на $\pm 5\%$. В правильно запроектированной и правильно эксплуатируемой сети эти отклонения не должны превышать половины ступени переключения, т.е. $\pm 2,5\%$.

Таким образом, для обеспечения поставленного требования в целом при расчетах отклонений, связанных с изменением нагрузки, достаточно принять уменьшенную величину $\delta U'' = 10 - 2,5 = 7,5\%$. Однако для удобства можно сохранить прежнюю величину $\delta U'' = 10\%$, ее же к изменению нагрузки от холостого хода (до минимума) до максимума. Кроме этого, наряду с потерями напряжения во всех элементах (U_g) в расчете должны быть учтены изменения напряжения ($\delta U'$) на шинах питающих центров. В результате получим уравнение:

$$\Delta U_g\% = \delta U' + \delta U''.$$

При переходе к исследуемой величине суммарной напряженности в сетях высокого и низкого напряжения от суммы в левой части уравнения необходимо

отнять потери в трансформаторах и проводках потребителей, составляющие около 3...4%. Тогда

$$(\Delta U_g + \Delta U_n)\% = \Delta U_g - (3 \dots 4) = \delta U' + 10 - (3 \dots 4).$$

Приложение III. Некоторые детали расчета можно показать на примере, разобранном в свое время М. Д. Каменским [Л. 11]. Трехфазная линия 220 в (рис. 4) была рассчитана как частично-однородная (магистральная) и как неоднородная (по условию минимума металла). Результаты сравнительного расчета (табл. 5) показывают, что во втором случае имело место значительное снижение затрат металла и потерь мощности. Однако решение вопроса об устройстве линии может не вытекать из расчета, а чаще всего предшествует расчету. С другой стороны, интересно сравнить результаты расчетов по минимуму металла и по плотностям тока. При этом первоначально линия предполагается неоднородной.

Для удобства сравнения с данными [Л. 11] примем условно, что провода выполнены из меди любых сечений и что расчетная плотность тока равна средневзвешенной, по данным расчета на минимум металла, а именно:

$$j_{расч} = j_{св} = \sqrt{\frac{500 \cdot 1,072}{520}} = 1,0 \text{ а/мм}^2.$$

Для нормального расчета потребовалось бы принять:

$$j_{расч} = j_g \approx 2,5 \text{ а/мм}^2.$$

При расчете отдельных участков линии приходится задаваться величиной коэффициента распределения μ_I . Однако тут же возможна проверка, насколько полученные величины $j_{св}$ и μ_I приближаются к принятым и требуется ли вторичный, окончательный расчет.

Для головного участка имеем окончательно:

$$s_{oa} = \frac{I_{oa}}{\mu_I j_{расч}} = \frac{125}{1,1 \cdot 1,0} = 114 \approx 120 \text{ мм}^2;$$

$$j_{св} = \sqrt{500 \frac{\Delta P}{G}} = \sqrt{\frac{500 \cdot 0,552}{320}} = 0,94 \text{ а/мм}^2,$$

$$\mu_I = \frac{j_{нач}}{j_{св}} = \frac{I_{oa}}{s_{oa} j_{св}} = \frac{125}{120 \cdot 0,94} = 1,10.$$

Аналогично и для других участков:

$$s_{ab} = \frac{39,5}{1,3 \cdot 1,0} = 30 \approx 25 \text{ мм}^2; \quad j_{св} = 1,19 \text{ а/мм}^2; \quad \mu_I = 1,32;$$

$$s_{ac} = \frac{46,0}{1,4 \cdot 1,0} = 33 \approx 35 \text{ мм}^2; \quad j_{св} = 0,96 \text{ а/мм}^2; \quad \mu_I = 1,37.$$

Таким образом, затраты металла и потери мощности в неоднородной линии, рассчитанной по плотности тока, не больше, а иногда даже меньше, чем в той же линии, рассчитанной на минимум металла.

В случае магистральной или частично-однородной линии сечение магистральной части определится согласно предыдущему следующим образом:

$$s_{oab} = \frac{125}{1,7 \cdot 1,0} = 74 \approx 70 \text{ мм}^2;$$

$$j_{св} = 1,06 \text{ а/мм}^2; \quad \mu_I = 1,68.$$

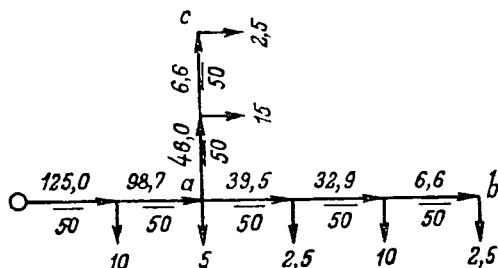


Рис. 4. Расчетная схема трехфазной линии 220 в. Нагрузки в кВт, линейные токи в а, длины в м.

Сравнительные данные расчетов линии (рис. 4) по потере напряжения и по плотности тока

Метод расчета	Вид линии	Данные расчета	По участкам			По линии	
			Оа	ab	ac	Сумма	
По потере напряжения	Магистральная (частично-однородная)	$s, \text{мм}^2$	70			—	
		$G, \text{кг}$	466			134	600
		$\Delta P, \text{квт}$	1,050			0,113	1,163
По потере напряжения при условии минимума металла	Неоднородная	$s, \text{мм}^2$	95	50	25	—	
		$G, \text{кг}$	253	200	67	520	
		$\Delta P, \text{квт}$	0,698	0,140	0,234	1,072	
По плотности тока	Неоднородная	$s, \text{мм}^2$	120	25	35	—	
		$G, \text{кг}$	320	101	94	515	
		$\Delta P, \text{квт}$	0,552	0,280	0,168	1,000	
По плотности тока	Магистральная (частично-однородная)	$s, \text{мм}^2$	70			35	—
		$G, \text{кг}$	466			94	560
		$\Delta P, \text{квт}$	1,050			0,168	1,218
По плотности тока	Однородная	$s, \text{мм}^2$	70			70	—
		$G, \text{кг}$	466			188	654
		$\Delta P, \text{квт}$	1,050			0,084	1,134

Сечение ответвления будет таким же, как и в случае неоднородной линии $s_{ac} \approx 35 \text{ мм}^2$.

Сечение проводов всех участков однородной линии будет:

$$s_{oabc} = \frac{125}{1,9 \cdot 1,0} = 66 \approx 70 \text{ мм}^2;$$

$$j_{св} = 0,93 \text{ а/мм}^2; \quad \mu_I = 1,92.$$

Показатели последних двух линий значительно хуже, чем показатели неоднородной линии. Затраты металла и потери мощности увеличились в среднем на 15% для магистральной линии и на 20% для однородной линии. Следует, однако, принять во внимание, что эти показатели не учитывают динамики развития и других условий, в отношении которых линии двух последних видов обладают значительными преимуществами.

Следует отметить, что проверка по потерям и отклонениям напряжения здесь не производилась, так как в примере [Л. 11] линия высокого напряжения не рассматривалась.

Литература

1. Руководящие указания по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1940.

2. Правила устройства электротехнических установок. Указания по проектированию электрических систем. Энергоиздат, 1947.

3. Дискуссия по проекту «Правил устройства электрических установок». Электричество, № 9, 1950.

4. Труды Первой всесоюзной научно-технической сессии по городским электрическим сетям. Изд. ЛОНИТОЭ, 1948.

5. Всесоюзная научно-техническая сессия по городским электрическим сетям. Электричество, № 9, 1948.

6. В. М. Хрущев. Рациональные основы проектирования электрических сетей. Техиздат УССР, 1932.

7. А. А. Глазунов. Определение сечений проводов воздушных линий и жил кабелей. Электричество, № 1946.

8. А. А. Глазунов. Сети электрических сетей. Госэнергоиздат, 1947.

9. Б. Л. Айзенберг. О рациональном построении городских электрических сетей. Электричество, № 2, 1932.

10. В. М. Хрущев. Электрические сети и линии. Госэнергоиздат, 1932.

11. М. Д. Каменский. Конфигурация электрических сетей и ее влияние на потери энергии и затраты металла. Электричество, № 9, 1938.

[20.4]



Защитная арматура высоковольтных линий электропередачи

Кандидат техн. наук, доц. Г. С. СОЛОДОВНИКОВ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

С сооружением крупных гидроэлектростанций на Волге и Днепре промышленность и сельское хозяйство нашей

страны будут ежегодно дополнительно получать свыше 20 млрд. квтч дешевой гидроэлектроэнергии. Для ее передачи и распределения потребуются построить тысячи километров высоковольтных линий электропередачи напряжением до 400 кв. Стоимость этих линий будет исчисляться сотнями миллионов рублей. Возникает необходимость в критическом анализе конструкций и элементов линий электропередачи для выбора их наилучшего типа.

Размеры и форма защитной арматуры гирлянд изоляторов оказывают существенное влияние на первоначальную стоимость и эксплуатационные качества линии. В настоящей работе сообщаются результаты исследований, проведенных автором совместно с группой научных сотрудников Ленинградского политехнического института под руководством А. А. Горева. В ней обосновываются положения для правильного выбора защитной арматуры линий различных напряжений [Л. 1, 2 и 3].

К защитной арматуре могут быть предъявлены следующие требования: 1) выравнивание распределения напряжения по гирлянде; 2) защита от каскадирования импульсного разряда; 3) отвод дуги промышленной частоты от гирлянды. От защитной арматуры одной и той же конструкции не требуется, чтобы она одновременно удовлетворяла всем перечисленным требованиям. В зависимости от характеристики линии, ее электрических параметров и условий работы одно из требований имеет преобладающее значение. Каждому требованию и должна удовлетворять защитная арматура данной линии.

Распределение напряжения по изоляторам гирлянды. Напряжение, приложенное к гирлянде, распределяется, как известно, неравномерно. На более нагруженном оказывается нижний, ближайший к проводу, элемент. На существующих линиях передачи 35...220 кв максимальные напряжения, приходящиеся на этот элемент, лежат в пределах 8...17 кв. При таких напряжениях,

Дан анализ и обоснование основных требований, которые должны предъявляться к защитной арматуре высоковольтных линий электропередачи различных напряжений. Статья печатается в порядке обсуждения.

как показывает опыт эксплуатации, линейные изоляторы работают достаточно надежно.

Однако до настоящего времени точно не установлена величина максимально допустимого на изолятор напряжения. Существовало мнение, что она определяется моментом появления видимой короны и равна 18...25 кв. Опыты, проведенные в лаборатории им. Смурова ЛЭТИ с индикатором частичных разрядов, показали, что на многих изоляторах корона нередко возникает при значительно меньших напряжениях, порядка 5...7 кв.

Корона на изоляторе может быть допущена, если ее интенсивность не превышает определенного предела. Интенсивная корона создает нежелательные радиопомехи и вредно воздействует на изоляторы и арматуру.

Радиопомехи, создаваемые короной на изоляторах, изучены мало. Нежелательность их очевидна.

Для решения вопроса о влиянии длительно приложенного напряжения на срок службы изоляторов, или, как принято говорить, на старение изоляторов, обратимся к опыту эксплуатации. Если напряжение, приходящееся на изолятор, играет решающую роль в старении, то, очевидно, максимальный процент выхода из строя должны давать первые от провода элементы, на которые падает наибольшее напряжение.

Анализ результатов измерений штангами 273 500 шт. линейных изоляторов в сетях Мосэнерго и 83 200 шт. в сетях Ленэнерго, проработавших 10—15 лет на линиях электропередачи 110 кв [Л. 3], показывает, что процент выхода из строя первых от провода элементов невелик (9...13% общего числа дефектных изоляторов). Следовательно, длительное воздействие номинального напряжения, повидимому, не оказывает существенного влияния на старение изоляторов.

Для исследования влияния на изоляторы длительно приложенного повышенного напряжения был сооружен специальный стенд. Каждый изолятор находился в естественных атмосферных условиях под напряжением от 10 до 60 кв. Более чем годичная эксплуатация стенда показала,

что напряжение 55...60 кВ, приходившееся на максимально нагруженные элементы, не вызвало заметного преждевременного старения изоляторов. Следовательно, можно не придавать особого значения непосредственному воздействию повышенного напряжения на фарфор изолятора.

На нижних поверхностях наиболее нагруженных изоляторов, у пестика, в местах максимальной короны быстро образовывался слой, имевший вид бурого налета. Это явление наблюдалось у всех изоляторов, работавших под напряжением от 35 до 60 кВ. Измерения показали, что этот слой является полупроводящим. Его появление выравнивает градиенты в точках коронирования и тем самым устраняет радиопомехи. Действительно, на изоляторах, имеющих слой, индикатор частичных разрядов регистрировал появление короны при 18...20 кВ. Удаление слоя путем обтирки приводило изолятор к исходному положению, при котором начальное коронное напряжение понижалось до 5...7 кВ.

Как видно из таблицы, полупроводящий слой, образующийся на поверхности изолятора, значительно снижает разрядное напряжение при промышленной частоте.

Снижение сухого и мокроразрядного напряжения изоляторов под влиянием образовавшегося налета

Тип изолятора	Сухоразрядное напряжение, кВ		Мокроразрядное напряжение, кВ	
	Чистый изолятор	Загрязненный изолятор	Чистый изолятор	Загрязненный изолятор
П-4,5	75	50—55	50	28—30
П-7	86	55—60	57	30—32

Под влиянием интенсивной короны на шапках и пестиках наиболее нагруженных изоляторов наблюдалось прогрессирующее разрушение оцинковки, выражающееся в потемнении и местной коррозии поверхности металла. Это подтвердилось имеющиеся в литературе указания, что образующиеся при короне озон и окислы азота могут разрушить металлические части изоляторов и крепежной арматуры.

Таким образом, величина допускаемого на нижний элемент напряжения определяется вредными воздействиями короны и опасностью сильных радиопомех. Для существующих типов изоляторов она лежит в пределах 25...30 кВ.

Измерения показывают, что напряжение, приходящееся на нижний элемент, может превысить эту величину на линиях электропередачи напряжением 220 кВ и выше. Поэтому только на этих линиях требуется применение защитной арматуры с целью выравнивания распределения напряжения по отдельным элементам гирлянды. На линиях передачи напряжением до 110 кВ включительно применять защитную арматуру, выравнивающую распределение напряжения по гирлянде, не требуется.

Защита от каскадирования импульсного разряда по гирлянде. При грозовых перенапряже-

ниях разряд по гирлянде может произойти по кратчайшему пути между крайними электродами гирлянды, или по поверхности каждого изолятора. В последнем случае разряд, как и обычно, называется каскадирующим. Каскадирование является нежелательным, так как возникает вследствие импульсного разряда дуга может вызвать повреждение отдельных изоляторов всей гирлянды.

Каскадирование может быть предотвращено, если время запаздывания разряда по поверхности наиболее нагруженного изолятора больше времени запаздывания разряда между крайними электродами гирлянды.

Увеличение времени запаздывания разряда по наиболее нагруженному изолятору достигается или увеличением диаметра фарфоровой тарелки, или применением изолятора такой конфигурации, при которой кривая запаздывания полагается возможно выше, или, наконец, увеличением числа изоляторов при неизменной общей длине гирлянды. Последнее мероприятие осуществляется путем применения изоляторов малой высоты и приводит к уменьшению напряжения, приходящегося на каждый изолятор.

Уменьшение времени запаздывания разряда между крайними электродами гирлянды достигается установкой защитной арматуры с определенным расстоянием, меньшим длины гирлянды.

Вопрос о влиянии размеров и конструкции изолятора на его электрические характеристики освещен в литературе очень мало. Однако исследования моделей изоляторов, проведенные в 1938—1939 гг. в лаборатории им. Смурова [1], показали, что каскадирование не должно иметь места, если отношение диаметра изолятора к высоте больше двух ($\frac{d}{h} > 2$).

Кроме того, с ростом этого отношения уменьшается общая длина гирлянды данной электрической прочности и, следовательно, удешевляются линейные конструкции.

К сожалению, это важное положение не нашло применения на практике. Пока приходится иметь дело только с одним типом изоляторов. Но следует отметить, что у выпускаемых в настоящее время изоляторов типа ПЦ отношение

приближается к 1,8 и, следовательно, более благоприятно, чем у старого типа П, у которого оно составляло около 1,5. Исследования в области разработки оптимального типа подвесного изолятора должны быть продолжены.

В качестве защитной арматуры, предупреждающей каскадирование импульсного разряда по гирлянде, обычно применяются рога и кольца устанавливаемые таким образом, чтобы расстояние между ними было меньше длины гирлянды. Однако вопрос о практическом создании защитной арматуры, надежно предотвращающей каскадирование импульсного разряда по гирлянде, решенным считать нельзя. Импульсные испытания различных гирлянд изоляторов, произведенные в лаборатории им. Смурова ЛЭТИ и высоко-

мальной лаборатории Ленэнерго [Л. 3 и 5], показали, что при существующих типах защитной аппаратуры на гирляндах изоляторов довольно легко возникает каскад как частичный, так и полный. Испытания показали также, что для надежной защиты гирлянды от каскадирования расстояние между электродами защитной аппаратуры должно составлять не более 60...65% длины гирлянды.

Столь малые размеры искрового промежутка приводят к значительному уменьшению разрядного напряжения гирлянды. Чтобы избежать уменьшения разрядного напряжения ниже заданной величины, необходимо значительное увеличение числа изоляторов в гирлянде. Таким образом, установка аппаратуры, защищающей от каскадирования, вызывает дополнительные затраты на оборудование линии.

Применяемая в настоящее время защитная аппаратура не защищает гирлянды от каскадирования, так как расстояние между электродами аппаратуры выбирается обычно не более 0,8...0,85 длины гирлянды.

Из приведенных соображений вытекает, что требование к защитной аппаратуре о предотвращении каскадирования во всех случаях является необоснованным. Для линий 220 кВ и выше это требование практически невыполнимо вследствие чрезмерно больших размеров защитной аппаратуры. Кроме того, высокий защитный уровень линий 220 кВ, защищенных тросом, делает маловероятной возможность появления разрядов, вызванных импульсными разря-

дами. Для линий электропередачи 110 и 35 кВ аппаратура, защищающая от каскадирования, необходима лишь в тех случаях, когда возникающая на ней импульсный разрядом дуга промышленной частоты может вызвать повреждения изоляторов.

На линиях 110 и 35 кВ применение аппаратуры, предотвращающей каскадирование, обязательно на металлических опорах ответственных переходов (через реки, железные дороги и др.). Во всех остальных случаях это требование не имеет достаточных обоснований.

Вывод дуги промышленной частоты от гирлянды. Причины, вызывающие образование дуги промышленной частоты, перекрывающей гирлянду, весьма различны.

Она может вызвать повреждения изоляторов аппаратуры, а в некоторых случаях провода. Степень повреждения определяется термическим эффектом действия дуги, т. е. длительно-воздействия дуги и током. Опасность повреждения в ряде случаев требует установки защитной аппаратуры, быстро отводящей дугу от гирлянды.

Вопрос о целесообразности установки защитной аппаратуры может быть решен на основании анализа влияния ряда факторов на повреждаемость изоляторов дугой. Рассмотрим основные из

них. При малых токах тепловое воздействие дуги на изоляторы незначительно, но также невелико и электродинамическое действие. Следовательно, дуга может устойчиво держаться на гирлянде. При больших токах тепловое воздействие возрастает, но вместе с тем возрастает и скорость выдувания дуги под действием электродинамических сил.

Большинство испытаний показывает, что заметного влияния тока на повреждаемость изоляторов, по крайней мере, в пределах 400...1500 А обнаружить не удалось. К сожалению, большая часть исследований велась с токами порядка 600...1000 А. Поэтому о степени влияния больших токов определенного заключения сделать нельзя [Л. 6, 7 и 8].

Опыт эксплуатации также не дает твердо установившейся закономерности, он скорее показывает, что большее значение имеет скорость отключения возникшей дуги.

2. Влияние скорости отключения дуги. Исследования защитных аппаратур в большинстве случаев показывают, что возникшая дуга промышленной частоты сравнительно медленно отходит от гирлянды и в некоторых случаях может вызвать повреждение изоляторов.

Наблюдавшаяся при опытах с дугой большая повреждаемость первых от провода изоляторов объясняется главным образом тем, что дуга на нижних изоляторах держится устойчиво, в то время как вверху она часто переходит на траверзу, только временами возвращаясь обратно на защитную аппаратуру или шапку изолятора.

Влияние скорости отключения линии на повреждаемость изоляторов силовой дугой можно проследить на опыте работы Свирской линии напряжением 220 кВ, работавшей некоторое время без тросов и подвергавшейся частым грозозым отключениям [Л. 3]. Время действия земной защиты этой линии менялось от 0,5 до 1,2 сек и в соответствии с этим число поврежденных изоляторов, отнесенное к одному отключению, увеличивалось с 10...12 до 18...24 шт. Интересно отметить, что при этих временах отключения полного разрушения изоляторов не наблюдалось, а все повреждения носили характер более или менее значительных ожогов глазури.

Увеличение повреждаемости изоляторов с уменьшением скорости отключения линии подтверждается также опытом эксплуатации линий 36 и 110 кВ.

Влияние скорости отключения линии на повреждаемость изоляторов обусловлено тем, что время отхода дуги от гирлянды больше или приблизительно равно времени отключения линии. Оценивая на основании результатов испытаний время отхода дуги от гирлянды в 0,8—1,2 сек, можно сделать вывод, что если время отключения линии меньше 0,8 сек, то устанавливать дугоотводящую защитную аппаратуру нецелесообразно.

Время отключения линий электропередачи 220 кВ обычно меньше времени отхода дуги от гирлянды, поэтому устанавливать дугоотводя-

Влияние тока дуги. Зависимость между током дуги и вероятностью повреждения изолято-

щую арматуру на этих линиях нет необходимости. Тем более в этом нет необходимости на линиях более высоких напряжений, время отключения которых будет еще меньше.

На линиях электропередачи 110 и 35 кВ необходимость установки дугоотводящей защитной арматуры должна определяться в каждом отдельном случае, в зависимости от скорости отключения линии.

Следует отметить, что вопрос о так называемой дугостойкости изоляторов требует экспериментального исследования.

3. Тип защитной арматуры и ее форма. До последнего времени существовало мнение о превосходстве кольцевой защитной арматуры. Считалось, что при наличии рогов защитное действие ограничивается только одной плоскостью, тогда как кольцевая защитная арматура обеспечивает надежную работу во всех вертикальных плоскостях.

Исследования, проведенные в этой области германскими изоляторными заводами [Л. 8 и 9], опровергли эту точку зрения. Они показали, что дуга, горящая между защитными арматурами изоляторов в подвесной гирлянде, имеет в нижней и верхней своих частях сжатые почти прямолинейные участки, постепенно переходящие в развевашуюся, пламеобразную среднюю часть дуги.

Сжатые прямолинейные участки дуги и их основания являются самыми раскаленными и самыми опасными частями дуги. Устойчивое положение опорной точки дуги на краю шапки изолятора или вблизи тела изолятора может явиться причиной повреждения фарфора изолятора. Поэтому основания дуги должны быть как можно скорее отведены от нижнего и верхнего изоляторов применением соответствующей защитной арматуры.

Средняя часть дуги из-за термических усилий обычно быстро отходит от гирлянды.

В результате опытов, опубликованных Циглером [Л. 9], было установлено, что кольцевая защитная арматура не способствует отводу от гирлянды дуги промышленной частоты. Для выяснения физической стороны этого явления рассмотрим действие сил, заставляющих дугу отойти от гирлянды.

Если оставить без внимания внешние силы (ветер, дождь), то на положение дуги оказывают влияние электростатические, электромагнитные и термические силы. Электростатические силы при токах в несколько ампер оказываются настолько малыми по сравнению с электромагнитными и термическими силами, что практически ими можно пренебречь. Действие термических сил, создаваемых восходящими потоками нагретого дугой воздуха, примерно одинаково как в случае кольцевой, так и в случае роговой защитной арматуры. Следовательно, причину разницы в действии двух типов защитной арматуры следует искать в различии величины электромагнитных сил.

Рассматривая дугу, горящую на рогах, как часть контура с односторонним питанием, мы на основании известного взаимодействия между маг-

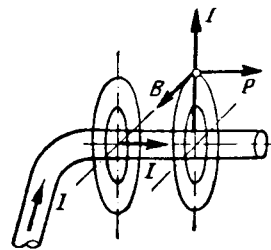


Рис. 1. Распределение электромагнитных сил, действующих на дугу, при роговой форме защитной арматуры.

нитным полем и током получим схему, изложенную на рис. 1.

Электромагнитная сила P , действующая в направлении оси рога, будет стремиться изменить площадь контура таким образом, чтобы учесть охватываемый им поток. Следовательно влиянием силы P дуга, как подвижная часть контура, будет перемещаться к концу рога. Движение дуги будет продолжаться до тех пор, пока стержень дуги не повернется по оси рога, являясь как бы его продолжением. Так как в непосредственной близости к рогу, то и малая величина электромагнитной силы будет у краев роговой арматуры. Затем она будет стремиться падать вместе с падением плотности тока в стержне дуги, сохраняя в средней части дуги незначительную величину.

В кольцевой защитной арматуре имеем более сложную картину. К точке основания дуги ток подводится с двух противоположных сторон (рис. 2,а). Если представить себе кольцевую арматуру разрезанной в точке основания дуги на две части и рассмотреть раздельное действие токов I_1 и I_2 , то мы получим схему, показанную на рис. 2,б.

В левой части полукольца действует сила, стремящаяся сдвинуть дугу вправо, а в правой части — сила P_2 , стремящаяся сдвинуть дугу влево. Результирующая сила $P_1 - P_2$ или $P_2 - P_1$, зависящая от токов I_1 и I_2 , будет той результирующей силой, которая будет стремиться сместить опорную точку дуги и сжать дугу в направлении преобладающей стороны тока. Такое передвижение дуги обусловит изменение токов I_1 и I_2 , величины которых определяются положением опорной точки дуги на защитной арматуре. Перемещение дуги будет продолжаться до полного уравнивания сил P_1 и P_2 , которое произойдет в результате уравнивания обеих составляющих I_1 и I_2 , в сумме составляющих полный ток в дуге I .

Таким образом, в кольцевой защитной арматуре вследствие самокомпенсации электромагнитных сил, возникающих из-за двустороннего питания током дуги, обнаруживается отсутствие радиально направленных сил, стремящихся отвести дугу от гирлянды. Дуга будет гореть устойчиво, точка основания дуги будет малоподвижна, а стержень дуги будет направлен по оси гирлянды.

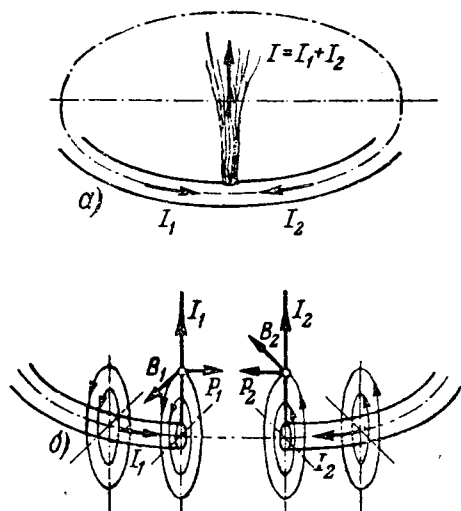


Рис. 2. Распределение электромагнитных сил, действующих на дугу, при кольцевой форме защитной арматуры.

Дугоотводящая защитная арматура должна являться в виде рогов или разрезных колец, спечивающих односторонний подвод тока. Рогов, как явствует из сказанного выше, определяют направление наиболее опасных опасных участков дуги. Поэтому они должны быть так направлены, чтобы обеспечить отвод от гирлянды.

Выводы. 1. Линии передачи 220 кВ и выше. Установка защитной арматуры необходима только для выравнивания распределения напряжения на гирлянде и уменьшения электрической нагрузки на первых элементах от провода.

Установка защитной арматуры, предупреждающей каскадирование импульсного разряда по яндре, нецелесообразна, так как при высоком уровне этих линий вероятность импульсного разряда при прямом ударе молнии крайне мала. Установка защитной арматуры, отводящей гирлянды дугу, также нецелесообразна, потому что при существующих временах отклю-

чения линий этого напряжения время отхода возникшей дуги от гирлянды будет больше, чем время отключения линии.

2. Линии передачи 110 и 35 кВ. Линии передачи на деревянных опорах установки защитной арматуры не требуют.

Линии передачи на металлических опорах требуют применения защитной арматуры для отвода дуги промышленной частоты в целях предохранения изоляторов и провода от повреждения только при больших временах отключения линии.

Металлические переходные опоры требуют установки дугоотводящей и предотвращающей каскадирование арматуры, которая бы полностью исключала возможность образования дуги на гирляндах пересекающего пролета.

Литература

1. Отчеты о работах по исследованию оптимальных форм изоляторов и защитных арматур. Бюро куйбышевских работ при Ленинградском политехническом институте, 1938, 1939 и 1940 гг.
2. К. С. Архангельский и Г. С. Солодовников. Защитная арматура изоляторов. Электрические станции, № 12, 1939.
3. Г. С. Солодовников. Защитная арматура гирлянд изоляторов высоковольтных линий передачи. Диссертационная работа на соискание ученой степени канд. техн. наук. Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина), 1946.
4. А. Н. Власов и К. С. Архангельский. Исследования изоляторов на моделях. Отчет лаборатории им. проф. Смурова, Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина).
5. А. В. Калантаров и П. Л. Краснов. Импульсный каскадный разряд на гирляндах изоляторов с защитной арматурой. Электричество, № 2, 1938.
6. Защитные арматуры изоляторов при мощных дугах. Отчет высоковольтной лаборатории Ленэнерго, 1935.
7. K. Draeger. Rosenthal Mitteilungen, 1928, 1929, 1930, 1931.
8. F. Obenaus. Lichtbogen. Vollschatz von Langstab, Isolatoren Gemeinschaftsarbeit der Firmen BBC, Hescho, Rosenthal und Stemag, 1943.
9. H. Ziegler. Neue Erkenntnisse über den Lichtbogenschatz von Freileitungsisolatoren, ETZ, 1941.

[11.4.1951]



Импульсный метод определения повреждений в кабелях

Кандидат физ.-матем. наук А. Я. УСИКОВ и инж. И. Х. ВАКСЕР

Физико-технический институт Академии наук СССР

Несмотря на значительный практический интерес, применение импульсного метода ограничивается в основном линиями связи и воздушными линиями электропередачи. Для исследования кабельных линий импульсный осциллографический метод почти не применяется вследствие недостаточной точности отсчета расстояния до места повреждения. Причинами этого являются значительное затухание и деформации зондирующих импульсов, а также различная скорость распространения импульсов на отдельных участках при неоднородной трассе.

При небольшой протяженности и малом сопротивлении проводов силовых кабелей затухание и деформация зондирующих импульсов сравнительно невелики; поэтому основным затруднением на пути применения импульсных приборов в этом случае является требование высокой абсолютной точности измерения расстояний.

При восстановлении поврежденных кабелей крайне желательно ограничиться одной раскопкой длиной в несколько метров. Это означает, что точность отсчета расстояния до места повреждения кабельной линии должна быть значительно больше точности, которую дают обычные импульсные приборы, применяемые для исследования воздушных линий [Л. 1].

В связи с тем, что разрешающая способность импульсного прибора может быть сделана достаточно высокой, основной задачей при конструировании прибора, пригодного для исследования силовых кабелей, является разработка масштабного устройства, обеспечивающего необходимую точность отсчета.

Разрешающая способность импульсных приборов связана с затуханием и деформацией зондирующих импульсов, зависит от метода их фиксации и поэтому определяется соотношением между сигналами на входе и выходе изучаемой линии, т. е. спектральными или частотными характеристиками линии и зондирующих импульсов, а также свойствами схемы импульсного прибора. Вопросы, связанные со спектральными характеристиками, как известно, решаются

Дано описание импульсного прибора, позволяющего определять место повреждения силовых кабелей с точностью до нескольких метров.

на основе метода интеграла Фурье [Л. 2].

В случае силовых кабелей вопрос о длине

ности зондирующих импульсов может быть решен в результате рассмотрения условий распространения импульсов вследствие сглаживающего действия поверхностного эффекта на фронты напряжения.

Как известно [Л. 3], напряжение распространяющейся волны в любой точке x бесконечной линии может быть выражено следующим образом:

$$U(x, p) = U_0 e^{-\gamma x}.$$

С учетом поверхностного эффекта коэффициент распространения

$$\gamma = \frac{p}{v} + \beta + \delta \sqrt{p}.$$

Тогда искомое напряжение продвигающейся волны в данной линии

$$U(x, p) = U_0 e^{-\frac{p}{v}x} e^{-\beta x} e^{-\delta x \sqrt{p}}$$

или в функции времени

$$U(x, t) = U_0 e^{-\beta x} \left[1 - \Phi \left(\frac{\delta x}{2 \sqrt{t - \frac{x}{v}}} \right) \right],$$

где $t > \frac{x}{v}$,

$$\beta = \frac{R}{8} \sqrt{\frac{C}{L}} \left(1 - \frac{\mu}{2\pi L} \right),$$

$$\delta = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{C}{L}} \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}},$$

$$R = \frac{2\rho}{\pi a^2} = \frac{2}{\pi a^2 \sigma},$$

$$\Phi \left(\frac{\delta x}{2 \sqrt{t - \frac{x}{v}}} \right) = \Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy.$$

(функция Кра

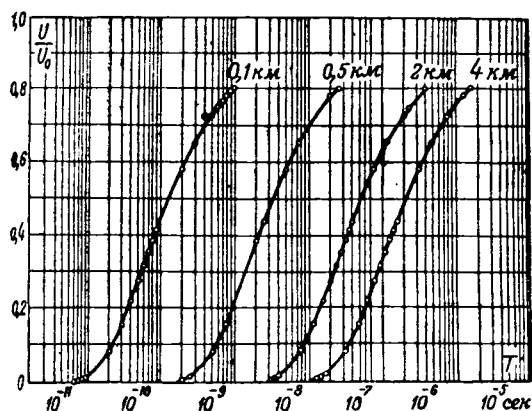


Рис. 1.

Выражение (1) позволяет определить деформацию и затухание продвигающейся волны напряжения относительно первоначального отскока фронта в функции расстояния однородного кабеля и вычислить минимальную длительность зондирующего импульса, необходимого для перетяжки исследуемой трассы кабеля.

Для расчета и построения графиков, выражающих сглаживание фронта продвигающейся волны напряжения, и для определения минимальной длительности прямоугольных импульсов, перекрывающих трассу кабеля, в выражении (1) удобно ввести новую переменную $\tau = \frac{x}{v}$, где τ — время, протекшее с момента течения фронтом продвигающейся волны матриваемой точки x кабельной линии. да напряжение фронта волны

$$U(x, t) = U_0 e^{-\beta x} \left[1 - \Phi \left(\frac{\delta x}{2\sqrt{\tau}} \right) \right]. \quad (2)$$

Прямоугольный импульс напряжения с амплитудой U_0 и длительностью T можно представить как результат включения постоянного напряжения U_0 в момент времени $t = 0$ и выключение его в момент времени $t = T$. Последнее достигается путем включения равного по величине и обратного по знаку напряжения U_0 в момент времени $t = T$. Тогда форма импульса в любом месте кабеля с учетом выражения (2) может определяться следующим образом:

$$U(x, \tau) = U_0 e^{-\beta x} \left[\Phi \left(\frac{\delta x}{2\sqrt{\tau - T}} \right) - \Phi \left(\frac{\delta x}{2\sqrt{\tau}} \right) \right]. \quad (3)$$

На рис. 1 в логарифмическом масштабе представлено рассчитанное по формуле (2) изменение фронта прямоугольной волны напряжения в функции расстояния и времени для силового однородного кабеля типа СБ-1000. Эти кривые могут использоваться для определения продолжительности зондирующих импульсов, с помощью которых могут быть исследованы отрезки силовых кабелей протяженностью от 50 до 4000 м без изменения усиления для отраженных сигналов.

Если, например, принять, что амплитуда подаваемого импульса с отвесным фронтом $U_0 = 100$ в и что отраженный сигнал, равный 20 —

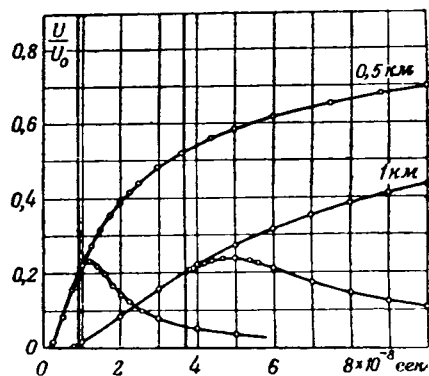


Рис. 2.

25% U_0 , гарантирует отчетливое наблюдение грубых повреждений в силовом кабеле, то для исследования кабелей длиной $l = 250$ м ($x = 500$ м) продолжительность зондирующих прямоугольных импульсов должна быть порядка $T \approx 10^{-8}$ сек; соответственно для $l = 2$ км ($x = 4$ км), $T \approx 6 \times 10^{-7}$ сек.

На рис. 2 показана деформация фронта прямоугольной волны напряжения, а также форма и длительность импульсов, рассчитанных по формуле (3) для расстояния 500 и 1000 м от места «посадки» их в кабеле. Продолжительность импульса, измеренного у основания (концом импульса принята величина сигнала, равная 2—3% U_0), для $x = 500$ м ($l = 250$ м) равняется $T \approx 6 \cdot 10^{-8}$ сек и для $x = 1000$ м ($l = 500$ м) $T \approx 3,0 \cdot 10^{-7}$ сек.

Сопоставление этих данных с величиной допустимой погрешности при определении расстояния до места повреждения кабеля позволяет сформулировать определенное требование к схеме развертки прибора, а именно: для того чтобы линейные размеры импульса у основания на экране осциллографа были не меньше 20 мм, скорость записи сигналов, отраженных с расстояния 250—300 м, должна быть порядка $5 \cdot 10^7$ см/сек. Заметное перемещение такого импульса на экране составляет около 2 мм, что соответствует 2—3 м трассы кабельной линии.

Такая скорость развертки легко может быть достигнута. Поэтому задача создания импульсного прибора, пригодного для исследования силовых кабелей, сводится к разработке простого и практически надежного масштабного устройства, позволяющего измерять расстояние с необходимой точностью.

Схемы для получения импульсных токов и приборы для измерения их длительности, которыми располагает радиолокационная техника, могут быть использованы при исследовании линий электропередачи и кабелей. Но схемы импульсных приборов, предназначенных для этой цели должны быть, как показывает опыт, возможно более простыми.

На рис. 3 представлен один из вариантов схемы импульсного прибора для получения зондирующих импульсов напряжения и синхронизированного с ними напряжения развертки. Начало и

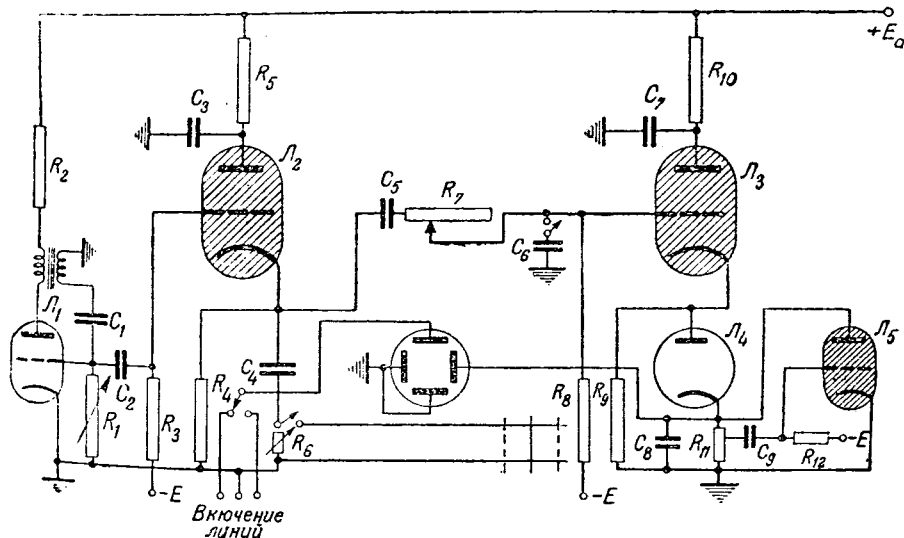


Рис. 3.

скорость развертки можно регулировать в широких пределах. Поэтому запись зондирующих и отраженных импульсов производится на любой скорости, в том числе и на предельной, равной крутизне фронта анодного тока тиратрона Λ_1 .

Схема (рис. 3) обеспечивает высокую разрешающую способность импульсного прибора и является пригодной для исследования силовых и высокочастотных кабелей как в лабораторных, так и в полевых условиях.

При условии тщательного выполнения монтажа схемы можно, используя максимальную крутизну анодного тока тиратрона Λ_2 , получать на сопротивлении R_6 остроконечные импульсы напряжения длительностью у основания от 10^{-7} сек (при амплитуде порядка 500—600 в) до 10^{-8} сек (при амплитуде около 100 в). Применяя затем метод зеркального наложения прямого и отраженного импульсов от короткозамкнутого конца линии длиной 300...30 см (рис. 3), можно получить двухполярные импульсы с длительностью первой полуволны от 10^{-8} до $2 \cdot 10^{-9}$ сек. Эти импульсы могут быть использованы для исследования отрезков силовых и высокочастотных кабелей длиной в несколько десятков метров.

На рис. 4 представлена осциллограмма, полученная при исследовании коаксиального кабеля длиной 26 м. Из осциллограммы видно, учитывая соотношение между длительностью импульсов



Рис. 4.

у основания и расстояние между ними, что продолжительность импульсов не превышает $2,5 \cdot 10^{-8}$ сек.

Сложность масштабных устройств, применяемых в радиотехнике, как известно, возрастает по мере увеличения точности, с которой требуется производить измерения. Поэтому их применение в приборах для исследования кабелей вряд ли может считаться целесообразным.

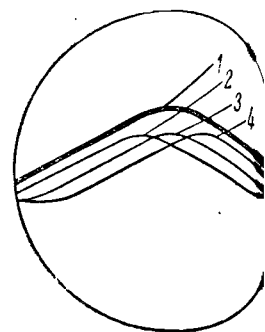


Рис. 5. Схематическое изображение импульсов, отраженных:

1 — от места обрыва кабеля; 2 — от конца эталонной линии, которая 5 м короче кабеля; 3 — от конца эталонной линии, совпадающей по длине с кабелем; 4 — от конца эталонной линии, которая на 5 длиннее кабеля.

Авторы применили метод эталонов, при котором измерение расстояния до места повреждения производится путем сравнения осциллограмм кабеля с осциллограммами эталонных линий. Эталонные линии представляют собой набор катушек, изготовленных из отрезков двухжильного провода с хлорвиниловой изоляцией длиной 1...500 м.

Расстояние до места повреждения измеряется путем подбора отрезков эталонных линий аналогично подбору сопротивления в мостиковой схеме. При помощи обычного переключателя или электронного коммутатора на экран осциллографа поочередно подаются две осциллограммы: 1) от изучаемого кабеля, 2) от эталонных линий. В начале длина эталонных линий подбирается грубо, так, чтобы осциллограммы кабеля и этих линий совпали приблизительно. Затем, пользуясь задержкой начала развертки, ее скорость увеличивают настолько, чтобы в пределах экрана помещался только отраженный импульс (нижняя часть его). Более точное совпадение осциллограмм достигается путем более точного подбора длины эталонных линий.

На рис. 5 жирной линией схематически изображен отраженный импульс от обрыва в кабеле на расстоянии около 250 м, а тонкими — отраженные импульсы от концов эталонных линий.

Отсчет, полученный по эталонному масштабу, необходимо умножить на соответствующий изучаемому кабелю коэффициент, который заранее известен¹ и характеризует отношение скоростей распространения импульсных токов в изучаемом кабеле и эталонных катушках.

Как показывает опыт, описанное масштабное устройство является достаточно простым и обеспечивает высокую степень точности при определении расстояния до места повреждения кабеля.

На рис. 6 представлено изображение передней панели описанного импульсного прибора с масштабным устройством, пригодным для исследова-

¹ Коэффициенты для каждого типа кабеля могут быть определены по описанному выше методу на кабелях известной длины.

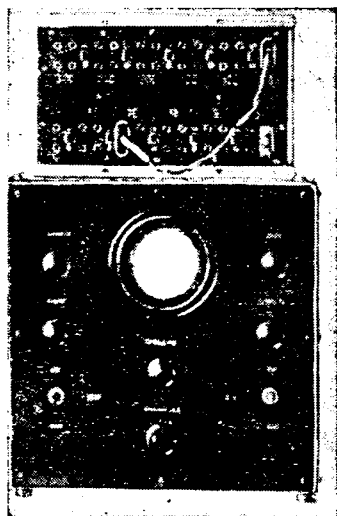


Рис. 6.

ния силовых кабелей протяженностью до 100 м.

Первые испытания прибора, проведенные в мае и августе 1948 г. на одножильных силовых кабелях сечением 310 мм² показали, что ошибка измерений колеблется от +10 до -12 м. Однако после улучшения масштабного устройства определение расстояния до места повреж-

Таблица 1

Тип кабеля	Расстояние до повреждения, измеренное прибором, м	Расстояние до повреждения, измеренное по трассе после вскрытия, м	Ошибка измерения, м
Одножильный сечение 310 мм ² . . .	170	166	4
Одножильный сечение 100 мм ² . . .	620	617	3
Одножильный сечение 310 мм ² . . .	620	615	5
Одножильный сечение 310 мм ² . . .	550	545	5

■ в силовых кабелях производится с ошибкой, не превышающей 4—5 м. Это видно из данных Харьковского трамвайно-троллейбусного управления³, приведенных в табл. 1.

³ По формулам (2) и (3) были рассчитаны распылочно-прямоугольного фронта волны напряжения и деформирующихся импульсов в двухпроводной линии масштабного устройства и, таким образом, был определен оптимальный размер сечения провода для масштаба. Данная работа была проведена по инициативе Харьковского трамвайно-троллейбусного управления.

Постоянство знака ошибки указывает на возможность дальнейшего увеличения точности прибора, при которой место повреждения будет обнаруживаться в результате одной раскопки на трассе.

В табл. 2 приведены данные Харьковского трамвайно-троллейбусного управления о результатах применения прибора на кабелях типа СБ-1000 в 1950 г.

Таблица 2

Сечение, мм ²	Общая протяженность, м	Расстояние до повреждения по прибору, м	Расстояние до повреждения, измеренное после вскрытия, м	Ошибка измерения, м	Характер повреждения
310	2 181	170	166	-4	Короткое замыкание
100	706	620	617	-3	Короткое замыкание
100	706	690	691	+1	Короткое замыкание
310	674	620	615	-5	Короткое замыкание
310	674	550	545	-5	Короткое замыкание
310	1 061	820	807	-13	Короткое замыкание
310	550	340	338	-2	Обрыв (переходное сопротивление 20 мгом)
310	1 730	270	264	-6	Короткое замыкание
150	870	25	20	-5	Короткое замыкание

Описанный прибор не был испытан на многожильных высоковольтных кабелях. Однако и в этих случаях, как это следует из расчетных данных, можно ожидать высокой точности при значительно больших расстояниях до места повреждения. Предельная длина этих кабелей, на трассе которых можно определить место повреждения с точностью в несколько метров, приблизительно пропорциональна корню квадратному из числа киловольт рабочего напряжения кабеля.

Следует заметить, что применение усиления для отраженных сигналов позволит определять с достаточной точностью микроструктуру неоднородностей в кабелях, в частности в высокочастотных коаксиальных кабелях.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность Е. М. Белецкому за помощь при проведении измерений.

Литература

1. Я. Л. Быховский и В. Л. Бакиновский. Импульсные измерения линий электропередачи и электро-связи. Госэнергоиздат, 1949.
2. С. М. Евтянов. Переходные процессы в приемно-усилительных схемах. Связьтехиздат, 1948.
3. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергоиздат, 1948.

[17.1. 1951]



Опытное определение параметров синхронных машин по кривым затухания

Кандидат техн. наук В. А. СМЕРНОВ

Академия им. Крылова

Известно много способов опытного определения параметров синхронных машин, однако большинству органически присущи те или иные весьма существенные недостатки, ограничивающие возможность использования или приводящие к значительной неточности определения параметров. Например, определение параметров по продольной оси путем осциллографирования внезапного трехфазного короткого замыкания требует много времени на обработку осциллограмм и связано с отсчетами по приборам токов в фазах синхронного генератора для определения масштабов, что неизбежно приводит к заметным погрешностям. Еще большие погрешности вводятся при графической обработке осциллограмм. Точность определения параметров почти по всем известным способам зависит непосредственно от класса точности используемых приборов; число приборов, используемых в измерениях, бывает обычно не менее двух. В опытах по определению параметров питание осуществляется от городской сети, напряжение которой часто изменяется в существенно заметных пределах, что также не может не отразиться на точности результатов. Следует также отметить, что известные способы опытного определения параметров не имеют единой объединяющей их идеи и при необходимости определения всех основных параметров синхронной машины необходимо собрать несколько схем, что также связано с большой тратой времени.

В статье предлагается метод опытного определения основных параметров синхронной машины, лишенный этих недостатков и позволяющий быстро и достаточно точно определить параметры по кривым затухания свободных токов.

Основными следует считать параметры: x_d — синхронная реактивность по продольной оси; x'_d — переходная реактивность по продольной оси; x''_d — сверхпереходная реактивность по продольной оси; x''_q — сверхпереходная реактивность по поперечной оси; x_2 — реактивность обратного

Предлагается метод опытного определения основных параметров синхронной машины, достаточно точный и экономичный.

следования фаз; x реактивность нуле; следования фаз; T постоянная времени

мотки возбуждения при разомкнутом як T'_{d3} — постоянная времени обмотки возбужде при замкнутом накоротко якоре; T'_{d2} и T'_{d1} — то но при двухфазном и однофазном замыка $T_{a3}=T_{a2}=T_{a1}$ — постоянные времени затуха апериодических токов в якоре.

Сущность метода заключается в следую

Исходя из общеизвестных формул для стоянных времени синхронной машины

$$\left. \begin{aligned} T'_{d3} &= T_{d0} \frac{x'_d}{x_d}, \\ T'_{d2} &= T_{d0} \frac{x'_d + x_2}{x_d + x_2}, \\ T'_{d1} &= T_{d0} \frac{x'_d + x_2 + x_0}{x_d + x_2 + x_0}, \\ T_a &= T_{a3} = T_{a2} = \frac{x_2}{2\pi f r_1} \end{aligned} \right\}$$

и зная величины этих постоянных времени, найденные опытным путем с помощью осциллографирования, а также сопротивление статора можно, пользуясь четырьмя выражениями, определить неизвестные x_d , x'_d , x_2 и x_0 . Если постоянную времени T_a представить в виде полусуммы постоянных времени для апериодических токов якоря по продольной и поперечным осям

$$T_a = \frac{T_{aq} + T_{ad}}{2} = \frac{x''_q + x''_d}{2\pi f \cdot 2r_1} = \frac{x_2}{2\pi f r_1},$$

где

$$T_{ad} = \frac{x''_d}{2\pi f r_1}, \quad \text{а} \quad T_{aq} = \frac{x''_q}{2\pi f r_1},$$

то, зная T_{ad} и T_{aq} , можно легко определить также и x_d и x'_d .

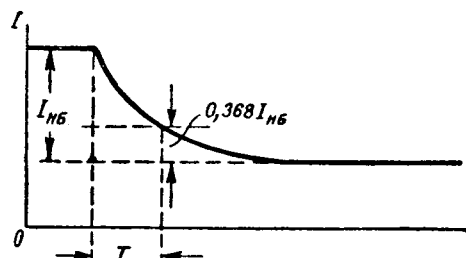


Рис. 1.

Таким образом, для определения интересующих нас реактивностей достаточно найти опытным путем постоянные времени T_{d0} , T'_{d3} , T'_{d2} , T_{ad} , T_{aq} и τ_1 ; при этом станут известны значения постоянных времени и реактивностей. Перечисленные выше постоянные синхронной машины определяются по осциллограммам затухания свободных токов либо непосредственно, либо с помощью перестроения кривых затухания тока возбуждения $I_{НБ}$ на полулогарифмической бумаге (рис. 1 и 2).

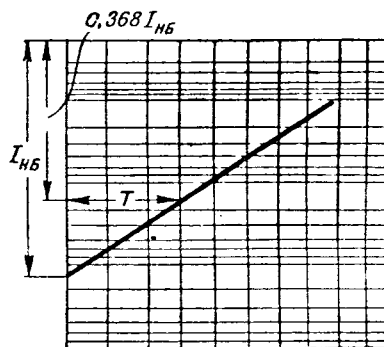


Рис. 2.

снять две одинаковые осциллограммы и затем провести нулевую линию по установившимся после затухания линиям токов.

Для более быстрого определения постоянных времени лучше использовать непосредственно осциллограммы (рис. 1). При определении параметров при насыщении следует предпочесть перестроение кривых, подобно тому как показано на рис. 2.

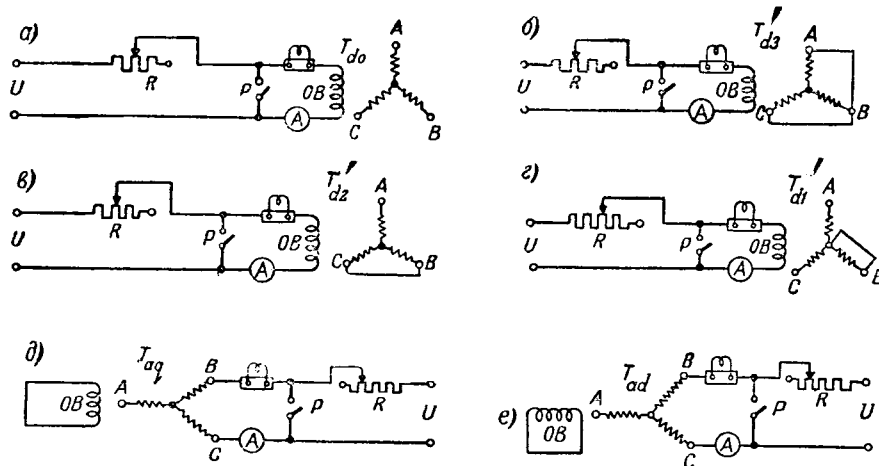


Рис. 3.

Осциллографирование кривых затухания производится соответственно постоянным времени по схемам а—е рис. 3.

Осциллограммы затухания тока возбуждения для определения T'_{d2} и T'_{d1} получаются подобно изображенной на рис. 4. На постоянную составляющую тока возбуждения накладывается переменный ток двойной частоты, вызванный вращением потока статора. Поэтому для определения T'_{d2} и T'_{d1} проводится средняя между полуволнами линия — линия изменения постоянной составляющей тока возбуждения, которая и используется для определения постоянной времени одним из указанных выше методов.

Следует обратить внимание на то, чтобы на осциллограмме была возможно более точно установлена нулевая линия, отчего зависит точность установления параметров. Опыт показал, что для правильного ее определения лучше всего

Из рис. 3 видно, что для определения всех названных постоянных времени необходимо, по существу, применить только две совершенно подобные схемы, в первой из них (а, б, в, г) от источника постоянного тока (например, от возбuditеля) питается обмотка возбуждения, а во второй (д, е) — соединенные последовательно две фазы якоря. Каждый раз осциллографируется затухание тока в обмотке возбуж-

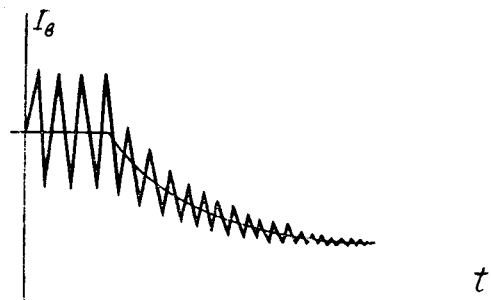


Рис. 4.

дения или в фазах статора при замыкании этих обмоток накоротко с помощью рубильника P . При определении T_{d0} , T'_{d3} , T'_{d2} , T'_{d1} ротор синхронной машины вращается с синхронной скоростью, а при определении T_{ad} и T_{aq} он неподвижен и установлен в одном случае так, чтобы с направлением магнитного поля статора совпала продольная ось ротора, а в другом — поперечная.

Установка ротора машин небольшой мощности продольной осью по направлению магнитного поля может быть легко произведена кратковременным увеличением постоянного тока через две фазы обмотки статора до такого значения, при котором вращающий момент, действующий на ротор, будет в состоянии преодолеть силы трения и повернуть ротор в положение максимальной магнитной проводимости для потока статора (рис. 3, *е*). Для определения T_{aq} ротор поворачивается вручную на 90 электрических градусов относительно предшествовавшего положения.

Для определения x'_d и x'_q может быть применен и другой, более точный способ, аналогичный предложенному В. В. Енько, М. И. Земляным и Л. Г. Мамиконяном [Л. 1], не требующий поворота ротора и применимый при любом его положении, а именно: снимаются три осциллограммы затухания тока в каждой паре фаз статора (схемы аналогичны схемам *д* и *е* рис. 3), но при любом одном и том же положении ротора, по которым определяются: T_{AB} , T_{BC} , T_{CA} . Тогда

$$x'_{AB} = 2\pi f r_1 T_{AB}; \quad x'_{BC} = 2\pi f r_1 T_{BC};$$

$$x'_{CA} = 2\pi f r_1 T_{CA};$$

$$x'_{med} = \frac{x'_{AB} + x'_{BC} + x'_{CA}}{3};$$

$$\Delta x'' = 0,667 \times \sqrt{x'_{AB}(x'_{AB} - x'_{BC}) + x'_{BC}(x'_{BC} - x'_{CA}) + x'_{CA}(x'_{CA} - x'_{AB})};$$

$$x''_d = x'_{med} - \Delta x'';$$

$$x''_q = x'_{med} + \Delta x''.$$

При больших исходных токах I_{HB} ротор машины следует затормозить во избежание его поворота при опыте.

Исходные перед замыканием рубильника токи при всех трех опытах должны быть одинаковыми. Это требование вызвано тем, что величина реактивности по поперечной оси x'_q , а вместе с ней и x'_{AB} , x'_{BC} и x'_{CA} меняются в зависимости от исходной величины тока I_{HB} . Реактивность же по продольной оси x'_d от тока практически не зависит.

Поэтому при определении x'_q и x_2 можно иметь в виду какое-то вполне определенное значение тока, для которого определяются эти параметры, либо снять несколько точек различных токов и построить опытные кривые $x_2 = f_1(I)$ и $x'_q = f_2(I)$ с тем, чтобы в дальнейшем пользоваться ими. Характер этих кривых показан на рис. 5. Величина необходимого постоянного тока I_{HB} в опытах должна быть равна действующему значению тока, для которого определяются T_a , x'_q и x_2 .

Установив одним из описанных методов x'_d , x'_q и вычислив $x_2 = \frac{x'_d + x'_q}{2}$ для номинального тока, можно, пользуясь (1) и T_{d0} , T'_{d3} , T'_{d2} , T'_{d1} , найти x_d , x'_d и x_0 :

$$x_d = \frac{x_2 (T_{d0} - T'_{d2})}{T'_{d2} - T'_{d3}};$$

$$x'_d = x_d \frac{T'_{d3}}{T_{d0}} = \frac{T'_{d3} (T_{d0} - T'_{d2})}{T_{d0} T'_{d2} - T'_{d3}} x_2;$$

$$x_0 = \frac{T'_{d1} x_d - T_{d0} x'_d + x_2 (T'_{d1} - T_{d0})}{T_{d0} - T'_{d1}}.$$

При осциллографировании исходный ток I_{HB} выбирается в зависимости от насыщения для которого определяются параметры.

Необходимо отметить, что реактивность следования фаз x_2 не является строгой одинаковой для различных режимов работы машины, она также зависит от условий проведения опыта (в частности, от внешней реактивности, формы кривой напряжения и др.).

Степень влияния упомянутых факторов реактивность x_2 определяется, в свою очередь, мерой непостоянства обратносинхронного подмагничивания, которая может быть охарактеризована отношением $\frac{x'_q}{x'_d}$, а также, хотя и в меньшей степени, величиной $\frac{x_0}{x'_d}$ [Л. 1]. Однако для машин с замкнутой успокоительной обмоткой на роторе отношение $\frac{x'_q}{x'_d}$ невелико, и численные значения реактивности x_2 для различных режимов (асинхронный, двухфазный, однофазный) отличаются незначительно. Разница лежит в пределах погрешностей опытного определения параметров.

Пользование предлагаемым методом определения параметров может быть несколько видоизменено, а именно: определив по характеристике холостого хода и характеристике трехфазного короткого замыкания x_d и x'_d пользуясь ее как известную, находят значения параметров x'_d , x_2 , x_0 из выражений (2), величину x'_d по T_{ad} , а x'_q по найденным значениям x_2 и x'_d или по T_{aq} .

¹ Пользование предлагаемым методом определения параметров может быть несколько видоизменено, а именно: определив по характеристике холостого хода и характеристике трехфазного короткого замыкания x_d и x'_d пользуясь ее как известную, находят значения параметров x'_d , x_2 , x_0 из выражений (2), величину x'_d по T_{ad} , а x'_q по найденным значениям x_2 и x'_d или по T_{aq} .

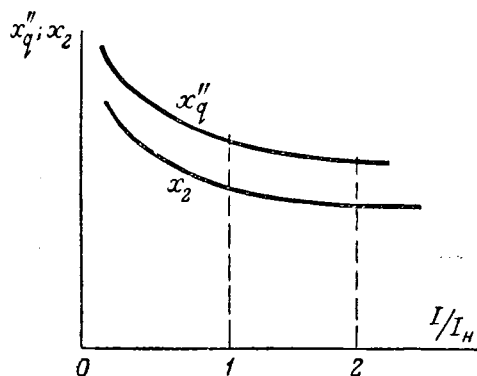


Рис. 5.

Поэтому изложенный метод опытного определения параметров дает некоторое усредненное значение x_2 , и практически достаточно точен представленном виде для синхронных машин замкнутыми успокоительными обмотками.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Примерное экспериментальное определение параметров синхронных генераторов мощностью 28,3 ква.

Реактивности (%) генераторов (без насыщения)

Таблица 1

Генератор номинальной мощности 2 ква			Генератор номинальной мощности 28,3 ква		
Значения, определенные по предлагаемому методу	Значения, определенные опытным путем по другим методам		Значения, определенные по предлагаемому методу	Значения, определенные опытным путем по другим методам	
	Значение	Метод определения		Значение	Метод определения
68,5	67,9	По характеристике холостого хода и по характеристике трехфазного короткого замыкания	101,4	100	По характеристике холостого хода и по характеристике трехфазного короткого замыкания
10,8	10,7	По осциллограмме трехфазного внезапного короткого замыкания	16,1	17,8	По осциллограмме трехфазного внезапного короткого замыкания
8,2	8,0	По осциллограмме трехфазного внезапного короткого замыкания	13,9	13,4	По осциллограмме трехфазного внезапного короткого замыкания
27,8	27,8	Методом постороннего питания двух фаз статора	36,7	35,2	Методом постороннего питания двух фаз статора
18,0	17,8	Методом Ломоносовой	25,5	26,2	По методу Бекку
6,6	6,0	Методом последовательного питания трех фаз обмотки статора	2,0	2,5	Методом последовательного питания трех фаз статора

Таблица 2

Постоянные времени (сек), определенные по кривым затухания

Постоянные времени	T_{d0}	T'_{d3}	T'_{d2}	T'_{d1}	T_{ad}	T_{aq}
2 ква	0,495	0,078	0,165	0,188	0,0052	0,0163
28,3 ква	0,95	0,15	0,31	0,32	0,016	0,042

Литература

И. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.

[25. 6. 1951]



Аналитическое выражение нормальной характеристики холостого хода

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ЕНЬКО

Московский горный институт им. Сталина

Большинство расчетов, связанных с применением характеристики холостого хода, производится графически. Однако в ряде случаев аналитический расчет может оказаться более предпочтительным. Аналитическое выражение характеристики холостого хода $E=f(F)$ ценно также при теоретических исследованиях.

В журнале Электричество Б. И. Архангельский опубликовал обширный критически обработанный материал по таким аналитическим выражениям [Л. 1]. Здесь предлагается еще одно выражение, преимуществом которого является высокая точность аппроксимации во всем практически важном диапазоне. Кроме того, оно позволяет легко подобрать графическим путем постоянные коэффициенты для индивидуальных характеристик в требуемом диапазоне и дает несложные выражения производной $\frac{dE}{dF}=f(E)$, а

также зависимостей $\frac{E}{F}=f(E)$ и $\frac{d(E/F)}{dE}=f(E)$, при-

меняемых в расчетах (например, в работах Г. Н. Петрова, 1945 г.; И. С. Жданова, 1948 г.; А. А. Горева, 1950 г.).

В основу предлагаемого выражения положено разделение н. с. на две составляющие, соответствующие машине без насыщения (воздушный зазор) и насыщению стальных участков магнитной цепи. Такое разделение, естественно, возникает при расчете характеристики холостого хода и было предложено еще в 1928 г. [Л. 2]. Характеристика холостого хода дается в относительных единицах, причем за единицу напряжения принято номинальное напряжение, а за единицу н. с. соответствующее значение по прямолинейной части характеристики.

Масштаб по осям координат выбран одинаковым, и поэтому н. с. ненасыщенной машины численно равны соответствующим э. д. с.

Предлагается аналитическая аппроксимация характеристики холостого хода при помощи трансцендентных функций, при этом н. с. разделяется на прямолинейную н. с. и н. с. насыщения. Достоинство метода — высокая точность аппроксимации в практически широком диапазоне.

Нормальная характеристика холостого хода в обычно принятых относительных единицах дается следующими координатами [Л. 3].

F	0	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3
E	0	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1

Прямолинейная часть характеристики наклонена к оси абсцисс под углом $\operatorname{tg} \alpha' = 1,2$.

Пересчитываем эту характеристику в указанных выше относительных единицах, умножив абсциссы на $\operatorname{tg} \alpha'$, и вычисляем

$$\Delta F = F - E.$$

F	0	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60	4
E	0	0,58	1,00	1,21	1,33	1,40	1,46	1
ΔF	0	0,02	0,20	0,59	1,07	1,60	2,14	2

Эта характеристика, а также кривая $E=f(\Delta F)$ изображены на рис. 1. Принимая переменную за независимую, получим обратную функцию $\Delta F=f(E)$, которая с весьма большой точностью

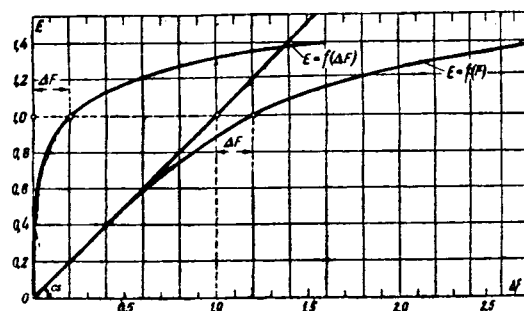


Рис. 1. Нормальная характеристика холостого хода.

может быть аппроксимирована показательной функцией

$$\Delta F = e^{aE-b}$$

или

$$\Delta F = ce^{aE}; \quad (2)$$

здесь $a = 5,12$, $b = 6,73$ и $c = 0,0012$.

На рис. 2 представлена зависимость (2) в полупологарифмических координатах (точки соответствуют нормальной характеристике).

Величина ΔF определяется по таблицам функции e^x , которые имеются в любом математическом справочнике. Значения ΔF , F и E , вычисленные по (2) и (6) с округлением до трех десятичных знаков, приведены ниже:

E	0,000	0,577	1,000	1,211	1,328	1,405	1,463	1,508
ΔF	0,001	0,023	0,200	0,589	1,072	1,595	2,137	2,692
F	0,001	0,600	1,200	1,800	2,400	3,000	3,600	4,200

Производная $\frac{dE}{dF}$, функция $\frac{E}{F}$ и производная $\frac{d}{dE} \left(\frac{E}{F} \right)$ равны:

$$\frac{dE}{dF} = \frac{1}{\frac{dF}{dE}} = \frac{1}{1 + a\Delta F}, \quad (3)$$

$$\frac{E}{F} = \frac{E}{E + \Delta F}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dE} \left(\frac{E}{F} \right) = \frac{\Delta F(1 - aE)}{(E + \Delta F)^2}. \quad (5)$$

Собственно характеристика холостого хода $E = f(F)$ может быть выражена только в виде обратной функции:

$$F = E + \Delta F = E + e^{aE-b}. \quad (6)$$

Уравнению (6) присущи недостатки, свойственные всякому трансцендентному выражению, в частности, невозможность совместного решения с линейными уравнениями, а также то, что E может быть представлена в виде явной функции от F . Однако для многих расчетов, в которых E является исходной величиной [Л. 4] или

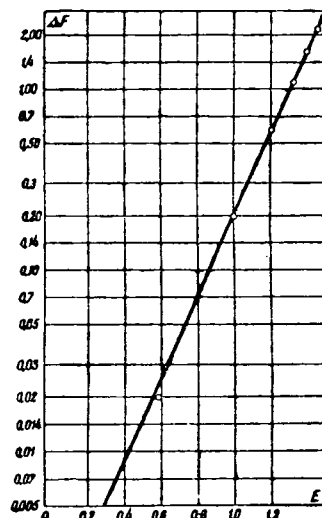


Рис. 2. Аппроксимация функции $\Delta F = f(E)$.

получается как промежуточное решение, выражение (2) оказывается очень удобным и точным.

В заключение можно пожелать, чтобы для выражения характеристик холостого хода в относительных единицах за единицу возбуждения принималось значение, соответствующее номинальному напряжению по прямолинейной характеристике и масштаб по осям был бы одинаковым. Эта система имеет ряд преимуществ по сравнению с общепринятой и применялась многими (П. С. Ждановым, А. А. Горевым и др.).

При такой системе величина возбуждения при номинальном напряжении, взятая по действительной характеристике, и параметр x_d определяют основные электромагнитные свойства синхронной неявнополюсной машины и отпадает необходимость вводить величину отношения короткого замыкания.

Литература

1. Б. И. Архангельский. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин. Электричество, стр. 30, № 3, 1950.
2. Г. Н. Петров. Трансформаторы, ОНТИ, т. I, стр. 188, 1934.
3. С. А. Ульянов. Токи короткого замыкания. ОНТИ.
4. В. В. Енько. Обобщенная векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины и ее применение. Электричество. № 4, 1951.

[13.4. 1951]

◇ ◇ ◇

Двигатель постоянного тока с разрезными полюсами

Кандидат техн. наук, доц. В. И. СЕРЕБРИЕР

Уральский политехнический институт им. Кирова

Обычный двигатель постоянного тока запускается при помощи реостата или соответствующего электромашинного агрегата. Регулирование его скорости осуществляется путем изменения возбуждения. Задача, поставленная перед собой автором, заключалась в том, чтобы добиться, во-первых, пуска двигателя без реостата; во-вторых, осуществить регулирование скорости двигателя путем изменения только лишь его возбуждения. Иначе говоря, чтобы регулирование скорости двигателя в широких пределах ниже и выше нормальной скорости осуществлять путем изменения лишь его возбуждения, но при постоянстве приложенного к его якору напряжения.

Это полностью достигается в двигателе постоянного тока с разрезными (расщепленными) полюсами, отличающемся от обычного двойным количеством сердечников полюсов и щеточных рядов (рис. 1).

Принцип работы двигателя. В возбужденном и вращаемом с постоянной скоростью якоре электромашинного трансформатора (метадына), вращающий (моторный) и тормозной (генераторный) моменты

$$M_m = C_{я.м} \Phi_{я.п} I_{1я} = (C_{я} W_{я} I_{2я}) I_{1я} = C I_{1я} I_{2я} \quad (1)$$

и

$$M_z = C_{я.г} \Phi_{я.пр} I_{2я} = (C_{я} W_{я} I_{1я}) I_{2я} = C I_{1я} I_{2я} \quad (2)$$

равны, а результирующий момент

$$M = M_m - M_z = 0, \quad (3)$$

где $\Phi_{я.п}$ и $\Phi_{я.пр}$ — поперечный и продольный магнитные потоки якоря;

$I_{1я}$ и $I_{2я}$ — первичный (продольной цепи) и вторичный (поперечной цепи) токи якоря;

$C_{я.м}$, $C_{я.г}$, $C_{я}$ и C — константы якоря;

$W_{я}$ — число витков обмотки якоря.

Изложены принцип действия и результаты стендовых испытаний двигателя постоянного тока с разрезными (расщепленными) полюсами. Показано, что модернизация обычного двигателя, заключающаяся в удвоении сердечников полюсов и щеточных рядов, позволяет осуществить безреостатный пуск и, совместно с раздельным возбуждением полюсов, расширить диапазон регулирования скорости двигателя исключительно за счет лишь его возбуждения.

Если к продольной н. с. якоря $W_{я} I_{1я}$ добавить еще и внешнюю н. с. $W_{пр} I_{пр}$ продольных полюсов, то тем самым будет увеличен тормозной (генераторный) момент и будет осуществ-

лен электромашинный генератор. Наоборот, если к поперечной н. с. якоря $W_{я} I_{2я}$ добавить внешнюю н. с. $W_{п} I_{п}$ поперечных полюсов, то увеличится вращающий (моторный) момент и получится двигатель. Наконец, если и к продольной и к поперечной н. с. якоря добавить внешнюю н. с. продольных и поперечных полюсов, то получится двигатель с весьма широким диапазоном регулирования скорости, так как он будет иметь три обмотки возбуждения — поперечную якорную и независимые обмотки продольных и поперечных полюсов. Таким образом, осуществляется двигатель с раздельными обмотками возбуждения продольных и поперечных полюсов (рис. 2) и, соответ-

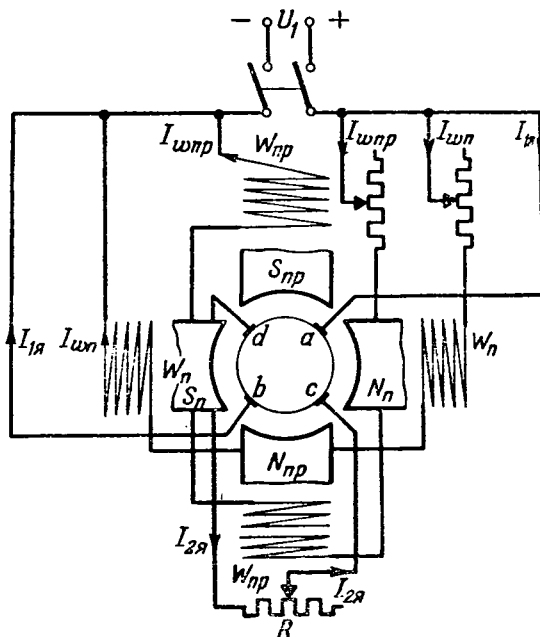


Рис. 1. Схема двигателя с разрезными (расщепленными) полюсами и с раздельным регулированием токов возбуждения.

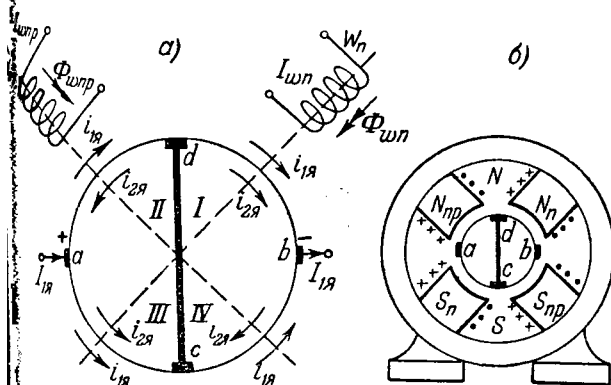


Рис. 2.

а) — распределение якорных токов по квадрантам; б) — расположение сердечников полюсов и щеточных рядов.

енно, двумя независимыми магнитными потоками — продольным и поперечным:

$$\Phi_{np} = \Phi_{я, np} + \Phi_{w, np} = C_{я} W_{я} I_{1я} + C_{w, np} W_{np} I_{w, np}, \quad (4)$$

$$\Phi_n = \Phi_{я, n} + \Phi_{w, n} = C_{я} W_{я} I_{2я} + C_{w, n} W_n I_{w, n}, \quad (5)$$

Φ_{np} и Φ_n — продольный и поперечный магнитные потоки двигателя;

$\Phi_{я, np}$ и $\Phi_{я, n}$ — продольный и поперечный магнитные потоки продольных и поперечных полюсов;

W_{np} и W_n — число витков обмоток продольных и поперечных полюсов;

$I_{w, np}$ и $I_{w, n}$ — токи возбуждения обмоток продольных и поперечных полюсов;

$C_{я, np}$ и $C_{я, n}$ — константы обмоток продольных и поперечных полюсов.

Характеристики такого двигателя выражаются формулами:

$$I_{1я} = \frac{U_1 - E_1}{R_{1я}} [a], \quad (6)$$

$$E_1 = C_1 n \Phi_n [в], \quad (7)$$

$$I_{2я} = \frac{E_2}{R_2} [a], \quad (8)$$

$$E_2 = C_2 n \Phi_{np} [в], \quad (9)$$

$$= C_{я} \Phi_n (I_{1я} + I_{2я}) + C_z \Phi_{np} (I_{1я} - I_{2я}) [кгм], \quad (10)$$

$$= \frac{U_1 - R_{1я} I_{1я}}{k_{я} \Phi_n \left(1 + \frac{I_{2я}}{I_{1я}}\right) + k_z \Phi_{np} \left(1 - \frac{I_{2я}}{I_{1я}}\right)} [об/мин], \quad (11)$$

где U_1 — напряжение, приложенное к продольным щеткам $a-b$ (рис. 1, 2);

E_1 и E_2 — э. д. с. вращения в продольной и поперечной якорных цепях;

n — скорость вращения якоря;

η — к. п. д. двигателя;

P_o — потери в стали и на трение;

$R_{1я}$, R_2 , $R_{w, np}$ и $R_{w, n}$ — сопротивления соответствующих цепей (обмоток);

C_1 , C_2 , $k_{я}$, k и k_z — константы двигателя;

$$R_2 = R_{2я} + R.$$

Свойства новой машины были автором исследованы экспериментально. Для постановки эксперимента обыкновенная двухполюсная электрическая машина постоянного тока была переделана в двигатель с разрезными полюсами в соответствии с рис. 1 и 2. Якорь не подвергался изменениям, а в индукторе взамен двух сердечников были поставлены четыре; соответственно также было добавлено два щеточных ряда ($c-d$, рис. 2).

Результаты осциллографирования пуска даны на рис. 3 и 4. Экспериментально полученные характеристики приведены на рис. 5—7.

Осциллограммы безреостатного пуска двигателя по схеме, приведенной на рис. 1, снимались для пуска без нагрузки ($R=0$) (рис. 3) и при наличии нагрузки (рис. 4), а также при включенном в поперечной якорной цепи некотором внешнем сопротивлении (рис. 4,2) в случае раздельного возбуждения полюсов. Эти осциллограммы показывают, что 1) бросок первичного пускового тока $I_{1я}$ в зависимости от нагрузки не превышает 2—3-кратного значения установившегося тока и что процесс спада тока протекает весьма быстро (ср. по масштабу времени, данному на осциллограммах); 2) вторичный якорный ток $I_{2я}$ очень быстро нарастал до установившегося, энергично содействуя резкому спадающему пусковому току $I_{1я}$. Этот процесс в основном и обеспечивает безреостатный пуск; 3) скорость вращения двигателя нарастает исключительно плавно.

На рис. 5—7 приводятся характеристики двигателя, полученные автором на стенде.

Анализ характеристик. Общий анализ приведенных характеристик позволяет сделать следующие выводы:

1. Двигатель постоянного тока с разрезными полюсами может быть пущен в ход без реостата!

$$\eta = \frac{U_1 (I_{1я} + I_{w, np} + I_{w, n}) - (R_{1я} I_{1я}^2 + R_2 I_{2я}^2 + R_{w, np} I_{w, np}^2 + R_{w, n} I_{w, n}^2 + P_o)}{U_1 (I_{1я} + I_{w, np} + I_{w, n})} 100 [\%], \quad (12)$$

Пусковой период щетки $c-d$ замкнуты накоротко. Реостат R в э.о. цепи (рис. 1) используется лишь после пуска для регулирования скорости (см. ниже).

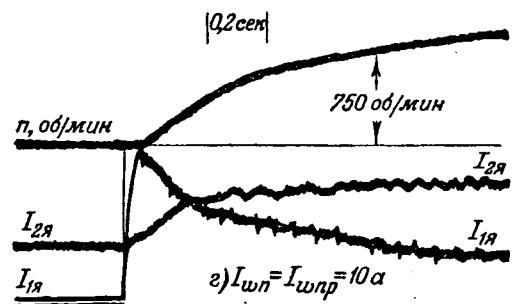
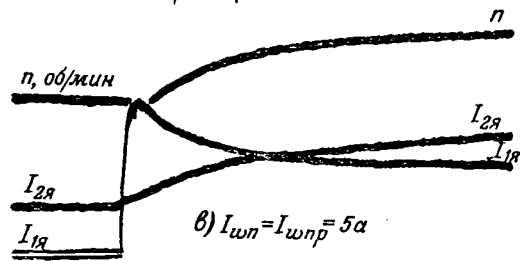
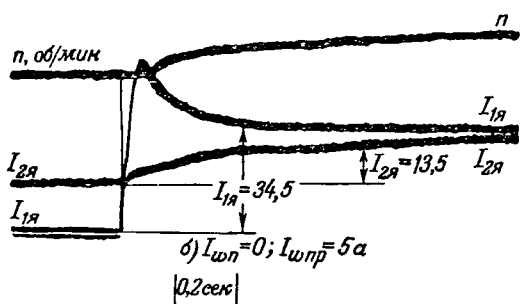
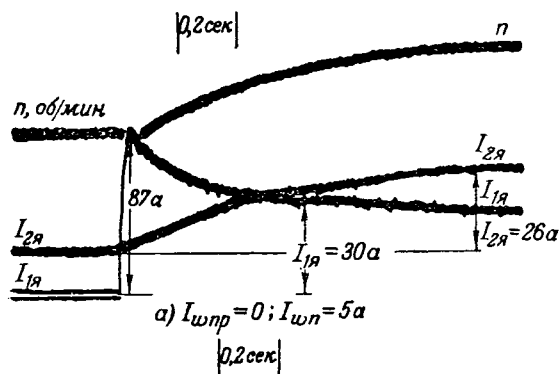


Рис. 3. Осциллограммы пуска двигателя без нагрузки ($M=0$).

(рис. 3 и 5), так как благодаря индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток двигателя (двигатель работает без насыщения) суммарная противо-э. д. с. (самоиндукции, взаимоиндукции и вращения) продольной якорной цепи достаточна, чтобы ограничить бросок первичного пускового тока до 2—3-кратного значения и даже меньше, в зависимости от нагрузки (рис. 3 и 4), так как:

$$i_{1я} = \frac{1}{R_{1я}} \left[U_1 - \left(L_{1я} \frac{di_{1я}}{dt} + M_1 \frac{di_{\omega np}}{dt} + C_1 n \Phi_n \right) \right], \quad (13)$$

$$i_{2я} = \frac{1}{R_2} \left[0 - \left(L_{2я} \frac{di_{2я}}{dt} + M_2 \frac{di_{\omega n}}{dt} + C_2 n \Phi_{np} \right) \right], \quad (14)$$

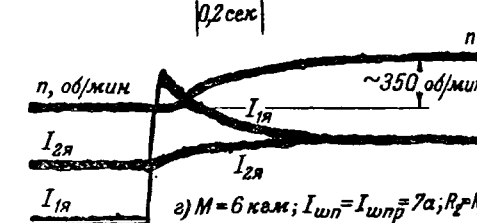
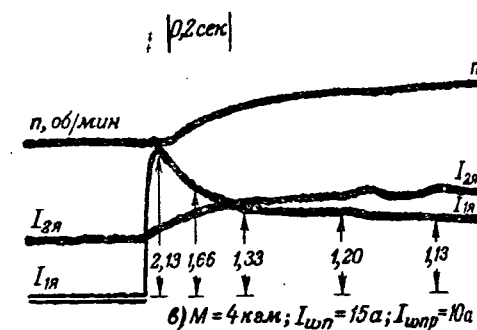
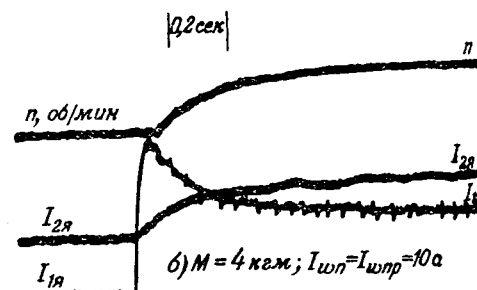
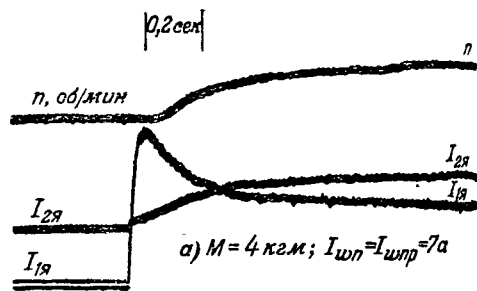


Рис. 4. Осциллограммы пуска двигателя при наличии нагрузки.

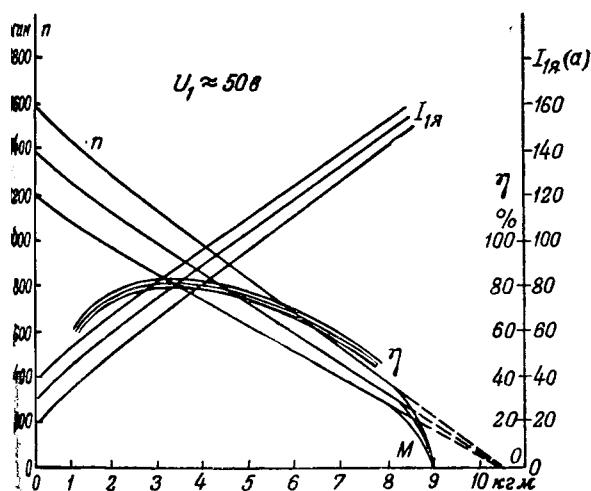
$$i_{\omega np} = \frac{1}{R_{\omega np}} \left[U_1 - \left(L_{\omega np} \frac{di_{\omega np}}{dt} + M_1 \frac{di_{1я}}{dt} \right) \right]$$

$$i_{\omega n} = \frac{1}{R_{\omega n}} \left[U_1 - \left(L_{\omega n} \frac{di_{\omega n}}{dt} + M_2 \frac{di_{2я}}{dt} \right) \right],$$

где $L_{1я}$, $L_{2я}$, $L_{\omega np}$, $L_{\omega n}$, M_1 и M_2 — соответствующие индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток двигателя.

2. Разгон двигателя происходит весьма плавно (рис. 3 и 4).

3. Двигателю присущ весьма широкий диапазон регулирования скорости (рис. 6 и 7), так как у него имеются, как уже выше было сказано, три обмотки возбуждения: W_{np} , W_n и W_1 .



5. Скорость вращения якоря n , первичный ток $I_{1я}$ к. п. д. и η двигателя в зависимости от его вращающего момента M .

И ЭТОМ:

1) С усилением тока I_{wn} (при I_{wnp} и $R_2 = \text{пост}$) скорость двигателя увеличивается до тех пор, наступит насыщение поперечной цепи [кривая $n = f(I_{wn})$, рис. 6 и 7] и наоборот. Это объясняется тем, что согласно теории электромагнитного трансформатора, при усилении тока возбуждающей (вариаторной) обмотки W_n вторичный ток $I_{2я}$, являющийся тормозным, растет. В рассматриваемом двигателе результирующий вращающий момент с ослаблением $I_{2я}$ увеличивается, что при постоянном тормозном моменте приводит к увеличению скорости вращения якоря и наоборот.

2) С усилением тока I_{wnp} (при I_{wn} и $R_2 = \text{пост}$) скорость двигателя уменьшается до тех пор, наступит насыщение продольной цепи [кривая $n = f(I_{wnp})$, рис. 6 и 7] и наоборот. Это объясняется тем, что согласно теории электромагнитного усилителя при усилении тока обмотки возбуждения продольных полюсов W_{np} , вторичный ток увеличивается, как было уже сказано. Это приводит к уменьшению скорости вращения якоря и наоборот.

3) С увеличением R (рис. 1) при I_{wnp} и $I_{wn} = \text{пост}$ скорость двигателя увеличивается до тех пор, что обусловлено снижением вторичного тока $I_{2я}$.

В этом двигателе для того, чтобы перейти к обычным характеристикам, достаточно разомкнуть поперечную якорную цепь ($c-d$) и соответственно подрегулировать токи возбуждения.

Анализ отдельных характеристик. Характеристика $I_{2я} = f(I_{wn})$ (рис. 6). Эта характеристика может быть разделена на 4 участка.

Первый участок от значения $I_{wn} = -2a$ до $I_{wn} = 0$ называется тем, что если цепь возбуждения поперечных полюсов разорвана, то поперечный магнитный поток [формула (5)] может создаваться только н. с. поперечной якорной цепи $W_{я} I_{2я}$ и можно регулировать током I_{wnp} . Это следует из соотношений (4), (8) и (9).

Электричество, № 10.

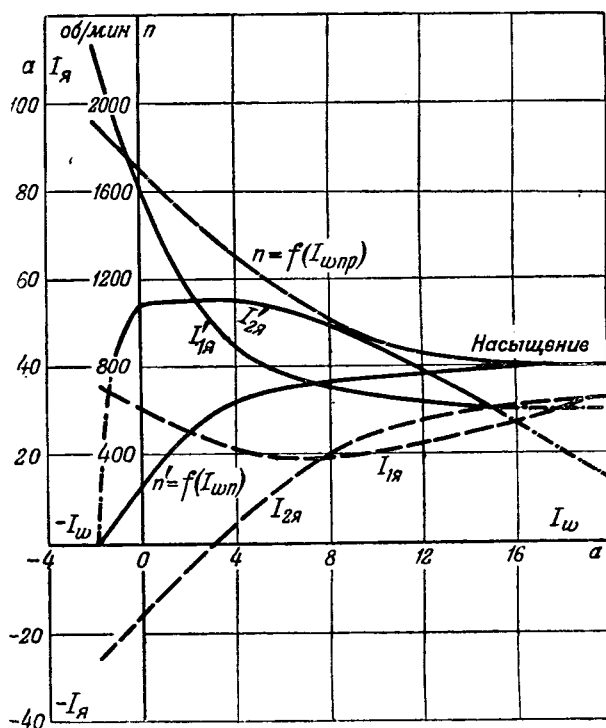


Рис. 6. Скорость вращения n якоря и его токи $I_{1я}$ и $I_{2я}$ в зависимости от отдельных токов возбуждения I_{wnp} и I_{wn} для схемы, приведенной на рис. 1 при $R=0$: $n, I_{1я}$ и $I_{2я} = f(I_{wnp})$ при $I_{wn} = \text{пост}$ (пунктирные кривые) и $n', I_{1я}'$ и $I_{2я}' = f(I_{wn})$ при $I_{wnp} = \text{пост}$ (сплошные кривые).

На участке от значения $I_{wn} = 0$ до $I_{wn} = 4,5a$ ток $I_{2я}$, несмотря на усиление тока I_{wn} и на рост скорости якоря, не изменяется. Это обусловлено тем, что с ростом скорости двигателя увеличивается э. д. с. $E_1 = C_1 n \Phi_n$ и соответственно слабеет ток $I_{1я} = \frac{U_1 - E_1}{R_1}$, что при $I_{wnp} =$

$= \text{пост}$ поддерживает ток $I_{2я}$ неизменным (рис. 3). Это имеет место при разгоне двигателя: при включении ток $I_{2я}$ сначала за счет потока Φ_{np} усиливается, затем по достижении якорем 250—300 об/мин устанавливается и остается без изменения в течение всего периода пуска (рис. 3), хотя ток $I_{1я}$ резко падает. Это является особенно ценным достоинством двигателя: наличие тока $I_{2я}$ позволяет получить безреостатный пуск, плавный разгон (рис. 3) и, что главное, движение на малых скоростях (соответствующим регулированием токами I_{wn} и I_{wnp}) недоступное обычному двигателю.

На участке от $I_{wn} = 4,5a$ до $I_{wn} = 16a$ начинается некоторое насыщение поперечной магнитной цепи двигателя и с усилением тока I_{wn} ток $I_{2я}$ слабеет.

На четвертом участке, где $I_{wn} > 16a$, наступает насыщение поперечной магнитной цепи двигателя. Дальнейшее усиление тока I_{wn} — хотя и влечет за собой ослабление тока $I_{2я}$ — на скорости двигателя уже не отражается.

Характеристика $I_{2я} = f(I_{wnp})$, рис. 6. Форма этой характеристики показывает, что вполне

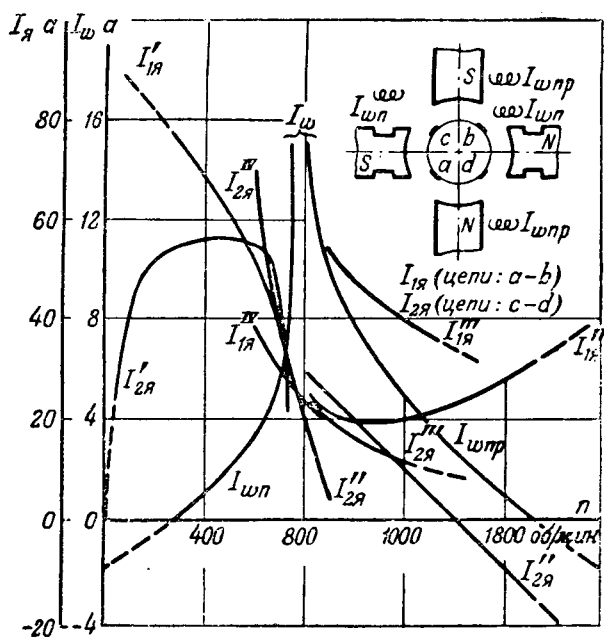


Рис. 7. Якорные токи I_{1a} и I_{2a} раздельного возбуждения I_{wn} и I_{wnp} в зависимости от скорости вращения n для схемы, приведенной на рис. 1.

При $R=0$: I'_{1a} , I'_{2a} и $I_{wn} = f(n)$ при $I_{wnp} = \text{пост}$; I''_{1a} , I''_{2a} и $I_{wnp} = f(n)$ при $I_{wn} = \text{пост}$. Для случая, когда обмотка возбуждения W_{np} продольных полюсов приключена к щеткам $c-d$: I'''_{1a} и $I'''_{2a} = f(n)$ при $I_{wp} = \text{пост}$ и $I_{wnp} = I'_{2a}$. При $R=\text{пер}$: I^{IV}_{1a} , I^{IV}_{2a} и $R = f(n)$ при I_{wp} и $I_{wnp} = \text{пост}$.

возможно автоматизировать связь между I_{2a} и I_{wnp} .

Характеристики $I_{1a} = f(I_{wn})$ и $I_{1a} = f(I_{wnp})$. Эти кривые не характерны и особо останавливаться на них не будем. Они интересны лишь с количественной стороны для расчета и определения соотношений между I_{wnp} и I_{1a} , так как для поперечной цепи оба эти тока являются доками возбуждения.

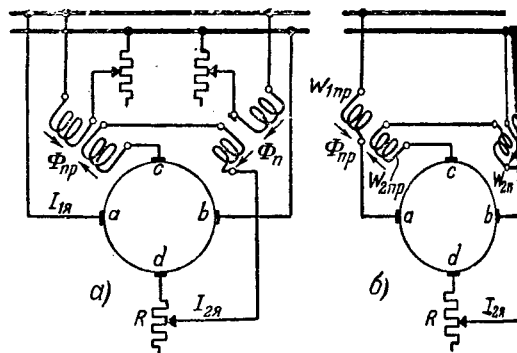


Рис. 8. Некоторые схемы соединения обмоток двигателя: а—параллельного возбуждения; б—последовательного.

Характеристики при I_{wn} или $I_{wnp} = \text{пост}$. На рис. 7. приведены 4 варианта стеновых испытаний: 1) I_{1a} , I_{2a} и $n = f(I_{wn})$ при $I_{wnp} = \text{пост}$; 2) I_{1a} , I_{2a} и $n = f(I_{wnp})$ при $I_{wn} = \text{пост}$; 3) $n = f(I_{2a})$ при $I_{wn} = \text{пост}$ (обмотка возбуждения продольных полюсов W_{np} приключена к щеткам $c-d$, т. е. соединена последовательно с речной якорной цепью); 4) I_{1a} , I_{2a} и $n = f(I_{wnp})$ при $I_{wn} = \text{пост}$. Полученные результаты (рис. 7) показывают, что, комбинируя все регулировочные возможности, можно получить очень гибкие результирующие характеристики. В частности, обмотки двигателя можно включать так, как показано на рис. 8, для параллельного (а) и последовательного (б) возбуждения.

Выводы. По своим свойствам двигатель постоянного тока с разрезными полюсами может найти широкое применение в бумажной, текстильной и металлообрабатывающей промышленности в электрической тяге с частыми остановками (трамвай, метро и пригородное сообщение).



Некоторые вопросы динамики электропривода

Кандидат техн. наук, доц. К. В. УРНОВ

Москва

В советской специальной литературе большое внимание уделялось и уделяется динамике электропривода. Интерес выполнен, так как в современных производственных машинах с электроавтоматикой движение с неустановившимися скоростями является ответственным режимом. Нередко в толковании того или иного положения наступает период, когда большинство соответствующих специальных оказываются совпадающими. Нельзя сказать, что так обстоит дело с рассматриваемым вопросом. Особенно это относится к системам переменными моментами инерции и массами. Вместе с тем, отыскание относительно единой точки зрения крайне желательно, что и служит основанием попытке обобщить основные принципы в изучении процессов движения.

Законы движения систем электроприводов базируются на основных законах механики и различных законах электротехники. Прежде всего необходимо остановиться на первых из них.

Первый закон движения с неустановившейся скоростью был дан Ньютоном. Закон гласит, что сила пропорциональна изменению количества движения [Л. 1].

Следовательно,

$$F = \frac{dmV}{dt},$$

F — сила;

m — масса;

V — скорость;

t — время.

Если ли Ньютон, формулируя закон, стремился охватить процессы движения и переменных масс, но если подойти формально, то при переменной массе:

$$F = \frac{dmV}{dt} = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt}. \quad (1)$$

Указывается, что обобщенные уравнения движения электропривода базируются на классическом законе движения переменной массы, справедливом в нерелятивистских случаях мгновенного воссоединения элементарных масс с основной. Кроме того, обоснована целесообразность замены существующего метода определения приведенного махового момента по суммарной кинетической энергии системы методом его определения по уравнению приведенных моментов.

Нашим знаменитым соотечественником Мещерским был дан общий закон движения переменной массы [Л. 2]:

$$F = m \frac{dV}{dt} + (V - u) \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

Обозначения, как и выше, но, кроме того, u — скорость элементарной массы в момент воссоединения с основной массой, имеющей скорость V .

В частном случае при $u = 0$ из этого уравнения может быть получен закон Ньютона:

$$F = m \frac{dV}{dt} + (V - 0) \frac{dm}{dt} = \frac{dmV}{dt}.$$

Ради полноты рассмотрения вопроса о движении переменной массы приведем решение задачи на основании уравнения Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j,$$

где T — кинетическая энергия;

q_j — обобщенная координата ($\dot{q}_j = \frac{dq_j}{dt}$);

Q_j — обобщенная сила.

Для случая поступательного движения переменной массы

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} = \frac{\partial T}{\partial \frac{ds}{dt}} = mV, \quad \frac{d}{dt} (mV) = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt},$$

$$\frac{\partial T}{\partial q} = \frac{\partial T}{\partial s} = \frac{V^2}{2} \frac{dm}{ds} = \frac{V^2 dm}{2V dt} = \frac{V}{2} \frac{dm}{dt},$$

$$Q_j = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt} - \frac{V}{2} \frac{dm}{dt} = m \frac{dV}{dt} + \frac{V}{2} \frac{dm}{dt}. \quad (3)$$

Работа этой силы определяет кинетическую энергию системы, что легко проверить, если проинтегрировать уравнение кинетической энергии и затем из элементарной работы найти силу. Однако это можно найти математически и непосредственно.

Элементарная работа:

$$dT = Q_j ds = Q_j V dt = m V dV + \frac{V^2}{2} dm.$$

Это уравнение в полных дифференциалах, так как соблюдается условие

$$M = mV, \quad N = \frac{V^2}{2}, \quad MdV + Ndm = dT,$$

$$\frac{\partial M}{\partial m} = \frac{\partial N}{\partial V} = V.$$

Следовательно,

$$\int MdV + \int \left[N - \frac{\partial}{\partial m} \int MdV \right] dm = \int dT;$$

$$\frac{mV^2}{2} + \int \left[\frac{V^2}{2} - \frac{V^2}{2} \right] dm = T; \quad \frac{mV^2}{2} = T.$$

При переменной массе сила, определяемая уравнением Мещерского, больше силы, определяемой уравнением Лагранжа, которое не учитывает работу между присоединяющейся элементарной массой и основной массой в момент воссоединения.

Приведенные уравнения являются основными для решения задач о движении, почему и остановимся на них более подробно. Запишем закон Ньютона в следующем виде:

$$F = m \frac{dV}{dt} + dm \frac{V}{dt}.$$

Принципиально, с точки зрения физических представлений, такая запись уравнения вполне правильна, так как каждый член его является произведением массы на ускорение.

Практически, как бы масса ни была мала, она не может получить бесконечно большого ускорения. В связи с этим уравнения движения в общем виде следует представить следующим образом [Л. 3]:

$$F = m_x \frac{dV}{dt} + F_m,$$

где F_m — сила в связи, которая возникает между основной и элементарными массами в процессе воссоединения;

m_x — мгновенная масса.

Для сравнения представленных законов движения рассмотрим следующий пример.

Предположим, что на ленту конвейера в каждый отрезок времени Δt кладется масса Δm . За время t на ленту конвейера будет положена масса

$$m = \frac{t \pm k \Delta t}{\Delta t} \Delta m,$$

где k — коэффициент, меньший единицы.

В пределе:

$$m = t \frac{dm}{dt} + k dm.$$

Пренебрегая величиной $k dm$ как бесконечно малой, получим:

$$m = t \frac{dm}{dt}.$$

Проделанный расчет показывает, что и накладывания массы может быть предположено не порционным, а непрерывным.

Продолжая рассмотрение примера, до того что отмеченная производная есть величина постоянная:

$$\frac{dm}{dt} = c.$$

В этом случае:

$$m = ct.$$

Допустим, что закон изменения скорости конвейера задан:

$$V = V_0 + at,$$

где $a = \frac{dV}{dt}$ — величина постоянная.

В момент, когда скорость ленты конвейера равна V_0 , включается механизм для подачи, которая начинает, например, насыпаться (или дываться) на ленту согласно вышеприведенному закону.

Рассмотрим случай движения ленты конвейера с ускорением, не препятствующим элементарным массам под действием трения до скорости ленты.

При наличии трения элементарной массы о ленту ускорение ее будет следующим:

$$F'_m = dm g f, \quad F'_m = dm \frac{dV_m}{dt}, \quad g f = \frac{dV_m}{dt}$$

где F'_m — сила трения элементарной массы о ленту в связи;

dm — элементарная масса;

g — земное ускорение;

f — коэффициент трения;

V_m — скорость элементарной массы.

Предположим, что коэффициент трения — величина постоянная.

Время, в течение которого элементарная масса приобретет скорость ленты, если мы так сказать, „сцепится“ с ней, будет следующим:

$$t_1 = \frac{V}{g f}.$$

За время t на ленту конвейера положена масса:

$$m = ct.$$

Часть этой массы воссоединится с лентой, а часть ее будет находиться в состоянии трения о ленту.

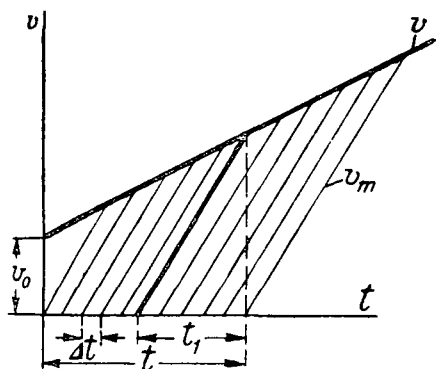
Воссоединившаяся масса:

$$m_1 = c(t - t_1) = ct - c \frac{V}{g f}.$$

Трущаяся масса:

$$m_2 = m - m_1 = c \frac{V}{g f}.$$

Для лучшего представления о смысле приведенных выражений на рисунке показана зависимость скорости ленты и скорости элементарных масс. Естественно, что на рисунке линии с



м элементарных масс даны с интервалами, к которому соответствует порционное поступление массы на ленту конвейера через интервалы времени Δt . Однако такое изображение не мешает использовать диаграммы в качестве иллюстраций к упомянутым выражениям.

Сила в связи:

$$F_m = m_2 g f = c V.$$

Уравнение движения для процесса, когда уже завершается воссоединение элементарных масс лентой:

$$F = m_1 \frac{dV}{dt} + F_m,$$

$$\left(ct - c \frac{V}{gf} \right) \frac{dV}{dt} + cV = cta + cV \left(1 - \frac{a}{gf} \right).$$

Если присоединяющиеся частицы в момент соединения имеют скорость V_n , направленную в том же направлении движения ленты, то решение будет следующим:

$$t_1 = \frac{V - V_n}{gf}, \quad m_1 = ct - c \frac{V - V_n}{gf}, \\ c = c \frac{V - V_n}{gf}, \quad F = cta + C(V - V_n) \left(1 - \frac{a}{gf} \right).$$

Уравнению Мещерского для $u = 0$:

$$F = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt} = cta + cV.$$

Для скорости $u \neq 0$:

$$F = m \frac{dV}{dt} + (V - V_n) \frac{dm}{dt} = cta + c(V - V_n).$$

Точный ответ, полученный согласно уравнению Мещерского, обусловлен допущением о мгновенном присоединении элементарной массы. Как видно из результатов решения по уравнению Мещерского не входит коэффициент трения, что отражает фактических условий протекания процесса. Таким образом, в общем случае следует пользоваться уравнением, содержащим член мгновенной массой и член с силой в связи. В свое время Даламбер показал, что полная сила в процессе движения определяется силой, учаемой по уравнению Ньютона, и силой инерции.

В расчетах по электроприводу эти силы являются статическими силами. С учетом

статической силы уравнение движения принимает вид:

$$F = m_x \frac{dV}{dt} + F_m + F_c, \quad (4)$$

где m_x — мгновенная масса;

F_m — сила в связи, возникающая между элементарной массой и основной массой в процессе воссоединения;

F_c — статическая сила.

F_m и F_c могут быть объединены, но так как первая сила возникает в процессе динамики переменной массы, целесообразно ее показать раздельно.

Для случая вращательного движения массы сила, равная произведению массы на ускорение и направленная по касательной, определится следующим уравнением:

$$F' = m \left(r \frac{d\omega}{dt} + 2\omega \frac{dr}{dt} \right),$$

где m — масса, вращающаяся около оси и отстоящая от нее на расстоянии r ; $r \frac{d\omega}{dt}$; $2\omega \frac{dr}{dt}$ — касательные составляющие переносного и кориолисова ускорений.

Следовательно, момент вращения:

$$M = mr^2 \frac{d\omega}{dt} + 2mr\omega \frac{dr}{dt}. \quad (5)$$

Если, как обычно, момент инерции массы определить произведением из массы на квадрат радиуса, то уравнение для момента может принять вид:

$$mr^2 = J'; \quad dJ' = 2mrdr; \quad M' = J' \frac{d\omega}{dt} + \\ + \omega \frac{dJ'}{dt} = \frac{dJ'\omega}{dt}.$$

Для тела вращения:

$$M = \Sigma M', \quad J = \Sigma J'.$$

В общем случае:

$$J = \int r^2 dm.$$

Следовательно,

$$M = \frac{dJ\omega}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt}. \quad (6)$$

Вместо массы в этом уравнении представлен момент инерции.

По аналогии с расчетом для поступательного движения с переменной массой найдем момент вращения из выражения кинетической энергии при переменном моменте инерции:

$$T = \frac{J\omega^2}{2}; \quad d \frac{J\omega^2}{2} = Md\varphi = J\omega d\omega + \frac{\omega^2}{2} dJ,$$

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (7)$$

В (6) второй член в два раза больше, чем второй член в (7). Это объясняется тем, что в процессе вращательного движения массы и ее перемещения вдоль радиуса работа приложенного к валу момента затрачивается не только на уве-

личение кинетической энергии массы, но и на ее перемещение вдоль радиуса.

Для иллюстрации этого преобразуем второй член уравнения (5) таким образом, чтобы в него вошло выражение центробежной силы:

$$M = mr^2 \frac{d\omega}{dt} + \frac{2}{\omega} mr\omega^2 \frac{dr}{dt}, \quad mr\omega^2 = F_r,$$

где F_r является центробежной силой.

Перепишем полученное уравнение:

$$M = mr^2 \frac{d\omega}{dt} + \frac{2}{\omega} F_r \frac{dr}{dt} = J \frac{d\omega}{dt} + 2M_r \quad (8)$$

Пользуясь методом приведения величин из закона сохранения энергии, подтвердим, что второй член уравнения (8) представляет удвоенный момент от момента вращения, определяемого центробежной силой,

$$M_r d\varphi = F_r dr, \quad M_r \omega dt = F_r dr, \quad M_r = \frac{1}{\omega} F_r \frac{dr}{dt}.$$

Момент M_r может быть условно назван центробежной составляющей.

Работа момента вращения по (8), но без половины второго члена соответствует работе момента по (7). Этот момент, как уже отмечалось, создает кинетическую энергию тела вращения. Работа, совершаемая центробежной составляющей, например, при упругой связи между массой, перемещающейся вдоль радиуса, и валом идет на приобретение энергии упругой связью и на кинетическую энергию массы, определяемой скоростью, направленной по радиусу. Первая производная пути массы вдоль радиуса по времени в уравнении (5) обращает внимание на наличие этой скорости. После того как неустановившийся процесс закончится, энергия, приобретенная чисто упругой связью, будет равна половине произведения из центробежной силы на величину деформации, а кинетическая энергия массы, определяемая скоростью вдоль радиуса, станет равной нулю. Очевидно, эта кинетическая энергия за счет сил трения в системе преобразуется в тепловую энергию.

Анализ основных уравнений движения показывает, что лишь уравнение для поступательного движения переменной массы (2) требует изменения из-за существа физического процесса, так как оно справедливо для случая мгновенного присоединения элементарной массы к основной.

Переходя к вопросу о наиболее приемлемом математическом виде уравнений движения, заметим, что хотя дискуссия по этому поводу и не имеет первостепенного значения, но, несомненно, полезна.

Например, может быть предложено уравнение (4) записать в комбинации с уравнением (3):

$$F = m_x \frac{dV}{dt} + \frac{V}{2} \frac{dm}{dt} + F_m'' + F_c,$$

где F_m'' — сила в связи, но определяющая лишь потерю энергии в связи.

По смыслу уравнения (4) полная сила в с

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} + F_m''.$$

Такое искусственное деление силы в связи возникающей в процессе воссоединения элементарной массы с основной, едва ли целесообразно, почему здесь и предложено уравнение (4).

В общем случае вращения тела с переменным моментом инерции уравнение движения может иметь следующие математические выражения

$$M = J_x \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ_x}{dt} + M_c,$$

$$M = J_x \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ_x}{dt} + M_r + M_c,$$

$$M = J_x \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ_x}{dt} + M_c',$$

$$M = J_x \frac{d\omega}{dt} + 2M_r + M_c,$$

где M_c и M_c' — статические моменты;
 J_x — мгновенный момент инерции.

Уравнение (9) построено на основании уравнения (10) и (11) — на основании (7) и (8), уравнение (12) — на основании (8).

В уравнении (11) третий член уравнения (10), т.е. центробежная составляющая, органически связанная с представлениями о массе, скорости, искусственно объединена со статическим моментом. В связи с этим математическое выражения (10) и (11) уравнения движения тела вращения нельзя признать приемлемыми, тем более, что пока неустановившийся процесс не закончился, третий член уравнения (10), как уже было отмечено, является моментом, работа которого в известной части также создает кинетическую энергию ($\frac{dr}{dt} \neq 0$).

Математические выражения (9) и (12) уравнения движения практически одинаковы. В выражении (12) второй член обращает внимание на связь его с центробежной силой.

Изменение выражения (9) с заменой его выражением (12) может быть оправдано стремлением обратить внимание на связь этого члена с центробежной силой, практически известной широким техническим кругам, а также желанием внести единообразие в вид уравнений для поступательного и вращательного движений. Второй член уравнения (12) не содержит дифференциала момента инерции, как и второй член уравнения (4) не содержит дифференциала массы.

В соответствии со сказанным в качестве исходных уравнений движения принимаем уравнения (4) и (12).

Современные электрифицированные производственные машины в большинстве случаев представляют системы, состоящие из отдельных звеньев, которые имеют неодинаковую скорость. Следовательно, уравнение движения для энергетического органа производственной машины, на-

имер для электродвигателя, должно учитывать силы или моменты, действующие в отдельных звеньях системы. Для удобства решения задачи о движении электродвигателя эти силы или моменты должны быть приведены к валу электродвигателя.

Существующие уравнения движения электрического привода в конечном счете определяют динамическую составляющую момента электродвигателя из суммы кинетической энергии отдельных звеньев системы. Эта сумма записывается в виде кинетической энергии вращающегося тела, где скоростью является скорость электродвигателя, а момент инерции представляет условно эквивалентную величину, которую называют приведенным моментом инерции.

Следовательно, приведенный момент инерции отдельного звена системы выражается следующим образом:

$$M = J \frac{d\omega}{dt}, \quad J = J_o \frac{\omega_o^2}{\omega^2}, \quad J = m_o \frac{V_o^2}{\omega^2}, \quad (13)$$

и ω — приведенный момент инерции и скорость электродвигателя;

и m_o — момент инерции или масса отдельного звена;

и V_o — скорости этих звеньев.

В связи с тем, что вид приведенных уравнений одинаков, дальнейший анализ проведем, распрямив одно уравнение.

Если отношения скоростей переменны, то и приведенный момент инерции будет переменным. В этом случае выражение для приведенного динамического момента получает следующий

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (14)$$

Уравнение для приведенного динамического момента может быть получено и иначе, например, исходя из непосредственного приведения динамического момента, пользуясь равенством работы:

$$d\varphi = J_o \frac{d\omega_o}{dt} d\varphi_o, \quad M = J \frac{d\omega}{dt} = J_o \frac{d\omega_o}{dt} \frac{d\varphi_o}{d\varphi}. \quad (15)$$

В этом случае приведенный момент инерции

$$d\varphi = \omega dt, \quad d\varphi_o = \omega_o dt, \quad J = J_o \frac{\omega_o}{\omega} \frac{d\omega_o}{d\omega}. \quad (16)$$

Невидно, что физический смысл (14) и (15) таков и разница заключается лишь в математическом выражении момента электродвигателя. В первом случае уравнение для момента вращения сложнее, но зато приведенный момент инерции выражается лишь через отношение квадратов скоростей, а не через отношение скоростей и моментов.

Если в уравнения (13) ввести самостоятельное обозначение для отношения скоростей, то получим:

$$J = k^2 J_o, \quad M = J_o \left(k^2 \frac{d\omega}{dt} + \omega k \frac{dk}{dt} \right), \quad (17)$$

$$J = \frac{1}{i^2} J_o; \quad M = J_o \left(\frac{1}{i^2} \frac{d\omega}{dt} - \frac{\omega}{i^3} \frac{di}{dt} \right). \quad (18)$$

Естественно, что уравнения (17) и (18) аналогичны (14) и их иное математическое выражение не меняет представлений о способе получения приведенного момента инерции. Если подставить в эти уравнения вместо k и i их выражения через отношения скоростей, то можно получить (15), что и естественно, так как физический смысл (14) и (15) одинаков.

Пользуясь случаем, заметим, что при постоянных отношениях скоростей выражения (13) и (16), а также (14) и (15) совпадают:

$$d\omega_o = k d\omega, \quad k = \frac{\omega_o}{\omega} = \frac{d\omega_o}{d\omega}, \quad dJ = 0.$$

Как видно, предложение определять приведенный момент инерции (маховой момент) из уравнения приведенных моментов [см. (15) и (16)] в настоящее время не может вызвать возражений, так как для подавляющего большинства систем такой способ определения совпадает с существующим [уравнения (13) и (14)]. Что же касается сложных систем, например систем с переменным передаточным числом, то нельзя сказать, что расчеты таких систем достаточно унифицированы, поэтому для них возможно и изменение в определении приведенного момента инерции.

Уравнения (14) и (15) были записаны в предположении, что масса или момент инерции отдельного звена постоянны. Если эти величины переменны, то следует вернуться к (4) и (12). Выше было отмечено, что для расчетов целесообразно остановиться на этих уравнениях. Таким образом, переходя к уравнению с переменными моментами инерции или массами, следует уже на них и ориентироваться. При использовании уравнений (4) и (12) более удобно применить приведение величин, как при выводе (15) и (16). Далее в этом случае целесообразно ввести в уравнение для отдельного звена собственный статический момент (собственный момент потерь или силу потерь — M_n или F_n), который может меняться и от передаваемого этим звеном статического момента, а также и от динамического момента, который зависит от ускорения, т. е., в свою очередь, от момента потерь.

Следовательно, уравнения для приведенных моментов вращения отдельных звеньев должны иметь следующий вид:

$$M' = m_x \frac{dV_o}{dt} \frac{V_o}{\omega} + F_m \frac{V_o}{\omega} + F_n \frac{V_o}{\omega} + F_c \frac{V_o}{\omega},$$

$$M' = J_x \frac{d\omega}{dt} \frac{\omega_o}{\omega} + 2M_r \frac{\omega_o}{\omega} + M_n \frac{\omega_o}{\omega} + M_c \frac{\omega_o}{\omega}.$$

Момент вращения системы — момент вращения электродвигателя — выразится следующим образом:

$$M = \sum J_x \frac{d\omega_o}{dt} \frac{\omega_o}{\omega} + \sum m_x \frac{dV_o}{dt} \frac{V_o}{\omega} + \sum 2M_r \frac{\omega_o}{\omega} + \sum F_m \frac{V_o}{\omega} + \sum M_n \frac{\omega_o}{\omega} + \sum F_n \frac{V_o}{\omega} + \sum M_c \frac{\omega_o}{\omega} + \sum F_c \frac{V_o}{\omega}.$$

Выражая первые два члена уравнения приведенных моментов через приведенный момент инерции, получим:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum J_x \frac{d\omega_o}{dt} \frac{\omega_o}{\omega} + \sum m_x \frac{dV_o}{dt} \frac{V_o}{\omega},$$

$$J = \sum J_x \frac{d\omega_o}{d\omega} \frac{\omega_o}{\omega} + \sum m_x \frac{dV_o}{d\omega} \frac{V_o}{\omega}.$$

Таким образом, для системы¹

$$M \frac{d\omega}{dt} + \sum 2M_r \frac{\omega_o}{\omega} + \sum F_m \frac{V_o}{\omega} + \sum M_n \frac{\omega_o}{\omega} + \sum F_n \frac{V_o}{\omega} + \sum M_c \frac{\omega_o}{\omega} + \sum F_c \frac{V_o}{\omega}. \quad (19)$$

В заключение обратим внимание на то, что по сравнению с многими опубликованными соотношениями уравнение (19) имеет иное математическое выражение, но ничем не отличается по существу анализа физических процессов. Исключением является лишь вопрос о применении исходного уравнения движения переменной массы, где автор обращает внимание на необходимость изменения классических уравнений движения, так как они рассматривают частный и практически нереальный случай движения. В этом смысле

¹ M_c , F_c и F_m — внешние моменты и силы рассматриваемой системы.

встречает возражения недавно опубликованная статья В. С. Ракиты [Л. 4], так как она основана на уравнении (2). Что же касается математического вида уравнения (19), то он основан на результатах анализа физического процесса движения переменной массы.

Дополнительно отметим, что при определении приведенного момента инерции из суммарной кинетической энергии системы, а не из выражения момента вращения для отдельного звена, не дает представления о суммарном моменте звена. Отдавая предпочтение тому или иному математическому виду уравнения движения, необходимо учесть это обстоятельство, так как методически важно в самом начале рядом поставить динамический момент и собственный статический момент отдельного звена и этим самым фиксировать внимание на возможной зависимости этих моментов друг от друга.

Литература

1. И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Перевод А. Крылова. Труды николаевской морской академии, 1915.
2. И. Мещерский. Динамика точки переменной массы, 1897.
3. К. Урнов. Электропривод полиграфических машин. Учебное пособие. Гизлегпром, 1950.
4. В. Ракита. Электропривод с переменной массой. Электричество, № 8, 1950.

[27.11.]



Электропривод скоростных непрерывных станов холодной прокатки

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. ДРУЖИНИН, инж. А. Е. ГУРЕВИЧ

ЦНИИТМАШ

Современный скоростной непрерывный стан холодной прокатки является сложнейшим агрегатом, проектирование которого выдвигает ряд важных проблем в области машино- и электромашиностроения, привода и автоматики. Достаточно указать, что для новых скоростных трехклетевых широкополосных станов скорость выхода металла из последней клетки может превышать 10...15 м/сек, а для пятиклетевых жестекатальных станов 30 м/сек. В этих станах не только предъявляются новые жесткие требования к рабочим органам стана, но коренным образом меняется вся система привода по сравнению со станами, работающими на низких скоростях.

Вопросы конструирования электрических машин предельной мощности, получение малых маховых моментов двигателя при заданной мощности и скорости для широкого диапазона регулирования полем получают особое значение. Важ-

Излагаются особенности электропривода скоростных непрерывных станов холодной прокатки. Дается методика определения мощности двигателей с учетом натяжения полосы и методика выбора типа привода.

ная роль следящих систем для данного автоматизированного привода также хорошо известна.

В статье освещаются некоторые актуальные вопросы электропривода скоростных непрерывных станов холодной прокатки.

Мощность приводов стана. Подсчет мощности стана может быть произведен на основе аналитических формул или на базе статистических данных (кривые удельного расхода энергии). Во всех ответственных случаях для надежности необходимо определить мощность обоими методами, так как аналитические формулы ввиду сложности процесса пока еще не в состоянии учесть все особенности пластической деформации металла при прокатке.

Мощность на шпинделе какой-либо клетки стана пропорциональна скорости прокатки.

$$P_c = \frac{M_c}{975} n \text{ [квт]},$$

$M_c = M_n + M_m$ — статический момент; M_m — момент добавочных сил трения, M_n — момент катки, кгм.

Метод кривых удельного расхода энергии позволяет достаточно быстро и просто подойти к определению оптимальных значений мощности скорости. Исходными данными для расчета является программа прокатки для данного стана и кривые удельного расхода энергии. Обычно удельный расход энергии на тонну выражается $\frac{\text{л.с. ч}}{\text{т}}$ и при построении кривой откладывается

по оси абсцисс в функции полученной толщины вытяжки металла. Статическая мощность при прокатке данного сорта определяется как произведение идеальной часовой производительности стана N , выраженной в тонно-часах, на удельный расход энергии A . Производительность может быть подсчитана по формуле:

$$N = vQ\gamma 3600 \text{ [т/час]}, \quad (2)$$

v — скорость полосы, м/сек;

Q — сечение полосы, м²;

γ — удельный вес, т/м³.

Тогда выражение для статической мощности имеет вид:

$$P_c = NA = 3600 AvQ \text{ [л. с.]}, \quad (3)$$

$$M_c = 135 AQ\gamma D \text{ [тм]}, \quad (4)$$

D — диаметр рабочих валков, м.

Для каждого непрерывного стана предусматривается прокатка нескольких сортов металла; правило, начальная и конечная толщина полосы, ширина и в некоторых случаях материал могут быть также различны. Для выявления характера нагрузки необходимо определить статический момент при прокатке металла по основным программам. Если задаться выходной скоростью полосы последней клетки стана, общей для всего сортамента, то оказывается удобным формулам (3) и (2) подсчитать суммарную статическую мощность, необходимую для совершения обжатия металла во всех клетях стана принятой выходной скорости.

В табл. 1 приведены результаты такого расчета для нескольких характерных программ трехвалкового непрерывного стана с длиной бочки 10 м и диаметром рабочего валка 520 мм. Скорость прокатки для всего сортамента на выходе из последней клетки выбрана 10 м/сек. В табл. 1 h_n и h_k — начальная и конечная толщины; b — ширина листа.

Таблица 1

h_n , мм	h_k , мм	b , мм	A , $\frac{\text{л.с. ч}}{\text{т}}$	N , т. ч	P_c , л.с. $\times 10^3$
1,5	0,6	1250	50	204	10,4
1,85	0,75	1250	45	286	12,8
3	1,2	1750	45	575	25,8
3,5	1,5	2000	42	845	35,4
6	2,5	2200	29	1550	45,0

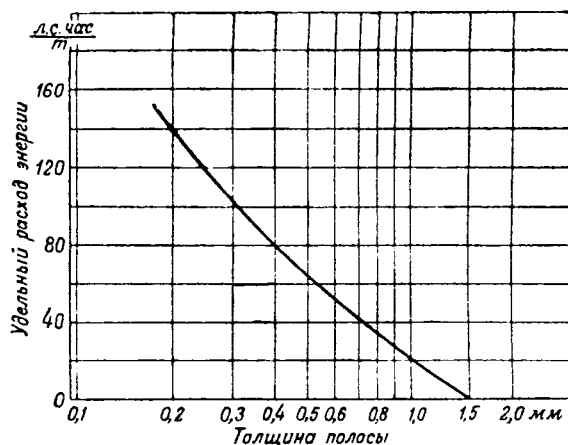


Рис. 1. Удельный расход энергии, принятый для расчета по первой программе.

На рис. 1 приведена кривая удельного расхода энергии, которая была использована при расчете для первой программы прокатки.

Результаты расчета получают большую наглядность, если нанести на график значения суммарной мощности двигателей клетей, скорости прокатки и часовой производительности для каждой программы прокатки. На рис. 2 представлен такой график.

Суммарное обжатие (в процентах) для каждой программы прокатки выбрано одинаковым (табл. 1), однако момент статического сопротивления изменяется в широком диапазоне. Статический момент является функцией удельного расхода энергии при данном обжатии и сечения полосы Q , что следует из (4). Поэтому и сум-

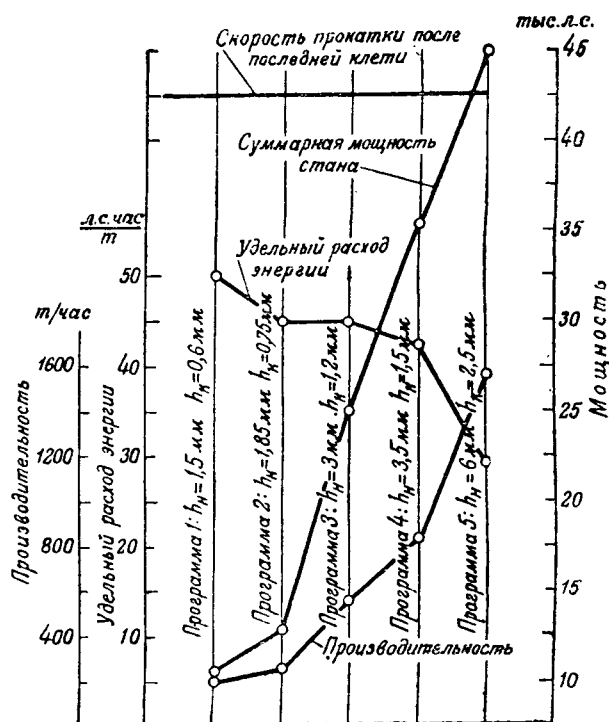


Рис. 2. Объединенная диаграмма суммарной мощности и производительности стана при одинаковой для всех программ выходной скорости полосы.

марная статическая мощность для каждой программы, подсчитанная из условия одинаковой выходной скорости, также меняется в широких пределах. Очевидно, что осуществление проката полосы по программе 5 (табл. 1) со скоростью 10 м/сек затруднительно, так как суммарная мощность стана при этом должна быть 45 тыс. л. с. и выполнение привода такой мощности оказывается практически невозможным. В настоящее время примерная суммарная мощность для скоростных трехклетевых станов составляет 10...15 тыс. л. с. и для клетевых станов 16...20 тыс. л. с. Дальнейшее увеличение мощности нерационально, а в ряде случаев и невозможно в связи с особенностями электропривода скоростных непрерывных станов.

Изменение статического момента при прокатке по основным характерным программам требует применения двигателя, регулируемого при постоянстве мощности.

Допустимая скорость прокатки для каждой программы будет различной. Например, задавая суммарной мощностью 12,8 тыс. л. с. (табл. 1), можно осуществить прокатку полосы со скоростью 10 м/сек только для второй программы. Для третьей, четвертой и пятой программ прокатки такая скорость недопустима, так как суммарная мощность будет значительно выше принятой в 12 800 тыс. л. с. Для первой программы прокатки, наоборот, возможно превзойти скорость 10 м/сек. Исходя из подобных соображений, расчет необходимо вести в следующей последовательности: задавая постоянным значением суммарной мощности, определить по кривым для каждой программы удельный расход энергии A (для суммарного обжатия во всех клетях) и по формуле (3) подсчитать производительность N . Зная производительность N для каждой программы (подсчитанную из условия постоянства мощности), надо по (2) найти скорости прокатки для рассматриваемых программ. Полученные таким образом скорости прокатки металла по выходе из последней клетки являются искомыми допустимыми скоростями для каждой программы при постоянной суммарной мощности стана.

На рис. 3 в виде графика даны результаты такого расчета, выполненного для рассматриваемого трехклетьевого стана. Суммарная мощность принята равной 12 тыс. л. с.

Построенная диаграмма позволяет определить скорость, мощность и диапазон регулирования каждого из двигателей клетей, исходя из распределения обжатий по клетям стана для каждой программы, полученной допустимой скорости прокатки после третьей клетки и принятой суммарной мощности.

Режим нагрузки непрерывного стана является практически длительным и определяется для каждой программы постоянной величиной статического момента. Для современных скоростных станов при расчете время холостого хода двигателя надо считать равным нулю, так как необходимо предусмотреть возможность непре-

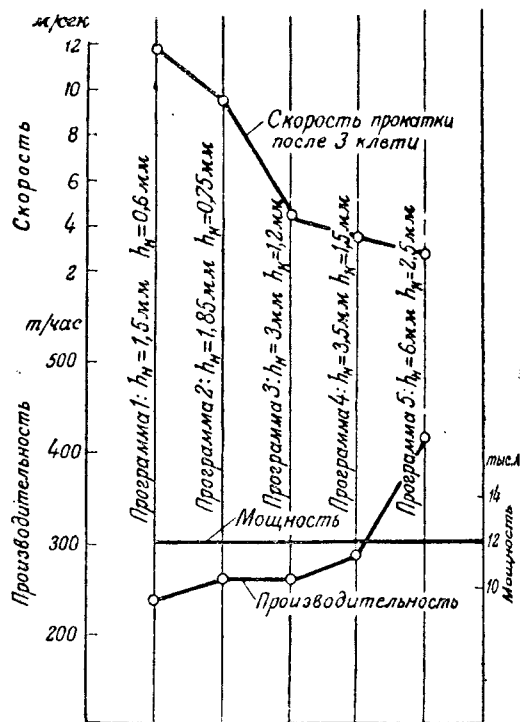


Рис. 3. Объединенная диаграмма производительности и скорости прокатки при постоянной суммарной мощности.

рывной работы, которая может быть достигнута применением сварки концов рулонов на входной стороне стана при заправочной скорости.

При расчете может встретиться случай, когда суммарная мощность двигателей стана с увеличением обжатия будет не увеличиваться, а уменьшаться, что на первый взгляд кажется парадоксальным. Например, расчеты показали, что пятиклетьевого жестекатального стана при постоянной скорости прокатки 22 м/сек на выходе из последней клетки при толщине исходной ленты 2,5 мм и конечной 0,5 мм потребная суммарная мощность будет равна 19,5 тыс. л. с. (при ширине листа 820 мм). Если при такой исходной толщине 2,5 мм увеличить обжатие на 0,2 мм, оставляя скорость после пятой клетки той же (22 м/сек), то потребная суммарная мощность упадет до 15 тыс. л. с. Это объясняется тем, что при увеличении обжатия в какой-либо клетке скорость выхода металла из этой клетки увеличивается незначительно (в пределах обжатия металла), в то время как скорость входа металла в клетку уменьшится пропорционально обжатию, что объясняется необходимостью сохранения секундного объема металла до и после клетки. Таким образом, если в пятиклетьевом стане увеличить обжатие, например, в четвертой и пятой клетях, сохраняя выходную скорость пятой клетки неизменной, то для обеспечения непрерывной прокатки необходимо уменьшить скорости всех клетей, кроме последней, в итоге и является причиной уменьшения суммарной мощности.

До настоящего времени полностью не решен вопрос о влиянии скорости на удельные

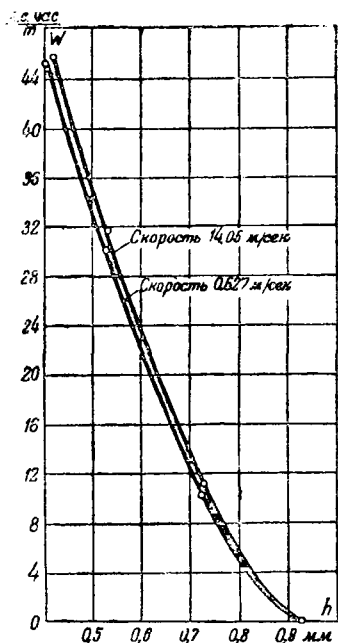


Рис. 4. Удельный расход энергии, полученной на трехклетевом четырехвалковом стане при прокатке малоуглеродистой стали. Диаметр рабочего вала 60 мм.

ды энергии. Экспериментальное исследование вопроса было поставлено авторами в ЦНИИТ-АШ на лабораторном трехклетевом стане с диаметром рабочих валков 60 мм при длине лунки 100 мм. Были впервые освоены скорости прокатки до 18 м/сек, в несколько раз превышающие применяемые скорости.

Кривые рис. 4 показывают, что для данного стана удельный расход энергии можно считать практически независимым от скорости прокатки. Это позволяет рекомендовать использование для предварительного расчета мощности приводов рабочего стана кривых, полученных на станах, работающих с меньшими скоростями в условиях идентичности некоторых основных параметров.

Влияние натяжения на мощность электропривода. Особенностью непрерывных станов холодной прокатки является прокатка металла с натяжением полосы между клетями стана и между последней клетью и моталкой.

Следовательно, мощность двигателя клетки должна подсчитываться с учетом усилия натяжения. Необходимо установить зависимость мощности, необходимой для осуществления данного процесса, от величины переднего и заднего натяжений. Для выяснения этого рассмотрим в качестве примера трехклетевый непрерывный стан. Натяжение T_{23} между второй и третьей клетью (рис. 5) создается за счет тягового усилия двигателя третьей клетки. Энергия двигателя третьей клетки, расходуемая в связи с наличием натяжения полосы в процессе прокатки,

$$W_1 = v_{23} T_{23} t, \quad (5)$$

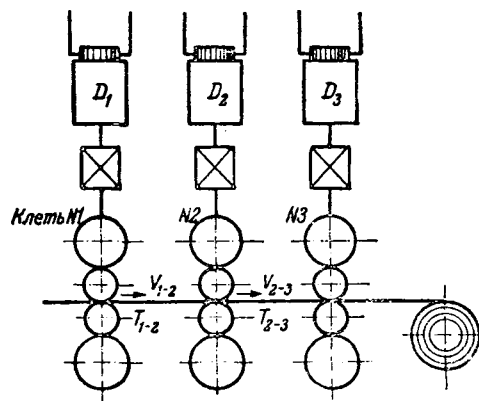


Рис. 5.

где T_{23} — общее натяжение в полосе между третьей и второй клетями;

v_{23} — скорость полосы между третьей и второй клетями;

t — время прокатки.

Работа, затраченная непосредственно на создание в полосе упругонапряженного состояния на участке между второй и третьей клетями, может быть подсчитана как количество потенциальной энергии, запасенной в полосе ее упругим растяжением:

$$W_2 = \frac{T_{23}^2 l}{2EQ} = \frac{T_{23}^2 v_{23} t}{2EQ}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости;

Q — сечение полосы;

l — длина полосы.

Отношение энергий

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{2E}{\sigma_{cp}}, \quad (7)$$

где $\sigma = \frac{T_{23}}{Q}$.

Среднее удельное натяжение полосы σ_{cp} выбирается примерно равным половине предела текучести материала $\frac{\sigma_s}{2}$. Таким образом, для малоуглеродистой стали, где предел текучести $\sigma_s = 22-25 \text{ кг/мм}^2$, по выражению (7) отношение $\frac{W_1}{W_2} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^4}{25} = 1600$. Это позволяет считать, что практически вся энергия, затраченная двигателем для поддержания натяжения, передается через упругодеформированную полосу к предыдущей клетю, где расходуется на работу по деформации металла.

Основываясь на общих положениях теории пластической деформации, есть основание полагать, что количество энергии, которое необходимо затратить для смещения данного объема металла, не зависит от того, ведется ли прокатка полосы с применением натяжения или без него. В связи с этим соотношение мощностей

применительно к клети непрерывного стана будет иметь вид:

$$P = P_0 - v_n T_n + v_s T_s, \quad (8)$$

где P — мощность, необходимая для совершения данного обжатия при прокатке с передним натяжением T_n и задним натяжением T_s ;

v_s — скорость полосы, входящей в клеть;

v_n — скорость полосы, выходящей из клети;

P_0 — мощность, необходимая для совершения данного обжатия при прокатке без натяжений.

Для подтверждения этого положения был поставлен ряд опытов на упомянутом выше лабораторном трехклетьевом стане при различных обжатиях. Прокатка велась при различных значениях переднего и заднего натяжений (рис. 5, где $T_n = T_{23}$, $T_s = T_{12}$), которые замерялись специальным приспособлением [Л. 5] и фиксировались на ленте осциллографа. Производился замер мощности двигателя при прокатке без натяжения и при различных значениях натяжений. Учет потерь в системе привода позволил получить мощность на валу. В табл. 2 приведены результаты одного из опытов. Через h_n и h_s обозначены начальные и конечные толщины полосы при ширине полосы 30 мм. P_s обозначает мощность, зафиксированную при эксперименте, P — мощность, полученная по формуле (8) с использованием исходных данных опыта.

Таблица 2

h_n , мм	h_s , мм	T_n , кг	T_s , кг	P_s , квт	P , квт
1	0,63	0	0	7	7
1	0,63	200	0	5,5	5,39
1	0,66	280	0	4,6	4,7
1	0,63	276	140	5,7	5,48
1	0,63	236	46	5,87	5,6
1	0,63	217	46	5,58	5,47
1,88	1,46	0	0	3,16	3,16
1,88	1,46	350	0	2,14	2,13

Близкое совпадение выводов теории и эксперимента дает основание уверенно применять эту методику при расчетах.

Выбор типа привода клетей. В непрерывных станах, работающих при низких скоростях прокатки, для привода клетей, как правило, применяются двигатели одинакового типа и мощности, с редуктором на каждой клети при передаточном числе, большем единицы. С увеличением скорости прокатки кинематическая схема привода получает принципиальные изменения, а двигатели клетей в ряде случаев требуют специального исполнения. Это обусловлено следующими обстоятельствами.

Скорость полосы по выходе из валков

$$v = \frac{\pi D n (1 + S)}{60},$$

где S — опережение металла. Диаметр рабочего вала не может выбираться произвольно, так как увеличение диаметра влечет за собой возрастание давления металла на валки и моменты катки. Для скоростных станов максимальный диаметр рабочего вала 500...530 мм. Таким образом, скорости рабочего вала однозначно определяются заданной скоростью прокатки. Например, для пятиклетьевого непрерывного жесткого стана при выходной скорости полосы из последней клети 32 м/сек скорость рабочих валов пятой, четвертой и третьей клетей при $D=520$ должны быть соответственно 1150, 860, 580 об/мин. Расчеты показывают, что мощность двигателей клетей при таких скоростях и при диаметре вала 1100 мм будет иметь порядок: пятая клеть — 4 000...5 000 л. с.; четвертая — 3 500...4 000 л. с.; третья — 3 500...4 000 л. с., вторая — 3 500...4 000 л. с., первая клеть — 1 800...2 200 л. с.

Из общего критерия предельной мощности шины [Л. 3] следует, что по межколлекторному напряжению произведение мощности машины на скорость вращения ограничено величиной

$$(Pn)_{ek} = (1,8 \dots 2) 10^6$$

и по условиям коммутации

$$(Pn)_{es} = (2,2 \dots 2,6) 10^6.$$

Для пятиклетьевого стана величина Pn двигателя пятой клети без учета перегрузочной способности будет $Pn = 1150 \cdot 5000 \cdot 0,736 = 4,2$ для четвертой клети $Pn = 2,65 \cdot 10^6$.

Таким образом, даже при безредукторном приводе для последних клетей пятиклетьевого стана выполнение привода в виде однодвигательного оказывается невозможным, так как мощность машин получается выше предельной.

Второй основной причиной, заставляющей идти на дробление двигательной мощности отдельных клетей стана, — необходимость обеспечения минимального времени ускорения стана. Чем быстрее ускоряется стан до заданной скорости, тем меньшее количество проката выходит из допусков вследствие влияния скорости прокатки на вытяжку металла [Л. 4], что особенно заметно для скоростных станов.

Так как ускорение до установившейся скорости происходит, как правило, при ослабленном потоке и при наличии момента статического сопротивления на валу привода, то допустимая кратность тока за период ускорения может явиться препятствием для получения заданного времени пуска. В особенно жестких условиях находятся последние клети, так как для скоростного стана характерным является увеличение от первой к последним клетям отношения длин

динамического момента привода к номинальному моменту двигателя $\frac{M_d}{M_n}$. Это объясняется необходимостью увеличения скоростей двигателей последних клетей вследствие вытяжки металла, что ведет к росту величины $\frac{dn}{dt}$ и при приблизительном равенстве мощностей по клетям стана — к уменьшению номинального момента. При этом маховой момент механизма остается одинаковым для всех клетей. Может быть рекомендовано простое выражение для определения допустимого динамического момента и маховых масс привода:

$$M_d = \frac{M_n (\lambda - \gamma)}{k}, \quad GD^2 = \frac{M_n (\lambda - \gamma) 375}{k \frac{dn}{dt}}, \quad (10)$$

λ — допустимая перегрузка двигателя по току;
 γ — кратность статического тока номинальному;
 k — диапазон регулирования двигателя ослаблением поля ($k > 1$).

В силу сказанного для большинства скоростных непрерывных станов только привод первой клетки возможен безредукторным в однодвигательном исполнении. Для последующих клетей требуется необходимыми двухдвигательный привод. Для пятиклетевых станов, подобных рассмотренному, дробление мощности пополам для последних клетей может не дать результатов, окажется необходимым применение повышающего редуктора (передаточное отношение меньше единицы). Кроме того, часто дробление двигательной мощности оказывается необходимым из условия расположения двигателей по месту.

Необходимо отметить, что при выборе типа привода скоростного стана в качестве варианта должна быть рассмотрена возможность применения двигателей с двухходовой обмоткой якоря.

Предельно использованные электрические машины при двухходовой обмотке якоря при заданной скорости могут быть выполнены на мощность, превосходящую указанную выше, так как лучшим критерием выполнимости машины в этом случае являются условия коммутации. Кроме того, для ряда машин применение двухходовой обмотки позволяет двигатель той же мощности выполнить в меньшем габарите.

Диапазон регулирования двигателя моталки ослаблением поля (при регулировании натяжения в функции тока) определяется отношением максимального диаметра бунта к диаметру пустого барабана. Максимальный диаметр бунта есть функция развеса бунта и диаметра барабана моталки. Для пятиклетевых жестекатальных станов диаметр барабана моталки нельзя сделать больше чем 400...450 мм при развесе бунта 12...15 т. При скорости прокатки 32 м/сек (диаметр барабана 420 мм) максимальная скорость барабана моталки

$$n = \frac{v \cdot 60}{\pi D} = \frac{32 \cdot 60}{\pi \cdot 420} = 1460 \text{ об/мин.}$$

При безредукторном приводе моталки двигателя должен быть выбран на 370...1460 об/мин, что определяется четырехкратным увеличением диаметра при развесе бунта 12 т.

При мощности двигателя моталки 600 л.с. и ускорении стана до максимальной скорости 32 м/сек за 10 сек максимально допустимый динамический момент и маховой момент могут быть подсчитаны по формуле (10).

Для жестекатальных станов обычно $\gamma = 1$, так как режим близок к длительному. Перегрузку двигателя по току во всем диапазоне скоростей примем равной 2,5. Тогда

$$M_d = \frac{M_n (\lambda - \gamma)}{k} = 0,375 M_n;$$

$$GD^2 = \frac{M_n (\lambda - \gamma)}{k \frac{dn}{dt}} 375 = 1120 \text{ кгм}^2.$$

Маховой момент механизма при длине барабана моталки 1100 мм, как показывают расчеты, может быть минимально порядка 600...650 кгм² при особо тщательном его конструировании. Следовательно, двигатель мощностью 600 л.с., 370...1460 об/мин должен быть выполнен с маховым моментом якоря не более 520...550 кгм², что даже при дроблении мощности пополам ставит жесткие условия на конструирование двигателя. При мощности двигателя 600 л.с. среднее удельное натяжение в полосе будет составлять 3...4 кг/мм² при прокатке полосы конечной толщины 0,3...0,4 мм и ширине 800...850 мм.

Таким образом, жесткие условия выполнения привода заставляют идти на снижение средних удельных натяжений до 3...5 кг/мм² против принятых обычно около половины предела текущей материала (20...25 кг/мм²).

Увеличение мощности привода моталки не приводит к уменьшению отношения динамического момента к моменту номинальному, так как маховой момент двигателя возрастает приблизительно пропорционально квадрату его момента.

Трехклетевые станы в этом отношении находятся в более легких условиях, так как допустимо увеличение диаметра барабана моталки до 720...760 мм, что ведет к уменьшению диапазона регулирования при том же развесе бунта и к понижению максимальной скорости. Кроме того, максимальная скорость полосы для трехклетевых широкополосных станов будет иметь порядок 10...15 м/сек, т.е. значительно ниже, чем для пятиклетевых станов. Поэтому для привода моталки трехклетевых станов будет возможным в ряде случаев применение понижающего редуктора ($i > 1$).

Особенности применения повышающего редуктора ($i < 1$). Применение индивидуального привода валков позволяет уменьшить суммарный маховой момент привода даже по сравнению с двухдвигательным приводом. Это объясняется отсутствием шестеренной клетки и возможностью

расчета механических связей, исходя из перегрузочного момента одного двигателя, что ведет к облегчению климатических деталей. Кроме того, индивидуальный привод не требует специального исполнения двигателя, что имеет место при двухдвигательном приводе.

В ЦНИИТМАШ Афанасьев при участии авторов этой статьи провел исследование индивидуального привода валков на трехклетьеовом непрерывном стане холодной прокатки. Результаты исследования показали на принципиальную возможность применения индивидуального привода при холодной прокатке металла и позволили выявить дополнительно некоторые преимущества технологического порядка (большие допуски на разность диаметров рабочих валков при индивидуальном приводе). Однако для большинства случаев безредукторного привода скоростных станов применение индивидуального привода валков становится трудноосуществимым, а в ряде случаев и невозможным вследствие малого межосевого расстояния рабочих валков, не превышающего 520...530 мм.

Применение редуктора с $i < 1$ на последних клетях позволяет разместить индивидуальные двигатели валков вследствие увеличения расстояния между осями больших шестерен.

Весьма существенно отметить, что применение повышающего редуктора и более тихоходного двигателя в ряде случаев позволяет получить меньшую кратность отношения динамического момента к моменту номинальному по сравнению с безредукторным приводом при быстроходном двигателе (скорость прокатки и мощности двигателей в обоих случаях равны). Это является очень существенным для последних клетей пятиклетьевого жестекатального стана.

Для доказательства этого введем обозначения: n_g — скорость валков, необходимая для обеспечения заданной скорости прокатки полосы; GD_m^2 — маховой момент механизма; GD_d^2 — маховой момент двигателя; i — передаточное отношение повышающего редуктора; $M_{н1}$, $M_{д1}$ — номинальный и динамический моменты при безредукторном приводе; $M_{н2}$, $M_{д2}$ — номинальный и динамический моменты на валу двигателя для случая привода с повышающим редуктором. Если положить, как это показывает Н. А. Тищенко, что маховой момент двигателя может быть определен выражением $GD_d^2 = C \frac{P_d}{n_g}$, где C — коэффициент, определяемый рядом характерных параметров, то, обозначая $\beta_1 = \frac{M_{д1}}{M_{н1}}$ и $\beta_2 = \frac{M_{д2}}{M_{н2}}$, можем напи-

сать:

$$\beta_1 = \frac{n_g \frac{dn_g}{dt} \left(GD_m^2 + C_1 \frac{P_d}{n_g} \right)}{975 \cdot 375 P},$$

$$\beta_2 = \frac{n_g \frac{dn_g}{dt} \cdot i^2 \left(\frac{GD_m^2}{i^2} + \frac{C_2 P_d}{n_g i} \right)}{975 \cdot 375 P}.$$

В выражении (12) не учтен маховой момент редуктора, что допустимо, так как практи маховой момент редуктора мал по сравнению с маховым моментом всего механизма. На основании (11) и (12) может быть определено отношение

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{GD_m^2 + C_1 \frac{P_d}{n_g}}{GD_m^2 + C_2 \frac{P_d i}{n_g}}.$$

Из выражения (13) следует, что применение редуктора с $i < 1$ и тихоходного двигателя позволяет уменьшить кратность динамического момента к номинальному по сравнению со случ быстроходного двигателя при безредукторном приводе¹. Чем меньше маховой момент механизма по сравнению с маховым моментом двигателя тем заметнее это преимущество.

При выводе мы полагали, что маховой момент двигателя, выполняемого при одинаковой мощности, но с разными значениями номинальной скорости, пропорционален его моменту. Однако при выборе двигателя в конкретном случае проектирования может иметь место отклонение приведенной зависимости. При этом следует учитывать, что если маховой момент двигателя уменьшении его номинальной скорости и постоянной мощности увеличивается пропорционально M_n^k , то применение повышающего редуктора тихоходного двигателя рационально с точки зрения уменьшения кратности динамического момента при значениях $k < 2$, что следует из формулы (13).

Литература

1. Д. П. Морозов. Теория электропривода и автоматики реверсивных станов. Госэнергоиздат, 1949.
2. А. И. Целиков. Прокатные станы. Металлургия, 1946.
3. В. Т. Касьянов, И. Н. Рабинович, Р. Лютер. Машины постоянного тока, предельно использованные по мощности. ВЭП, № 11, 1948.
4. А. Н. Лейченко. Влияние скорости при процессе холодной прокатки. Сталь, № 8, 1949.
5. Н. Н. Дружинин. Анализ переходных режимов натяжения при холодной прокатке. Сталь, № 12, 1948.

[2. 3. 1]

¹ Для предельно использованных машин значения C_1 и C_2 близки друг к другу.



Электродинамическое моделирование электротермических устройств

Кандидат техн. наук Г. В. ДЕРШВАРЦ, доц. М. Я. СМЕЛЯНСКИЙ

Центропромэлектронечь

Теория физического подобия получила свое временное развитие в трудах русских ученых.

Они сформулировали и доказали две из трех (вторую и третью) теорем подобия [Л. 1, 2] и первые использовали аппарат однородных функций для ее математического обоснования [Л. 3].

Учение о физическом подобии нашло широкое применение в теплотехнике, гидро- и аэродинамике, но в электротехнике его использование заслуженно ограничено.

Аналитические методы расчета, которыми располагает конструктор-электротермист, к сожалению, еще мало разработаны. Иные расчеты столь сложны, что должны быть отвергнуты за нехватку времени и средств. Подавляющее же большинство проблем, которое выдвигает практическое конструирование, не поддается математическому решению. Во всех этих случаях необходимо такой эксперимент, который, во-первых, правильно отражал бы явления в проектируемом аппарате и, во-вторых, был бы дешев.

Теория электродинамического подобия дает ряд интересных в данном случае экспериментатору вопросов: 1) как нужно построить и испытать уменьшенную модель конструируемого аппарата с тем, чтобы электродинамические явления в модели и оригинале были подобны; 2) как обработать полученный при испытании материал, чтобы распространить его на оригинал.

Какой же круг вопросов из области электротермики можно экспериментально исследовать, опираясь на теорию электродинамического подобия? Это — весь комплекс проблем, который связан со спецификой электродинамического поля. Например, проводя опыт над уменьшенной моделью некоторого индукционного нагревательного устройства, нам, в первую очередь, важно, чтобы между моделью и оригиналом существовало геометрическое подобие в отношении мест концентрации активной и реактивной мощности. Во вторую очередь, может иметь место только подобие поля. Другим примером может

Освещаются принципы электродинамического моделирования применительно к конструированию электротермических устройств, в частности индукционных печей и токоподводов.

явиться моделирование вторичных токоподводов к руднотермическим и дуговым электропередачам.

Здесь важно, чтобы индуктивные и активные сопротивления, связанные с различными контурами шин, были подобны соответствующим величинам в оригинале. Уверенность в этом мы можем иметь только тогда, когда поля шинопроводов модели и оригинала подобны.

Приведенные примеры (число их можно значительно умножить) показывают, что электродинамическое моделирование является весьма мощным экспериментальным аппаратом, с помощью которого можно решать сложные, не доступные расчету вопросы. Следует еще подчеркнуть, что моделировать можно и такие аппараты, которые содержат нелинейные конструктивные элементы (например, сталь).

Критерии электродинамического подобия. Подобие электродинамических полей предполагает геометрическое подобие модели и оригинала, но не сводится только к нему. Уже в электро- и магнитостатических полях наряду с геометрическим подобием необходимо соблюдать одинаковую пропорциональность между физическими константами среды (ϵ , μ) оригинала и модели. В электродинамическом подобии еще играют роль и масштабы времени. Если среда линейна, то вид поля не зависит от интенсивности векторов поля.

Предположим среды линейными и векторы поля синусоидальными во времени. В качестве исходной точки для определения критериев подобия возьмем уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + j\epsilon\omega\vec{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -j\mu\omega\vec{H}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0. \quad (4)$$

Если составить из (1) $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H}$, то при помощи (2) и (3) мы найдем:

$$\Delta \vec{H} = j\omega\mu\vec{J} + \epsilon\mu\omega^2 \vec{H}. \quad (5)$$

Аналогичное выражение можно получить и для \vec{E} , если составить $\text{rot rot } \vec{E}$ из (2) и воспользоваться (1) и (4):

$$\Delta \vec{E} = j \omega \mu \gamma \vec{E} + \epsilon \omega \vec{E}. \quad (6)$$

Оператор Лапласа Δ можно без нарушения общности считать записанным в декартовой системе координат. Написав уравнение (5) для оригинала и модели, потребуем, чтобы все величины, входящие в (5) для модели, измерялись в долях¹ от величин, входящих в (5) для оригинала:

$$\left. \begin{aligned} \omega_m &= m_\omega \omega_o, & \gamma_m &= m_\gamma \gamma_o; \\ \mu_m &= m_\mu [\mu]_o, & \epsilon_m &= m_\epsilon [\epsilon]_o; \\ (\partial x_m)^2 &= m_l^2 (\partial x_o)^2; & (\partial y_m)^2 &= m_l^2 (\partial y_o)^2; \\ (\partial z_m)^2 &= m_l^2 (\partial z_o)^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Тогда для модели

$$\Delta \vec{H} = j m_\omega m_\mu m_\gamma m_l^2 \omega_o [\mu]_o \gamma_o \vec{H} + m_\epsilon m_\mu [m_\omega]^2 [m_l]^2 [\epsilon]_o [\mu]_o \omega_o^2 \vec{H} \quad (5')$$

и для оригинала

$$\Delta_o \vec{H} = j \omega_o [\mu]_o \gamma_o \vec{H} + [\epsilon]_o [\mu]_o \omega_o^2 \vec{H}. \quad (5'')$$

Очевидно, что (5') и (5'') будут тождественны, если потребовать, чтобы в (5')

$$m_\omega m_\mu m_\gamma (m_l)^2 = 1 \quad (8)$$

и

$$m_\epsilon (m_l)^2 m_\mu (m_\omega)^2 = 1. \quad (9)$$

Если умножить (8) на $\omega_o [\mu]_o \gamma_o l_o^2$, то получим, учитывая (7):

$$l_m \sqrt{f_m \mu_m \gamma_m} = l_o \sqrt{f_o [\mu]_o \gamma_o} = \text{idem}, \quad (10)$$

где $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Это — первый критерий подобия.

Умножая (9) на $\omega_o^2 [\mu]_o [\epsilon]_o l_o^2$, получим аналогично второй критерий подобия:

$$l_m f_m \sqrt{\epsilon_m \mu_m} = l_o f_o \sqrt{\epsilon_o \mu_o} = \text{idem}. \quad (11)$$

Здесь $l_m = m_l l_o$, где l_m и l_o — любые два подобных размера модели и оригинала.

Принято записывать (10) и (11) в форме

$$P_1 = l \sqrt{\mu \gamma}, \quad (10')$$

$$P_2 = l f \sqrt{\mu \epsilon}. \quad (11')$$

Нетрудно убедиться в том, что одновременное соблюдение (10) и (11) крайне затруднительно.

Чтобы $P_{1,m} = P_{1,o}$ и $P_{2,m} = P_{2,o}$ можно было бы, например, моделировать с помощью одной проницаемости μ , уменьшая масштаб модели

в два раза, следует увеличить μ в четыре. Уже этот пример говорит о трудностях, которые вырастают на пути моделирования при помощи постоянных сред.

Обычно довольствуются выполнением (10') либо (11'). При этом следует руководствоваться тем характером процесса, который лежит моделировать. Так, если желательно моделировать процесс, происходящий в проводящей среде, где преобладают токи проводимости, следует выбрать критерий P_1 . Если же, наоборот, желательно моделировать процесс в диэлектрике, где преобладают токи смещения, то следует при моделировании руководствоваться

Для электротермии удобно моделировать процессы, меняя только частоту и размер, гласно критериям

$$P_1 = l \sqrt{f}, \quad (12)$$

$$P_2 = l f, \quad (13)$$

сохраняя, разумеется, $\mu_m = [\mu]_o$, $\gamma_m = \gamma_o$, $\epsilon_m = [\epsilon]_o$.

Чаше всего приходится иметь дело с процессами, происходящими в двух разнородных средах одновременно (т. е. в проводящей и диэлектрической среде). Например, в индукционной печи проводимости протекает в витках индуктора и садке, а токи смещения между витками индуктора и в толще футеровки (это происходит вследствие межвитковой емкости). Вместе с тем очень важно исследовать процесс, связанный с токами проводимости (например, нагрев садки, кожуха, действие экранов, электрический КПД системы индуктор — садка). Поэтому, руководствуясь критерием P_1 , не следует слишком уменьшать размеры, увеличивая частоту. При слишком большом отношении $\frac{f_m}{f_o}$ есть

исказить условия однозначности в оригинале модели и получить неверные зависимости.

Нельзя также полагать, что, моделируя гласно (11''), можно исследовать закономерности между частотой и величиной пробивного напряжения для индукторов вакуумных печей. Критерии высокочастотного разряда в разреженном газе отличаются от (11'').

Моделирование индукционных нагревательных устройств. Моделирование индукционных нагревательных устройств рационально показывать на конкретном примере. Поставим следующую задачу.

Свойства некоторого сложного и большого индукционного нагревательного устройства, которое конструируется на 500 гц, неизвестны. Необходимо исследовать уменьшенную модель, выяснив при этом коэффициент пересчета напряжения на индукторе модели к соответствующему напряжению в оригинале с тем, чтобы получить зависимость между их мощностями, поглощаемыми садкой, экранами, кожухами и т. д. Находим $\cos \varphi_o$, если известен $\cos \varphi_m$. Оценить, правильно ли выбрано число витков индуктора.

¹ Здесь $[\mu]_o$ и $[\epsilon]_o$ — проницаемость оригинала в отличие от μ_o и ϵ_o — проницаемости вакуума.

Подбирая в данном случае частоту для модели, надо учесть, что желательно не выходить за рамки диапазона „машинных“ частот (практически за частоту 10 000 гц), памятуя о вышеприведенном замечании о токах смещения и имея в виду, что чем меньше частота, тем проще выполнить электрические измерения. Ближайшая 10 000 гц стандартная частота в СССР равна 1000 гц. На ней и следует проводить испытание модели. При этом сохранится $\gamma_m = \gamma_o$, $\epsilon_m = \epsilon_o$, $\mu_m = \mu_o$. Необходимо построить модель так, чтобы согласно (10'')

$$l_m = l_o \sqrt{\frac{f_o}{f_m}}. \quad (12)$$

Таким образом, линейные размеры модели в $\sqrt{10} \approx 3.16$ раза меньше размеров оригинала.

Перейдем теперь к определению соответствия H_o , требуя, чтобы существовало равенство деления мощностей в проводящих частях, в модели и оригинале. Как известно, потери в них равны, если

$$\left(\int_{F_m} S_m dF_m \right)_D = \left(\int_{F_o} S_o dF_o \right)_D, \quad (13)$$

S — комплексный вектор Умова-Пойнтинга — площади оригинала и модели.

Интегральное равенство (13) предполагает подобии поля равенство соответствующих сумм интегральной суммы. Таким образом,

$$H_m^2 \sqrt{f_m} \Delta F_m = |H_o|^2 \sqrt{f_o} \Delta F_o, \quad (14)$$

мы под H_m и ΔF_m понимаем площадку и юр, определенные в геометрически сходных оригиналом местах.

Из равенства (14) следует:

$$|H_m| = |H_o| \sqrt{16}. \quad (15)$$

Нетрудно вывести соотношение между H , протекающими в модели и оригинале, равенстве потерь, когда имеет место (15). В этом деле, интегрируя по геометрически подобным путям, имеем:

$$\oint_{C_o} (H_o dl_o) = I_o \omega_o \quad (16)$$

$$\oint_{C_m} (H_m dl_m) = I_m \omega_m, \quad (17)$$

Учитывая во внимание, что $\omega_o = \omega_m$, получим (16) и (17) при соблюдении (15) и (12):

$$I_m = \frac{I_o}{\sqrt{16}}. \quad (18)$$

Из равенства потерь, запишем:

$$I_{o, \partial}^2 R_o = I_{m, \partial}^2 R_m. \quad (19)$$

Учитывая (18), из (19) находим, что

$$R_m = \sqrt{16} R_o. \quad (20)$$

При подобии поля и равенстве³ (13) имеет место соотношение

$$(S_o \Delta F_o)_M = (S_m \Delta F_m)_M. \quad (21)$$

Но мнимая часть комплексного вектора Умова-Пойнтинга есть не что иное, как реактивная энергия, проходящая в единицу времени через площадку сечением 1 см². Отсюда, проделывая выкладки, сходные с теми, которые были выполнены для получения (20), можно написать:

$$(X_m) = \sqrt{16} (X_o). \quad (22)$$

Индексом i обозначены внутренние индуктивные сопротивления, которые связаны с полями в проводниках.

Рассмотрим теперь соотношение между внешними индуктивностями. Определим внешнюю индуктивность, связанную с индуктором соотношением

$$\omega \Phi_i = I L_i, \quad (23)$$

где

$$\Phi_e = \frac{I \omega}{[R_{mag}]_i} = \frac{\mu_o I \omega S_{mag}}{l_{mag}}. \quad (24)$$

Здесь μ_o — проницаемость вакуума и

$$\frac{l_{mag}}{S_{mag}} = \sum_{k=1}^n \frac{[l_{mag}]_k}{[S_{mag}]_k}, \quad (25)$$

где k — номер элемента внешнего к металлическим частям пространства, заполненного полем,

$$R_{magk} = \frac{1}{\mu_o} \frac{[l_{mag}]_k}{[S_{mag}]_k} \quad (26)$$

есть сопротивление k -того элемента внешнего пространства, связанного с внешним потоком.

Из (23) и (24) можно получить:

$$L_e = \frac{\omega^2 \mu_o S_{mag}}{l_{mag}}.$$

или

$$X_e = \frac{\omega \mu_o S_{mag} \omega^2}{l_{mag}}. \quad (27)$$

Отсюда видно, что

$$(X_m)_e = \sqrt{16} (X_o)_e. \quad (28)$$

Значит между внешними индуктивными сопротивлениями имеется та же зависимость, как и между внутренними.

Так как на зажимах индуктора реактивное сопротивление $X = X_e + X_i$, то для $\cos \varphi$ получим:

$$\cos \varphi_m = \frac{R_m}{\sqrt{R_m^2 + (X_m)^2}}, \quad (29)$$

$$\cos \varphi_o = \frac{R_o}{\sqrt{R_o^2 + (X_o)^2}}. \quad (30)$$

³ (13) индекс D является символом действительной части комплексного вектора Умова-Пойнтинга.

³ Индекс M является символом мнимой части комплексного вектора Умова-Пойнтинга.

Учитывая (20), (22) и (28), заключаем, что

$$\cos \varphi_{\text{м}} = \cos \varphi_0. \quad (31)$$

Из равенства мощностей следует:

$$U_{\text{м.э.}} I_{\text{м.э.}} \cos \varphi_{\text{м}} = U_{0.э.} I_{0.э.} \cos \varphi_0.$$

Учитывая (31) и (18), получим:

$$U_{\text{н.э.}} = \sqrt[4]{16} U_{0.э.} \quad (32)$$

Следует кратко остановиться на том, как надо проводить данный опыт.

На индуктор модели устройства подается какое-либо точно замеренное напряжение. После того, как температура модели установится во всех ее точках, проводят измерение потерь с охлаждающей водой (индуктора, крышек кожуха) и потерь через стенки кожуха или в экранах (измеряя температуру отдельных элементов площади кожуха или экранов). Вычитая мощность потерь из показаний ваттметра, можно заключить о мощности, поглощаемой садкой. Полезная мощность и мощность потерь, равные замеренным в оригинале, будут достигнуты при напряжении на индукторе оригинала:

$$U_{0.э.} = 0,5 U_{\text{м.э.}}$$

Дальнейшие опыты не нужны, ибо полезная мощность и потери при номинальном напряжении могут быть подсчитаны из соотношения

$$\left(\frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{он}}} \right)^2 = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{он}}}, \quad (33)$$

где н — индекс для номинальных величин, а он — индекс величин, полученных из опыта.

Если полученное из данного соотношения значение соответствует проектному, то конструкция может считаться удовлетворительной. В противном случае следует изменить число витков индукторов так, чтобы получить $P_{\text{н.оп}} = P_{\text{н.пр}}$, где индекс пр обозначает проектную величину.

При обнаружении повышенных потерь в кожухе (экране) модели следует его удалить от индуктора модели и оригинала согласно (10). Таким образом, проводя опыт над моделью, можно при помощи полученных соотношений оценить все достоинства и недостатки конструируемой печи.

Моделирование вторичных токоподводов. Остановимся теперь кратко на моделировании вторичных токоподводов к руднотермическим и дуговым печам. По нашему убеждению — это единственный путь к правильной оценке их работы. Дело в том, что подавляющее большинство замеров, которые были сделаны на промышленных установках, грешат в отношении методов измерения, чем они в значительной степени обесцениваются. Эти погрешности были обусловлены желанием оценить сопротивления переменному

току каждого из элементов шинопровода и дельности, что можно было бы сделать при вии последовательного закорачивания участка шинопровода, но на промышленных установках это исключается. Поэтому выработалась сложная методика измерения падений напряжений вдоль шин (с закорачиванием тех или иных петель проводов к измерительным приборам. Такая практика совершенно недопустима, какова бы ни была нагрузка и каковым бы ни был измерительный прибор (вольтметр или компенсатор). Кроме этого надо учесть, что шинопроводы работают в тяжелых условиях (высокая температура окружающей среды, печные газы, ударные электромагнитические нагрузки и т. д.), поэтому изменение контактных сопротивлений вследствие окисления — обычное явление. Изменения контактных сопротивлений наблюдаются чаще всего только в некоторых шинах пакета, поэтому действующих установках очень трудно получить достоверные результаты, характеризующие конструкцию.

При конструировании токоподводов важно знать, в какой мере один токоподвод лучше другого: 1) в отношении величины индуктивного сопротивления (чем оно меньше, тем лучше); 2) в отношении потерь в шине.

При выборе частоты для модели следует, на наш взгляд, остановиться на частоте 2500 Гц, принятый для выпускаемых в СССР машин генераторов. С другой стороны, уменьшение линейных размеров в модели в семь раз

$$l_{\text{м}} = \sqrt{\frac{f_0}{f_{\text{м}}}} l_0 \approx \frac{l_0}{7} \quad (34)$$

(так как $f_0 = 50$ Гц) делает модели достаточно дешевыми.

Зная реактивные и активные сопротивления модели, можно найти соответствующие величины оригинала из следующих соотношений:

$$X_0 = \sqrt{\frac{f_0}{f_{\text{м}}}} X_{\text{м}} \approx \frac{X_{\text{м}}}{7} \text{ и } R_0 \approx \frac{R_{\text{м}}}{7}. \quad (35)$$

Здесь не представляется возможным хотя кратко остановиться на методике измерений делей токоподводов. К этому вопросу следует обратиться особо.

Рассуждения, которые здесь были подробно приведены применительно к индукционным печам и токоподводам, типичны и могут быть распространены на любой электротермический аппарат, работа которого обусловлена тем или иным электромагнитным полем.

Литература

1. А. С. Федерман. Известия Петербургского технического института, т. XVI, в. 1, 1911.
2. М. В. Кирпичев. Trans. of the Second Power Conf. 18, стр. 90, 1930.
3. Т. А. Афанасьев-Эренфест. Math. Ann. Bd. 77, H. 2, 1915. Philosoph. Mag., vol. 1, 1925.

Схема замещения и круговая диаграмма активного четырехполюсника

Кандидат техн. наук, доц. П. А. ИОНКИН
Московский энергетический институт им. Молотова

Для расчета и исследования электрических цепей очень часто пользуются эквивалентными схемами, заменяющими реальные цепи при определенных условиях их работы. Известно, что для линейных четырехполюсников с фиксированными входными и выходными зажимами применяются так называемые П- и Т-образные схемы замещения. В данной статье приводится один из способов определения параметров схем замещения данных видов и даются основные соотношения, необходимые для построения круговой диаграммы активного четырехполюсника с линейными параметрами.

Основные уравнения для активного четырехполюсника и определение параметров схем замещения. Если в ветвях электрической цепи произвольной конфигурации с линейными элементами действуют источники электрической энергии нулевыми э. д. с. \dot{E}_1, \dot{E}_2 и т. д. одинаковой частоты, то ток в некоторой ветви такой цепи определяется выражением

$$\dot{I}_k = \dot{E}_1 Y_{k1} + \dot{E}_2 Y_{k2} + \dot{E}_3 Y_{k3} + \dots + \dot{E}_n Y_{kn} + \dots \quad (1)$$

Выделим для рассмотрения из электрической цепи произвольного вида две ветви (рис. 1) э. д. с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2 . Пользуясь уравнением (1), получим выражения для токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 в виде:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{E}_1 Y_{11} + \dot{E}_2 Y_{12} + \dot{E}_3 Y_{13} + \dots, \\ \dot{I}_2 &= \dot{E}_1 Y_{21} + \dot{E}_2 Y_{22} + \dot{E}_3 Y_{23} + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

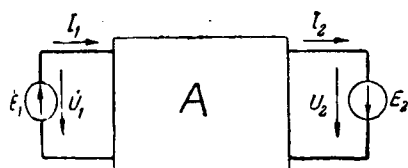


Рис. 1.

Предложены эквивалентная схема замещения активного четырехполюсника с линейными параметрами. Приведена круговая диаграмма для случая изменения нагрузки. Путем сравнения выявлены общие и различные свойства активного и пассивного четырехполюсников.

Отметим, что в схеме рис. 1 сопротивления рассматриваемых ветвей отнесены внутрь четырехполюсника, а остальная часть цепи условно изо-

бражена в виде прямоугольника A (активный).

На основании второго закона Кирхгофа заменим в уравнениях (2) э. д. с. \dot{E}_1 и \dot{E}_2 соответствующими напряжениями $\dot{E}_1 = \dot{U}_1$ и $\dot{E}_2 = -\dot{U}_2$. В соответствии с этой заменой показана на рис. 2 схема активного четырехполюсника с сопротивлением приемника $Z_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$, где токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}_1 Y_{11} - \dot{U}_2 Y_{12} + \dot{I}_{1a}, \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 Y_{21} - \dot{U}_2 Y_{22} + \dot{I}_{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В полученных уравнениях \dot{I}_{1a} и \dot{I}_{2a} определяют токи, соответственно, в первой и второй ветвях, обусловленные э. д. с., заключенными внутри активного четырехполюсника. Для установившегося режима эти токи определяются из условий одновременного короткого замыкания на входных и выходных зажимах четырехполюсника.

В результате совместного решения уравнений (3) получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{Y_{22}}{Y_{21}} \dot{U}_2 + \frac{1}{Y_{21}} (\dot{I}_2 - \dot{I}_{2a}), \\ \dot{I}_1 &= \frac{Y_{11} Y_{22} - Y_{12}^2}{Y_{12}} \dot{U}_2 + \frac{Y_{11}}{Y_{21}} (\dot{I}_2 - \dot{I}_{2a}) + \dot{I}_{1a} \end{aligned}$$

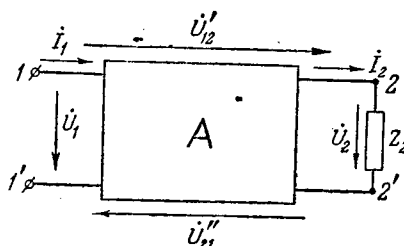


Рис. 2

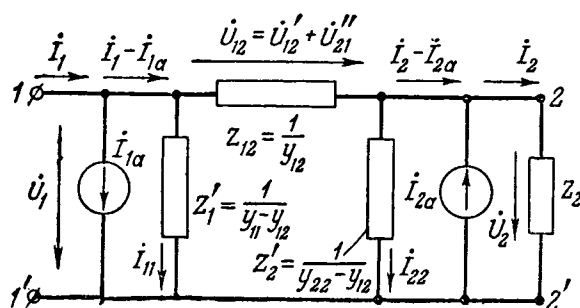


Рис. 3.

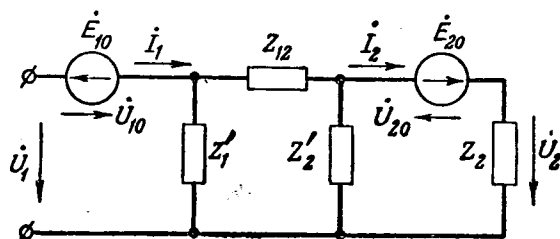


Рис. 4.

или

$$\dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B(\dot{I}_2 - \dot{I}_{2a}),$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_{1a} = C\dot{U}_2 + D(\dot{I}_2 - \dot{I}_{2a}), \quad (4)$$

где величины $A = \frac{Y_{22}}{Y_{21}}$, $B = \frac{1}{Y_{21}}$, $C = \frac{Y_{11}Y_{22} - Y_{12}^2}{Y_{12}}$

и $D = \frac{Y_{11}}{Y_{21}}$ являются, как известно, коэффициентами четырехполюсника, удовлетворяющими условию $AD - BC = 1$.

Для определения параметров эквивалентной схемы, например вида буквы П, воспользуемся схемой, показанной на рис. 2:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{U}'_{12} + \dot{U}'_{21}$$

и

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \dot{U}'_{12} - \dot{U}'_{21}.$$

Пользуясь этими выражениями, исключим из первого уравнения (3) напряжение \dot{U}_2 , а из второго — \dot{U}_1 ; в результате получим:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} + \dot{U}_1(Y_{11} - Y_{12}) + (\dot{U}'_{12} + \dot{U}'_{21})Y_{12}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2a} - \dot{U}_2(Y_{22} - Y_{21}) + (\dot{U}'_{12} + \dot{U}'_{21})Y_{21}.$$

Этим уравнениям удовлетворяет схема замещения, рис. 3.

Из рассмотрения полученной схемы непосредственно следует, что наличие внешних э. д. с. внутри активного четырехполюсника приводит к появлению в схеме замещения двух ветвей с активными элементами в виде токов \dot{I}_{1a} и \dot{I}_{2a} .

Аналогичным путем можно определить параметры схемы замещения, показанной на рис. 4.

Величины э. д. с. $\dot{E}_{10} = \dot{U}_{10}$ и $\dot{E}_{20} = \dot{U}_{20}$ являются

со стороны входных зажимов при коротких замыканиях. Напряжения \dot{U}_{10} и \dot{U}_{20} связаны с токами \dot{I}_{1a} и \dot{I}_{2a} равенствами

$$\dot{U}_{10} = \dot{I}_{2a} \frac{1}{C} - \dot{I}_{1a} \frac{A}{C}$$

и

$$\dot{U}_{20} = \dot{I}_{20} \frac{D}{C} - \dot{I}_{1a} \frac{1}{C}.$$

Путем преобразования пассивной части любой схемы или в результате совместного решения уравнений (4) легко получить параметрическую эквивалентную схему (рис. 5).

Необходимо подчеркнуть, что коэффициенты четырехполюсника (A , B , C и D) и параметров пассивных частей схем замещения не зависят от активных элементов заданной цепи. Вместе с тем активные элементы схем замещения зависят как от активных, так и от пассивных элементов четырехполюсника.

Круговая диаграмма активного четырехполюсника. Если сопротивление нагрузки Z_2 изменяется от нуля до бесконечности, при этом сдвиг фаз φ_2 между напряжением \dot{U}_2 и током \dot{I}_2 остается постоянным, то в общем случае, для активного четырехполюсника, так же как и для пассивного, при неизменном напряжении \dot{U}_1 метрическим местом концов вектора тока \dot{I}_1 является окружность. Для доказательства этого положения заменим в уравнениях (4) напряжение \dot{U}_2 произведением сопротивления nZ_2 на ток \dot{I}_2 ; в результате получим:

$$\dot{U}_1 = (AnZ_2 + B)\dot{I}_2 - B\dot{I}_{2a},$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_{1a} = (CnZ_2 + D)\dot{I}_2 - D\dot{I}_{2a}.$$

Совместное решение этих уравнений дает:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_{1a} = \frac{\dot{U}_1 D + (\dot{U}_1 C - \dot{I}_{2a}) nZ_2}{B + AnZ_2}.$$

Путем простого деления числителя на знаменатель с использованием равенства $AD - BC = 1$ получим:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_{1a} = \dot{U}_1 \frac{C}{A} - \frac{\dot{I}_{2a}}{A} + \frac{\dot{U}_1 + B\dot{I}_{2a}}{AB \left(1 + \frac{nZ_2}{Z_{2\kappa}}\right)},$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} + \dot{U}_1 \frac{C}{A} - \frac{\dot{I}_{2a}}{A} + \frac{\dot{U}_1 + B\dot{I}_{2a}}{AB \left(1 + \frac{nZ_2}{Z_{2\kappa}}\right)},$$

где $Z_{2\kappa} = \frac{B}{A}$ — сопротивление четырехполюсника со стороны выходных зажимов при коротком замыкании.

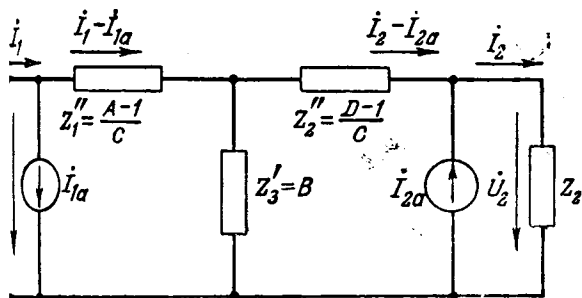


Рис. 5.

включении на входной стороне и при отсутствии пассивных элементов внутри четырехполюсника. Из уравнения (7) имеем:

для режима холостого хода ($nZ_2 = \infty$)

$$i_{10} = \dot{U}_1 \frac{C}{A} + i_{1a} - \frac{i_{2a}}{A} \quad \text{и}$$

режима короткого замыкания ($nZ_2 = 0$)

$$i_{1\kappa} = i_{1a} + \dot{U}_1 \frac{D}{B},$$

да

$$\dot{U}_1 \frac{C}{A} = i_{10} - i_{1a} + \frac{i_{2a}}{A} \quad \text{и} \quad \dot{U}_1 \frac{D}{B} = i_{1\kappa} - i_{1a}.$$

Подставив значения $\dot{U}_1 \frac{C}{A}$ и $\dot{U}_1 \frac{D}{B}$ в уравнение (7), получим:

$$i_1 = i_{10} = \frac{i_{1\kappa} - i_{10}}{1 + n \frac{Z_2}{Z_{2\kappa}}} = i_{10} + \frac{i_{1\kappa} - i_{10}}{1 + ke^{j\psi}}, \quad (8)$$

$k = n \frac{Z_2}{Z_{2\kappa}}$ — переменный коэффициент;

$\psi = \varphi_2 - \varphi_{2\kappa}$ — постоянный угол.

Выражение (8), определяющее геометрическое место концов вектора тока i_1 , является уравнением окружности. Эта окружность строится так же, как для пассивного четырехполюсника, данным опытом холостого хода и опытов прямого и обратного короткого замыкания (рис. 6). Однако круговая диаграмма активного четырехполюсника отличается от круговой диаграммы соответствующего пассивного четырехполюсника с учетом различных значений векторов i_{10} и $i_{1\kappa}$. Ток холостого хода активного четырехполюсника отличается от тока холостого хода соответствующего пассивного четырехполюсника на величину $i_{1a} - \frac{i_{2a}}{A}$, а ток короткого замыкания — на величину i_{1a} .

Пользуясь уравнениями (4), легко показать, что напряжение \dot{U}_2 на выходных зажимах четырехполюсника определяется выражением

$$\dot{U}_2 = B(i_{1\kappa} - i_1).$$

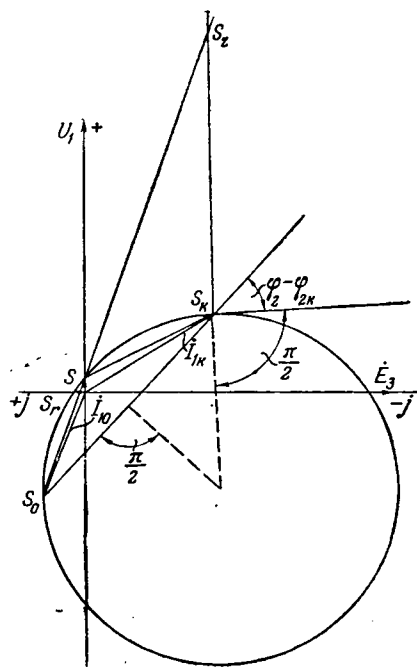


Рис. 6.

а ток i_2 в сопротивлении нагрузки находится из равенства

$$i_2 = A(i_1 - i_{10}).$$

Таким образом, на круговой диаграмме (рис. 6) напряжение \dot{U}_2 и ток i_2 по абсолютной величине определяются в некотором масштабе для некоторого сопротивления нагрузки, соответственно, отрезками $S_K S$ и SS_0 . Масштабы напряжения \dot{U}_2 и тока i_2 находятся так же, как для пассивного четырехполюсника, т. е. $m_{u_2} = m_{i_1} b$ и $m_{i_2} = m_{i_1} a$, где величины b и a являются модулями, соответственно, комплексных B и A , а m_{i_1} — масштаб тока i_1 .

Пользуясь круговой диаграммой, легко определить остальные величины (P_1 , P_2 и nZ_2), характеризующие режим активного четырехполюсника с изменением сопротивления нагрузки.

Пользуясь уравнениями (4), можно построить круговые диаграммы токов i_1 и i_2 активного четырехполюсника при неизменных по абсолютной величине, но изменяющихся по фазе напряжениях \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . Действительно, из уравнений (4) имеем:

$$i_2 = i_{2a} = \frac{\dot{U}_1}{B} - \frac{A}{B} \dot{U}_2 \quad \text{и} \quad i_1 = i_{1a} + \frac{D}{B} \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_2}{B}. \quad (9)$$

Пусть вектор \dot{U}_2 совпадает с осью вещественных величин, а вектор \dot{U}_1 , оставаясь неизменным по абсолютной величине, изменяется по фазе относительно вектора \dot{U}_2 на угол θ , т. е.

$\dot{U}_2 = U_2$ и $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\theta}$. Подставим значения на-

пряжений \dot{U}_2 и \dot{U}_1 в уравнения (9); в результате получим:

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= i_{2a} - \frac{a}{b} U_2 e^{j(\alpha-\beta)} + \frac{U_1}{b} e^{-j\beta} e^{j\theta}, \\ i_1 &= i_{1a} - \frac{\dot{U}_2}{b} e^{-j\beta} + \frac{a}{b} U_1 e^{j(\gamma-\beta)} e^{j\theta}, \end{aligned} \right\} (10)$$

где

$$ae^{j\alpha} = A, be^{j\beta} = B \text{ и } de^{j\gamma} = D.$$

Так как в этих уравнениях все величины, кроме угла θ , постоянны, то геометрическими местами векторов токов \dot{I}_2 и \dot{I}_1 будут окружности.

Координаты центра окружности тока \dot{I}_2 определяются комплексом $\left[i_{2a} - \frac{a}{b} U_2 e^{j(\alpha-\beta)} \right]$, а тока $\dot{I}_1 - \left(i_{1a} - \frac{\dot{U}_2}{b} e^{-j\beta} \right)$; радиусы этих окружностей будут соответственно равны $\frac{U_1}{b}$ и $U_1 \frac{a}{b}$.

Схема замещения и круговая диаграмма трехобмоточного трансформатора. В качестве примера рассмотрим трехобмоточный трансформатор без стального сердечника с э. д. с. источников электрической энергии \dot{E}_1 и \dot{E}_3 и одинаковой частоты (рис. 7). Если зажимы 1—1' первой обмотки (рис. 7) считать входными, а зажимы 2—2'—выходными, то э. д. с. \dot{E}_3 будет активным элементом четырехполюсника.

Для трехобмоточного трансформатора без стального сердечника (на рис. 7 звездочками отмечены зажимы одинаковой полярности) имеем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_1 \dot{I}_1 + j\omega M_{12} \dot{I}_2 + j\omega M_{13} \dot{I}_3, \\ -\dot{U}_2 &= j\omega M_{21} \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 + j\omega M_{23} \dot{I}_3, \\ \dot{U}_3 &= j\omega M_{31} \dot{I}_1 + j\omega M_{32} \dot{I}_2 + Z_3 \dot{I}_3, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$Z_1 = r_1 + j\omega L_1, Z_2 = r_2 + j\omega L_2 \text{ и } Z_3 = r_3 + j\omega L_3 - \frac{1}{j\omega C_3}.$$

Решение этих уравнений дает значения токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= U_2 Y_{11} - \dot{U}_2 Y_{12} + \dot{U}_3 Y_{13} = \dot{U}_1 Y_{11} - U_2 Y_{12} + \dot{I}_{1a}, \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 Y_{21} - \dot{U}_2 Y_{22} + \dot{U}_3 Y_{23} = \dot{U}_1 Y_{21} - \dot{U}_2 Y_{22} + \dot{I}_{2a}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$Y_{11} = \frac{Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2}{\Delta}, Y_{12} = Y_{21} = \frac{-(\omega^2 M_{32} M_{13} + j\omega M_{12} Z_3)}{\Delta},$$

$$Y_{22} = \frac{Z_3 Z_1 + (\omega M_{13})^2}{\Delta}, \dot{I}_{1a} = -\dot{U}_3 \frac{(\omega^2 M_{13} M_{23} + j\omega M_{13} Z_2)}{\Delta},$$

$$\dot{I}_{2a} = -\dot{U}_3 \frac{(\omega^2 M_{13} M_{21} + j\omega M_{23} Z_1)}{\Delta} \text{ и } \Delta = \begin{vmatrix} Z_1 j\omega M_{12} j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} Z_2 j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} j\omega M_{32} Z_3 \end{vmatrix}.$$

Коэффициент A, B, C и D четырехполюсника и параметры пассивной части Π -образной схемы замещения

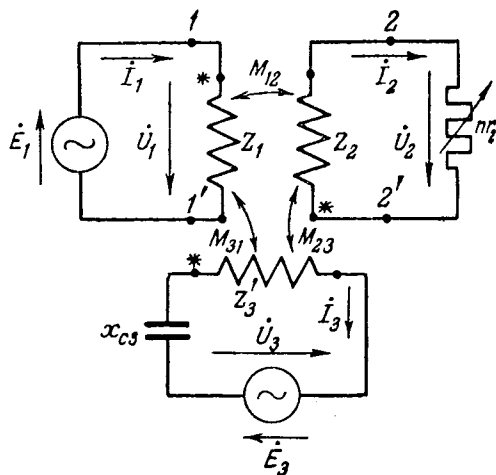


Рис. 7.

определяются, в соответствии с уравнениями (4) следующими выражениями:

$$\begin{aligned} A &= \frac{-[Z_3 Z_1 + (\omega M_{13})^2]}{\omega^2 M_{32} M_{13} + j\omega M_{12} Z_3}, B = \frac{-\Delta}{\omega^2 M_{32} M_{13} + j\omega M_{12} Z_3}, \\ C &= \frac{-[Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2][Z_3 Z_1 + (\omega M_{13})^2] - (\omega^2 M_{13} M_{23} + j\omega M_{12} Z_3)}{\Delta(\omega^2 M_{13} M_{23} + j\omega M_{12} Z_3)}, \\ D &= \frac{-[Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2]}{\omega^2 M_{13} M_{23} + j\omega M_{12} Z_3}, \\ Z'_1 &= \frac{\Delta}{Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2 + (\omega^2 M_{32} M_{13} + j\omega M_{12} Z_3)}, \\ Z'_2 &= \frac{\Delta}{Z_3 Z_1 + (\omega M_{13})^2 + (\omega^2 M_{23} M_{13} + j\omega M_{12} Z_3)} \text{ и } Z_{12} \end{aligned}$$

На рис. 6 построена круговая диаграмма активного четырехполюсника для следующих параметров рассматриваемой цепи:

$$Z_1 = Z_2 = (5 + j20) \text{ ом}, \omega M_{12} = \omega M_{23} = \omega M_{31} = 15 \text{ о.}$$

а сопротивление конденсатора $\frac{1}{\omega C_3}$ принято равным противлению ωL_2 , т. е. $Z_3 = 5 + j20 - j20 = 5 \text{ ом}$.

Вектор напряжения \dot{U}_1 направлен по оси вещественных величин, а вектор напряжения \dot{U}_3 принят равным $\dot{U}_3 = -jU_1$.

Из круговой диаграммы (рис. 6) нетрудно установить, что активная мощность приемника для всех возможных значений сопротивления нагрузки положительна. Вместе с тем, активная мощность четырехполюсника стороны входных зажимов имеет как отрицательный (ток \dot{I}_1 опережает по фазе напряжение \dot{U}_2 на угол больше $\frac{\pi}{2}$), так и положительные значения и даже равна нулю при сдвиге фаз между током \dot{I}_1 и напряжением \dot{U}_1 на $\frac{\pi}{2}$. Такое положение является вполне естественным, так как в балансе мощностей для активного четырехполюсника участвует как источник электрической энергии, действующий со стороны входных зажимов цепи, так и источник, действующий внутри четырехполюсника. Поэтому отношение активной мощности P_2 на выходе четырехполюсника к активной мощности P_1 на его входе не определяет к. п. д. четырехполюсника.

Температурная компенсация элементов электрических цепей

Кандидат техн. наук Г. К. НЕЧАЕВ

Институт электротехники Академии наук УССР

Многие электрические устройства работают при температурах, изменяющихся в довольно ши-

роких пределах. Это изменение обусловлено изменением температуры окружающей среды и наведением температур электрическим током, протекающим в отдельных элементах их схемы. Непостоянство температуры отдельных элементов схем, то активные сопротивления, полупроводниковые выпрямители или индуктивности со сталью, вызывает изменение их параметров и приводит к нарушению нормальной работы устройств.

Борьба с температурными влияниями на работу электрических устройств может вестись рядом методов, как, например: 1) помещение устройства в термостат; 2) обогрев отдельных элементов устройства; 3) температурная компенсация отдельных элементов. Первый метод из-за сложности, громоздкости и высокой стоимости применяется лишь в исключительных случаях. Второй метод иногда применяется к устройствам, работающим в области низких температур. Температурная компенсация элементов электрической цепи осуществляется при помощи зависимых от температуры сопротивлений, изготовленных из полупроводников, и может быть применена в области низких и средних температур.

Заметим коренное различие между перечисленными методами. При первом и втором методах измененность токов в отдельных частях цепи достигается путем поддержания постоянной температуры, а следовательно, и параметров элементов схемы. При третьем же методе измененность токов в отдельных участках схемы достигается сохранением величины сопротивлений этих участков или поддержанием постоянности потенциалов между некоторыми элементами схемы.

Известно, зависимость активного сопротивления обмоток реле, контакторов и других элементов от температуры может быть записана следующим образом:

Рассмотрен вопрос о температурной компенсации активных сопротивлений и малоомощных полупроводниковых выпрямителей с помощью термосопротивлений.

где r_0 — сопротивление при температуре θ_0 ;
 θ — температура обмотки;

α — температурный коэффициент сопротивления провода. Для меди, из которой изготавливается большинство обмоток различных приборов, $\alpha = 0,39\%$ на 1°C .

Термосопротивления имеют отрицательный температурный коэффициент, его величина для ряда полупроводников, из которых изготавливаются термосопротивления, различна и при температуре $15-20^\circ\text{C}$ колеблется в пределах от $-0,5$ до -5% на 1°C . Следует также отметить, что температурный коэффициент термосопротивления зависит от температуры, уменьшаясь при ее повышении.

Предположим, необходимо компенсировать активное сопротивление элемента схемы в некотором диапазоне температур от θ_1 до θ_2 . Соответствующие этим температурам сопротивления элемента будут r_1 и r_2 . Тогда изменение сопротивления

$$\Delta r = r_2 - r_1. \quad (2)$$

Поставим задачу, чтобы сопротивление цепи, включающей в себя компенсируемый элемент и компенсатор, оставалось постоянным. Если сопротивление компенсатора для тех же граничных температур r_{k1} и r_{k2} , то его изменение в этом диапазоне

$$\Delta r_k = r_{k2} - r_{k1}. \quad (3)$$

Следовательно, для постоянства сопротивления цепи должно быть выполнено условие

$$\Delta r + \Delta r_k = 0. \quad (4)$$

Так как $\Delta r > 0$, то Δr_k должно быть величиной отрицательной. Этому условию удовлетворяет термосопротивление. Очевидно, изменение термосопротивления, являющегося основным элементом компенсатора, для температурного диапазона от θ_1 до θ_2 должно быть равно или несколько больше Δr .

$$r = r_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (1)$$

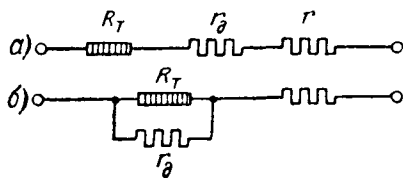


Рис. 1. Соединение термосопротивления и дополнительного сопротивления.
а — последовательное; б — параллельное.

Таким образом, первое условие для выбора термосопротивления может быть представлено соотношением

$$|R_{T_1} - R_{T_2}| = |\Delta R_T| \geq \Delta r, \quad (5)$$

где R_{T_1} и R_{T_2} — величины термосопротивления при температурах θ_1 и θ_2 .

В большинстве случаев нас будет интересовать компенсатор с минимальным сопротивлением. Следовательно, изменение термосопротивления в данном диапазоне температур должно быть близко к изменению сопротивления компенсируемого элемента. Но так как выполнить это условие точно не представляется возможным, компенсатор кроме термосопротивления должен содержать еще дополнительное сопротивление. Последнее для удобства можно выполнить из манганина или константана, т. е. материала, температурный коэффициент сопротивления которого равен или близок к нулю.

Возможны два способа соединения термосопротивления и дополнительного сопротивления: 1) последовательное и 2) параллельное (рис. 1).

При первом способе сопротивление компенсатора

$$r_k = R_T + r_d. \quad (6)$$

В диапазоне температур от θ_1 до θ_2 оно изменится на величину

$$\Delta r_k = R_{T_2} - R_{T_1} = \Delta R_T. \quad (7)$$

Таким образом, изменение сопротивления компенсатора равно изменению термосопротивления. Следовательно, соединение по первому способу непригодно для целей компенсации, так как не позволяет выполнить компенсатор, отвечающий условию (4).

При втором способе сопротивление компенсатора

$$r_k = \frac{R_T \cdot r_d}{R_T + r_d}. \quad (8)$$

Изменение сопротивления компенсатора в заданном диапазоне температур

$$\Delta r_k = r_{k_2} - r_{k_1} = \frac{r_d^2 (R_{T_2} - R_{T_1})}{R_{T_1} R_{T_2} + r_d (R_{T_1} + R_{T_2}) + r_d^2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что соединение по второму способу позволяет выполнить компенсацию, отвечающую условию (4).

Имеется электрическая цепь, содержащая обмотку какого-нибудь аппарата (катушку реле)

и работающая в определенном диапазоне температур от θ_1 до θ_2 . По условиям работы аппарата колебание тока в цепи при указанном изменении температуры обмотки не должно превышать определенной величины.

Сопротивления обмотки, соответствующие температурам θ_1 и θ_2 , определим по формуле. Зная величину Δr , подбираем термосопротивление. При этом обращаем внимание на то, что ток, протекающий через термосопротивление, не вызывал его изменения. По температурной зависимости выбранного термосопротивления определяем его величины, соответствующие температурам θ_1 и θ_2 .

Чтобы выполнить условие (4), необходимо определить величину дополнительного сопротивления. На основании выражений (4) и (9) имеем уравнение

$$(R_{T_2} - R_{T_1} + \Delta r) r_d^2 + \Delta r (R_{T_1} + R_{T_2}) r_d + \Delta r R_{T_1} R_{T_2} = 0,$$

из которого определяем величину r_d .

Один из примеров компенсации, расчет которой дан в приложении, приведен на рис. 2. Зная кривую 1 представляет температурную зависимость термосопротивления, кривая 2 — температурную зависимость компенсируемого сопротивления, кривая 3 — температурную зависимость дополнительного сопротивления r_d , кривая 4 — температурную зависимость сопротивления компенсатора и кривая 5 — температурную зависимость сопротивления всей цепи. Как видно, не удается получить полной компенсации во всем диапазоне температур вследствие нелинейной температурной зависимости термосопротивления. Но изменение сопротивления цепи весьма мало (не больше 1%), что вполне приемлемо для ряда случаев, встречающихся на практике.

В различных областях электротехники весьма широкое применение находят полупроводниковые выпрямители. Напряжение на выходе таких выпрямителей в сильной степени зависит от их температуры. Внутреннее сопротивление выпрямителя падает с ростом температуры, что и выз-

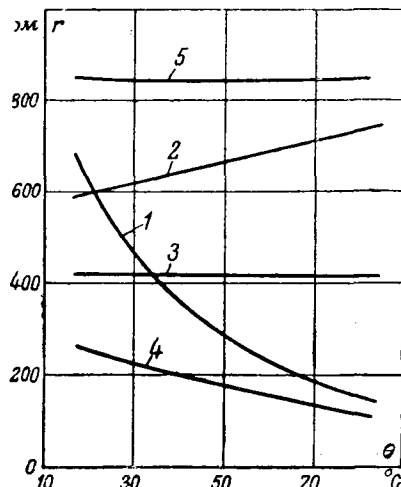


Рис. 2.

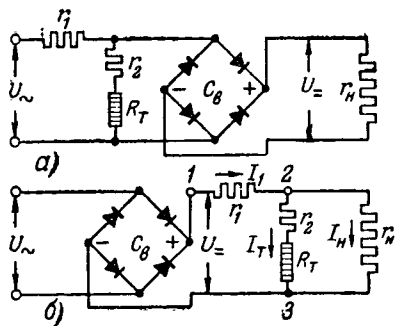


Рис. 3.

изменение напряжения на его выходе. Для некоторых электрических устройств такие изменения напряжения на выходе выпрямителя недопустимы, так как ведут к нарушению нормальной работы. Температурная компенсация полупроводникового выпрямителя позволяет снизить температурную погрешность до весьма незначительной величины.

На рис. 3 показаны два возможных варианта температурной компенсации. В обоих случаях термосопротивление имеет тепловой контакт с выпрямителем.

В варианте *a* при повышении температуры выпрямителя величина термосопротивления уменьшается. Вследствие этого возрастает ток, протекающий через сопротивление r_1 , увеличивается напряжение и уменьшается напряжение на выходе выпрямителя. В варианте *б* такой же принцип использован на выходе выпрямителя.

Таким образом, при соответствующем подборе элементов схемы напряжение, приложенное к нагрузке, может быть сохранено в заданных пределах. Более подробно рассмотрим вариант *б*.

Примем температуру выпрямителя и термосопротивления равной θ_1 . Ей соответствуют: термосопротивления R_{T_1} , напряжения узлы U_{23} при заданном значении напряжения на выходе выпрямителя, токи в частях схемы I_1 , I_2 . При температуре выпрямителя, равной θ_2 , мы соответственно имеем: R_{T_2} , U'_{23} , I'_1 , I'_2 . Изменение напряжения на нагрузке не должно превышать некоторой заданной величины

согласно схеме рис. 3, *б* эквивалентное сопротивление параллельных ветвей

$$r = \frac{(R_T + r_2) r_n}{R_T + r_2 + r_n}. \quad (11)$$

Изменение напряжения на сопротивлении r_1 при температуре θ_1

$$U_{12} = U_{13} - U_{23}, \quad (12)$$

при температуре θ_2

$$U'_{12} = U'_{13} - U'_{23}. \quad (13)$$

По условию задачи необходимо, чтобы $U_{23} = U'_{23}$. Тогда из выражений (12) и (13) находим:

$$\Delta U = U'_{12} - U_{12} = U'_{13} - U_{13}. \quad (14)$$

В свою очередь,

$$U_{12} = I_1 r_1 = \frac{U_{23} r_1 (R_{T_1} + r_2 + r_n)}{r_n (R_{T_1} + r_2)} \quad (15)$$

и

$$U'_{12} = I'_1 r_1 = \frac{U'_{23} r_1 (R_{T_2} + r_2 + r_n)}{r_n (R_{T_2} + r_2)}. \quad (16)$$

На основании (14), (15) и (16) определяем ΔU :

$$\Delta U = U'_{12} - U_{12} = \frac{U_{23} r_1 (R_{T_1} - R_{T_2})}{(R_{T_1} + r_2)(R_{T_1} + r_2)}. \quad (17)$$

Преобразуя выражение (17), получим:

$$r_2^2 + (R_{T_1} + R_{T_2}) r_2 + R_{T_1} R_{T_2} - \frac{U_{23} r_1 (R_{T_1} - R_{T_2})}{\Delta U} = 0. \quad (18)$$

Из уравнения (18) можно определить r_2 .

Величиной r_1 задаемся, полагая, что

$$r_1 = (5 \dots 10) \% r_n.$$

Значение R_{T_2} определяем приближенно из соотношения

$$\Delta U \approx I_{T_2} r_1 = \frac{U_{23} r_1}{R_{T_2} + r_2}. \quad (19)$$

Тогда

$$R_{T_2} + r_2 = \frac{U_{23} r_1}{\Delta U} \quad (20)$$

или

$$R_{T_2} \leq \frac{U_{23} r_1}{\Delta U}. \quad (21)$$

Следовательно, величина термосопротивления R_{T_2} должна быть равна или несколько меньше полученного значения.

По температурной характеристике термосопротивления определяем его величину, соответствующую температурам θ_1 и θ_2 . Кроме этого необходимо, чтобы термосопротивление работало на прямолинейном участке левой части своей вольтамперной характеристики.

Выбрав термосопротивление, определим величину r_2 из уравнения (18).

Приложение. Пример 1. Реле работает в диапазоне температур от $+20$ до $+80^\circ\text{C}$. Сопротивление его обмотки при 20°C $r_{20} = 600 \text{ ом}$. Выполнить температурную компенсацию сопротивления обмотки для данного диапазона температур.

Сопротивление обмотки реле при температуре $\theta = 80^\circ\text{C}$ $r_{80} = 600 (1 + 0,0039 \cdot 60) = 740 \text{ ом}$. Изменение сопротивления обмотки $\Delta r = 140 \text{ ом}$.

Этим условиям отвечает термосопротивление, температурная характеристика которого представлена на рис. 2. Величина термосопротивления при температурах 20°C и 80°C соответственно $R_{T_1} = 610 \text{ ом}$, $R_{T_2} = 150 \text{ ом}$.

Величину дополнительного сопротивления определим из уравнения (10): $(610 - 150 - 140) r^2 - 140 (610 + 150) r - 140 \cdot 610 \cdot 150 = 0$; $r = 161 \pm 256$; $r = 417 \text{ ом}$.

Проверим сопротивление цепи в заданном диапазоне. При $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$

$$r_2 = \frac{r R_{T_1}}{R_{T_2}} = \frac{417 \cdot 610}{150} = 247 \text{ ом}.$$

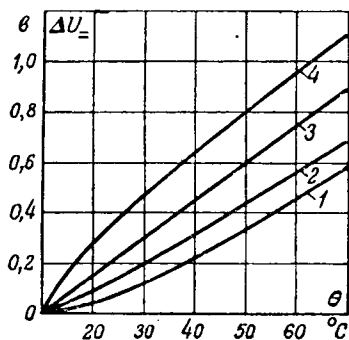


Рис. 4. Температурная погрешность селенового выпрямителя $\Delta U_{\text{н}} = f(\theta)$.
1 — при $U_{\text{н}} = 10$ в; 2 — при $U_{\text{н}} = 30$ в;
3 — при $U_{\text{н}} = 40$ в; 4 — при $U_{\text{н}} = 50$ в.

Общее сопротивление цепи

$$r_{\text{н}1} = r_{20} + r_{k1} = 600 + 247 = 847 \text{ ом.}$$

При $\theta_2 = 80^\circ \text{C}$

$$r_{k2} = \frac{r R_{T1}}{r + R_{T1}} = \frac{417 \cdot 150}{567} = 110 \text{ ом,}$$

$$r_{\text{н}2} = r_{80} + r_{k2} = 740 + 110 = 850 \text{ ом.}$$

Сопротивление цепи при $\theta_3 = 50^\circ \text{C}$

$$r_{50} = 600 (1 + 30 \cdot 0,0039) = 670 \text{ ом, } R_{T1} = 280 \text{ ом,}$$

$$r_{k3} = \frac{280 \cdot 417}{697} = 173 \text{ ом,}$$

$$r_{\text{н}3} = r_{50} + r_{k3} = 670 + 173 = 843 \text{ ом.}$$

Как видно, изменение сопротивления цепи во всем диапазоне не превышает 1%.

Пример 2. Необходима температурная компенсация селенового выпрямителя, выполненного по схеме мостика (рис. 3,б). Диапазон изменения температур от $+20$ до $+70^\circ \text{C}$. Допустимая величина погрешности в выходном напряжении $\pm 0,2$ в. Сопротивление нагрузки $r_{\text{н}} = 50\,000 \text{ ом}$. Температурная погрешность выпрямителя

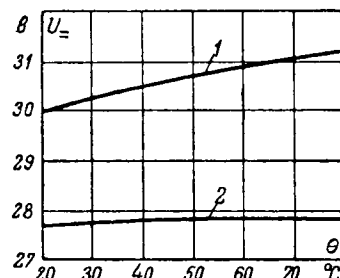


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения выпрямителя от температуры $U_{\text{н}} = f(\theta)$ при $U_{\text{н}} = 40$ в.

1 — без компенсации; 2 — с компенсацией.

задана кривой (рис. 4). Расчет компенсации ведем в выходном напряжении выпрямителя $U_{\text{н}} = 30$ в. Принимаем $r = 8\%$ $r_{\text{н}} = 4\,000 \text{ ом}$.

Напряжение, приложенное к нагрузке,

$$U_{32} = \frac{30}{50\,000 + 4\,000} 50\,000 = 27,7 \text{ в.}$$

Согласно формуле (20)

$$R_{T1} + r_2 = \frac{U_{32} r_1}{\Delta U} = \frac{27,7 \cdot 4\,000}{0,74} = 150 \cdot 10^3 \text{ ом}$$

(ΔU берем из кривой рис. 4).

Таким образом, $R_{T1} \leq 150 \cdot 10^3 \text{ ом}$. Из имеющихся термосопротивлений наиболее отвечающее этим условиям имеет следующие характеристики:

$$\text{при } \theta_1 = 20^\circ \text{C} \quad R_{T1} = 850 \cdot 10^3 \text{ ом,}$$

$$\text{при } \theta_2 = 70^\circ \text{C} \quad R_{T1} = 110 \cdot 10^3 \text{ ом.}$$

Подставив значения r_1 , R_{T1} и R_{T2} в уравнение получим:

$$r_2 = -480 \cdot 10^3 \pm 495 \cdot 10^3, \quad r_2 = 15 \cdot 10^3 \text{ ом.}$$

Таким образом, нами определены параметры элементов схемы.

На рис. 5 представлены кривые зависимости выходного напряжения выпрямителя от температуры без компенсации и с компенсацией. Очевидно, применение компенсации значительно уменьшает изменение выходного напряжения при колебании температуры выпрямителя.

□□



Расчет наибольшей чувствительности электрических измерительных цепей

Кандидат техн. наук И. Н. КРОТКОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Менделеева

Постановка задачи. Искать условия, необходимые и достаточные для получения наибольшего изменения тока напряжения в цепи

линейной измерительной схемы при изменении регулируемого сопротивления какого-либо одного плеча той же

подобная задача, как известно, имеет смысл исследования измерительных схем постоянного и переменного тока, с целью определения относительной чувствительности. Аналогичные расчеты могут иметь значение также для автоматики и радиотехники.

Известно, что чувствительность метода электрического измерения S_{μ} равна произведению чувствительности применяемого указателя S_y чувствительности схемы S_{cx}

$$S_{\mu} = S_y \cdot S_{cx} \quad (1)$$

Здесь не будем рассматривать вопрос о чувствительности указателя, считая эту величиной.

Вместив в цепи указателя изменение тока или напряжения ΔU_y , вызванные вариацией сопротивления регулируемого плеча ΔZ_w (получаемое выражение стремящимся к нулю), получим

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{i_{cx_0}} &= \frac{\partial i_y}{\partial Z_w} Z_w, \\ \dot{S}_{u_{cx_0}} &= \frac{\partial U_y}{\partial Z_w} Z_w. \end{aligned} \right\}$$

Задача по определению элементов линейной измерительной схемы, наивыгоднейших в отношении чувствительности цепи, еще не имеет решения.

Значительного числа работ, опубликованных к этому времени [Л. 2—4], большинство относится к одной только мостовой схеме (рис. 1) давая ряд частных решений задачи.

Заметим, что максимальная чувствительность связана с увеличением подводимой мощности к регулируемому элементу, а так же с величиной к. п. д. передачи энергии через соответствующий четырехполюсник, представляющий заданную схему.

Рассматривается уравновешенная мостовая схема и вычисляется ее чувствительность к относительному изменению сопротивления одного из плеч. Задаваясь рядом ее элементов, определяются необходимые и достаточные условия для получения наибольшей чувствительности схемы.

Разберем четыре основных варианта расчета электрической измерительной цепи, задаваясь ее элементами.

Расчет наивыгоднейших элементов схемы. Рассмотрим цепь, составленную из некоторого числа линейных элементов: Z_w, \dots, Z_k , предназначенную для измерения сопротивлений. Такую цепь можно заменить шестиполюсником, включая на его зажимы: источник питания E с сопротивлением Z_g , указатель с сопротивлением Z_y и регулируемый элемент с сопротивлением Z_w (рис. 2).

Тогда [Л. 1] для чувствительности схемы к относительному изменению полного сопротивления регулируемого плеча $\frac{\Delta Z_w}{Z_w}$ будет справедливо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{i_{cx_0}} &= \dot{E} \frac{Z_w}{Z_g Z_y}, \\ \dot{S}_{u_{cx_0}} &= \dot{E} \frac{Z_w Z_y}{Z_g Z_w}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

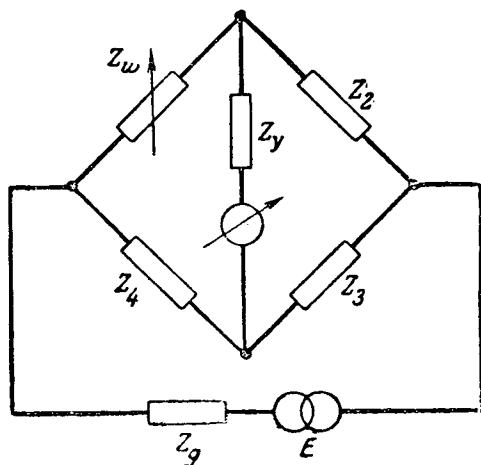


Рис. 1.

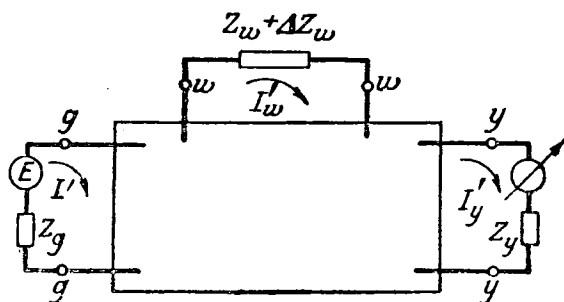


Рис. 2.

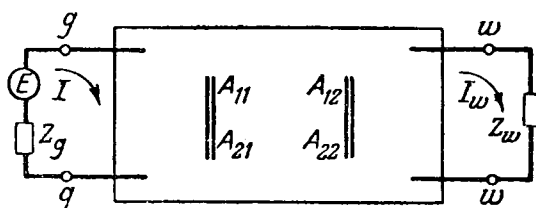


Рис. 3.

Это выражение (2) легко вычислить, рассматривая два четырехполюсника (рис. 3 и 4), на зажимы которых соответственно включены сопротивления Z_g , Z_w и Z_w , Z_y .

В этом случае:

$$\left. \begin{aligned} Z_{ww} &= \frac{A_{12} + A_{22}Z_g}{A_{11} + A_{21}Z_g} = \frac{B_{12} + B_{11}Z_y}{B_{22} + B_{21}Z_y}, \\ Z_{gg} &= \frac{A_{12} + A_{11}Z_w}{A_{22} + A_{21}Z_w}; \quad Z_{yy} = \frac{B_{12} + B_{21}Z_w}{B_{11} + B_{21}Z_w}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Аналогично для взаимных сопротивлений:

$$\left. \begin{aligned} Z_{gw} &= (A_{12} + A_{11}Z_w + A_{21}Z_wZ_g + A_{22}Z_g) = \\ &= (Z_w + Z_{ww})(A_{11} + A_{21}Z_g), \\ Z_{wy} &= (B_{12} + B_{11}Z_y + B_{21}Z_wZ_y + B_{22}Z_w) = \\ &= (Z_w + Z_{ww})(B_{22} + B_{21}Z_y). \end{aligned} \right\} \quad (3a)$$

Здесь во всех случаях через: $A_{11}, \dots, A_{22}, B_{11}, \dots, B_{22}$ обозначены коэффициенты общих матриц, каждого из упомянутых четырехполюсников.

Принимая во внимание, что

$$i_w = \frac{\dot{E}}{Z_{gw}}; \quad i = \frac{\dot{E}}{Z_g + Z_{gg}}; \quad \frac{i_w}{i} = \frac{1}{(A_{22} + A_{21}Z_w)},$$

к. п. д. (η_{gw}) передачи энергии через четырехполюсник, нагруженный сопротивлениями Z_g и Z_w , будет:

$$\eta_{gw} = R_e \left[\frac{Z_w}{(A_{22} + A_{21}Z_w)Z_{gw}} \right] = R_e \left[\frac{Z_w}{(Z_w + Z_{ww}) \frac{1}{(A_{22} + A_{21}Z_w)(A_{11} + A_{21}Z_g)}} \right]. \quad (4)$$

Представляя измерительную цепь в виде упоминавшихся ранее четырехполюсников в

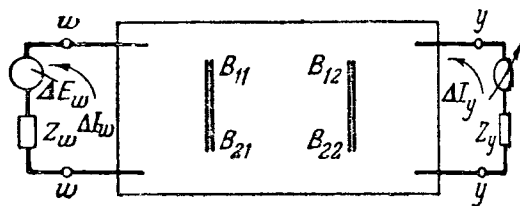


Рис. 4.

большинстве случаев достаточно [Л. 5] рассматривать Т-образные или П-образные схемы, тая, что прохождение энергии совершается только через две стороны четырехполюсника. По этой причине вычисление коэффициентов общих матриц в каждом частном случае вызывает затруднений.

Исследуя чувствительность заданной измерительной цепи, считаем происходящие процессы достаточно стабильными во времени. Это позволяет при расчете схем постоянного тока не обращать внимания на время успокоения подвижной системы указателя.

Рассмотрим мостовую схему (рис. 1), одно из сложных соединений, получивших большее практическое применение. Вычисления для этой схемы наивыгоднейшие по чувствительности элементы, сопоставляя полученные данные с результатами, опубликованными другими авторами. Результаты, полученные при расчете мостовой схемы, написанные в обобщенной форме, могут быть применены при исследовании других измерительных схем.

Будем называть уравновешенным мостом такой пассивный многополюсник, который в определенном соотношении между составляющими его элементами имеет не менее чем 2 полюса (диагонали g и y), обладающие бесконечно большим взаимным сопротивлением ($Z_{gy} \rightarrow \infty$).

Введем параметры (таблица): x_1, x_2, x_3 , которые в пределах соответствующего варианта расчета можно считать независимыми друг от друга (рис. 1)

Параметры \dot{x}_1 и \dot{x}_2 характеризуют соотношение между элементами самой схемы, параметры \dot{x}_3 и \dot{x}_4 связывают остальные элементы цепи.

Принимая во внимание независимость амплитудных режимов диагоналей уравновешенного моста и пользуясь принятыми обозначениями (таблица), для коэффициентов общих матриц $\|A\|$ $\|B\|$ получим [Л. 1]:

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 1 & \frac{Z_w}{x_1} \\ \dot{x}_1 \frac{1}{(1 + \dot{x}_1)} \frac{1}{Z_w} & 1 + \frac{1}{\dot{x}_2} \frac{1}{(1 + \dot{x}_1)} \end{vmatrix}$$

$$\|B\| = \begin{vmatrix} 1 & Z_w \frac{\dot{x}_2}{1 + \dot{x}_1} \\ \frac{\dot{x}_1}{Z_w} & 1 + \frac{\dot{x}_1 \dot{x}_2}{1 + \dot{x}_1} \end{vmatrix}$$

\dot{x}_1	\dot{x}_2	\dot{x}_3	$\frac{(\dot{S}_i)_{cx_0}}{\dot{x}_4}$	$\frac{(\dot{S}_u)_{cx_0}}{\dot{x}_4}$	\dot{x}_5
$\left \frac{Z_w}{Z_2} \right e^{j\beta}$	$\left \frac{Z_4}{Z_w} \right e^{j\gamma}$	$\left \frac{Z_g}{Z_w} \right e^{j\theta}$	$\left \frac{Z_y}{Z_w} \right e^{j\theta}$	$\left \frac{Z_w}{Z_y} \right e^{-j\theta}$	$\left \frac{x_1}{x_2} x_3 \right e^{j(\delta+\beta-\gamma)}$

мечание. $\beta = \varphi_w - \varphi_2$; $\delta = \varphi_g - \varphi_w$; $Z_w = |Z_w| e^{j\varphi_w}$; $Z_3 = |Z_3| e^{j\varphi_3}$; $\gamma = \varphi_4 - \varphi_w$; $\theta = \varphi_y - \varphi_w$; $Z_2 = |Z_2| e^{j\varphi_2}$ и т. д.

Тогда на основании (3) и (3а) найдем:

$$\left. \begin{aligned} Z_{gg} &= \frac{\dot{x}_2}{\dot{x}_1} \left(\frac{1 + \dot{x}_1}{1 + \dot{x}_2} \right) Z_w; \\ Z_{gw} &= (Z_g + Z_{gg}) \left(1 + \frac{1}{\dot{x}_2} \right), \\ Z_{yy} &= \left(\frac{1 + \dot{x}_2}{1 + \dot{x}_1} \right) Z_w; \\ Z_{yw} &= (Z_y + Z_{yy}) (1 + \dot{x}_1). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Аналогично, используя полные значения коэффициентов общих матриц $\|A\|$ и $\|B\|$, для данного сопротивления мостовой схемы Z_{ww} по отношению к регулируемому элементу Z_w , на основании (3) найдем:

Если в частном случае положить $Z_g = 0$, то формула (7а) примет вид, тождественный указанному Шерингом [Л. 6]

$$\dot{S}_{i_{cx_0}} = E \frac{\dot{x}_1}{Z_w (1 + \dot{x}_1) (1 + \dot{x}_2)} \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_y}{Z_{yy}} \right)}.$$

Принимая дополнительно $Z_y = \infty$, получим выражение, приводимое Селецким и Цюрхером [Л. 6]:

$$\dot{S}_{u_{cx_0}} = E \frac{\dot{x}_1}{(1 + \dot{x}_1)^2}.$$

$$Z_{ww} = \frac{Z_w}{\dot{x}_1} \left[1 - \frac{\frac{1}{\dot{x}_1 Z_w} (Z_w^2 - \dot{x}_1^2 Z_g Z_y) + (1 - \dot{x}_2) Z_w \frac{Z_g}{Z_{gg}}}{Z_y + \frac{Z_w}{\dot{x}_1} \left[1 + \frac{\dot{x}_1 \dot{x}_2}{1 + \dot{x}_1} + \dot{x}_1 \frac{Z_g}{Z_{gg}} \left(1 + \frac{1}{1 + \dot{x}_1} \right) \frac{Z_y}{Z_{yy}} \right]} \right]. \quad (6)$$

Для относительной чувствительности уравненной мостовой схемы на основании (2) напишем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{i_{cx_0}} &= \frac{E}{Z_y} \frac{\dot{x}_1}{\left[1 + \dot{x}_1 + \frac{1}{\dot{x}_4} (1 + \dot{x}_2) \right]} \times \\ &\times \frac{1}{\left[1 + \dot{x}_1 + \dot{x}_5 (1 + \dot{x}_2) \right]}, \\ \dot{S}_{u_{cx_0}} &= E \frac{\dot{x}_1}{\left[1 + \dot{x}_1 + \dot{x}_4 (1 + \dot{x}_2) \right]} \times \\ &\times \frac{1}{\left[1 + \dot{x}_1 + \dot{x}_5 (1 + \dot{x}_2) \right]}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

соответственно в другой форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{i_{cx_0}} &= E \frac{\dot{x}_1}{Z_w (1 + \dot{x}_1) (1 + \dot{x}_2)} \times \\ &\times \frac{1}{\left[1 + \frac{Z_y}{Z_{yy}} \right] \left[1 + \frac{Z_g}{Z_{gg}} \right]}, \\ \dot{S}_{u_{cx_0}} &= E \frac{\dot{x}_1}{(1 + \dot{x}_1)^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{Z_{yy}}{Z_y} \right] \left[1 + \frac{Z_{gg}}{Z_g} \right]}. \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

На основании изложенного можно видеть, что в зависимости от подбора параметров чувствительность схемы представляется в виде:

$$\dot{S}_{cx_0} = \mu(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4) = \mu(Z_w Z_g Z_y \dot{x}_1 \dot{x}_2)$$

или для модуля:

$$\begin{aligned} |(S)_{cx_0}| &= f(|x_1|, |x_2|, |x_3|, |x_4|, \beta, \gamma, \delta, \theta) = \\ &= f_1(|Z_w|, |Z_g|, |Z_y|, |x_1|, |x_2|, \beta, \gamma, \delta, \theta). \end{aligned}$$

Заключение. Расчеты наивыгоднейших элементов мостовой схемы и сопоставление полученных данных с результатами, приводимыми другими авторами, показывают:

1. В зависимости от принятых исходных величин могут получаться различные расчетные данные, используемые при определении наивыгоднейших элементов схемы. Это необходимо иметь в виду при сопоставлении результатов опубликованных ранее работ.

Нельзя согласиться с указаниями о необходимости предельного уменьшения или увеличения двух смежных сопротивлений моста (R_3 , R_4) (рис. 1), что практически приводит к нарушению работы мостовой схемы, бесконечно большому потреблению мощности генератора, минимуму чувствительности схемы.

2. Предложенные четыре варианта расчета мостовой схемы (см. приложение) в зависи-

мости от задаваемых исходных элементов могут быть распространены на любые схемы постоянного и переменного тока. В пределах каждого из этих расчетов возможна дальнейшая комбинация исходных величин и соответственное увеличение числа вариантов.

3. Необходимыми и достаточными условиями получения наибольшей чувствительности мостовой схемы постоянного тока (по напряжению) при наилучшим образом подобранных элементах установки будут:

а) равенство регулируемого и, по отношению к нему, входных сопротивлений холостого хода $(R_{ww})_{R_y \rightarrow \infty}$ и короткого замыкания $(R_{ww})_{R_g \rightarrow 0}$;

б) равенство регулируемого сопротивления среднему геометрическому из остальных выходных сопротивлений многополюсника (R_{gg}, R_{yy}) , представляющего заданную схему.

Данные условия относятся и к другим измерительным схемам постоянного тока.

4. Полученное решение может быть распространено на схемы переменного тока. В этом случае, имея высокую добротность цепи регулируемого элемента, чувствительность схемы достигает весьма больших значений при условии равенства соответствующих нагрузочных и сопряженных им входных сопротивлений.

Приложение 1. Сделаем расчет мостовых схем постоянного тока.

Выражение (7) для чувствительности схемы удобно представить в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} S_{cx_0} &= E \frac{q_1 x_1}{m_1 x_1^2 + p_1 x_1 + n_1} = S_1(x_1), \\ S_{cx_0} &= E \frac{q_2 x_2}{m_2 x_2^2 + p_2 x_2 + n_2} = S_2(x_2), \\ S_{cx_0} &= E \frac{q_3 R_w}{m_3 R_w^2 + p_3 R_w + n_3} = S_3(R_w), \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

соответственно, в зависимости от x_3 и x_4 :

$$\left. \begin{aligned} S_{cx_0} &= E \frac{q_4}{p_4 x_3 + n_4} = S_4(x_3), \\ S_{cx_0} &= E \frac{q_5}{p_5 x_4 + n_5} = S_5(x_4). \end{aligned} \right\} \quad (7в)$$

Коэффициенты: q_i, m_i, p_i, n_i вычисляются в каждом отдельном случае, пользуясь исходным соотношением (7).

Легко видеть, что функции $S_4(x_3)$ и $S_5(x_4)$ (7в) не имеют экстремальных значений, изменяясь монотонно.

Решение поставленной задачи сводится к необходимости удовлетворить следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial S_1}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial S_2}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial S_3}{\partial R_w} = 0. \quad (8)$$

Приступая к непосредственным вычислениям, будем каждый раз задаваться соответствующими исходными данными. Из (76) следует, что решение уравнений системы (8) всегда имеет вид:

$$x'_1 = \sqrt{\frac{n_1}{m_1}}; \quad x'_2 = \sqrt{\frac{n_2}{m_2}}; \quad R'_w = \sqrt{\frac{n_3}{m_3}}.$$

а) Заданы: э. д. с. источника питания E , сопротивление регулируемого элемента R_w , сопротивление генератора R_g и указателя R .

В соответствии с (8), удовлетворяя систему:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S_1}{\partial x_1} &= 0, \\ \frac{\partial S_2}{\partial x_2} &= 0, \end{aligned} \right\} \text{ найдем } \begin{aligned} x_1 &= \sqrt{\frac{1 + \frac{R_w}{R_y} (1 + \frac{R_g}{R_w} (1 + \frac{1}{x_1}))}{1 + \frac{R_g}{R_w} (1 + \frac{1}{x_1})}}, \\ x_2 &= \sqrt{\frac{1 + \frac{R_y}{R_w} (1 + \frac{1}{x_2})}{1 + \frac{R_w}{R_g} (1 + \frac{1}{x_2})}}. \end{aligned}$$

После соответствующих преобразований (применение 2) совместное решение уравнений дает:

$$\left. \begin{aligned} x'_1 &= \sqrt{\frac{R_w}{R_y} \frac{(R_w + R_y)}{(R_w + R_g)}}, \\ x'_2 &= \sqrt{\frac{R_g}{R_w} \frac{(R_w + R_y)}{(R_w + R_g)}}. \end{aligned} \right\}$$

Решение (9) совпадает с результатом, полученным Хевисайдом [Л. 2], что легко установить, воспользовавшись обозначениями параметров мостовой схемы (таблица). Тогда чувствительность схемы достигает значения:

$$\begin{aligned} S'_{icx_0} &= \frac{E}{R_y} \frac{1}{\left[1 + \sqrt{\frac{x_3}{x_4}} + \sqrt{\frac{(1+x_3)(1+x_4)}{x_4}}\right]} \times \\ &\times \frac{1}{\left[1 + \sqrt{\frac{x_3}{x_4}} + \sqrt{\frac{1+x_4}{1+x_3} \left(\sqrt{x_3} + \frac{1}{\sqrt{x_4}}\right)}\right]}, \\ S'_{ucx_0} &= E \frac{1}{(1 + \sqrt{x_3 x_4})^2 \left[1 + \frac{\sqrt{(1+x_3)(1+x_4)}}{1 + \sqrt{x_3 x_4}}\right]} \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{\frac{1+x_4}{1+x_3}}}. \end{aligned}$$

Пример 1. Определить оптимальные элементы моста R'_2, R'_3, R'_4 (рис. 1).

а) Задано: сопротивление регулируемого элемента $R_w = 500$ ом, сопротивление цепи указателя $R_y = 300$ ом, чувствительность указателя $S_{iy} = 600 \cdot 10^6$ мм/а, сопротивление цепи питания $R_g = 0,1$ ом, э. д. с. источника тока $E = 2,1$ в.

Решение:

на основании (9)

$$x'_1 = \sqrt{\frac{5}{3} \frac{8}{5,001}} \approx 1,6,$$

$$x'_2 = \sqrt{\frac{0,1}{5} \frac{8}{5,001}} \approx 0,18.$$

Отсюда (таблица) оптимальные элементы схемы:

$$R'_2 \approx \frac{500}{1,6} \approx 313 \text{ ом}, \quad R'_4 \approx 0,18 \cdot 500 \approx 90 \text{ ом},$$

$$R'_3 \approx \frac{0,18}{1,6} \cdot 500 \approx 56 \text{ ом}.$$

Тогда, согласно (7), чувствительность схемы

$$S_{icx_0} \approx \frac{3,4}{3,6} 10^{-3} \approx 0,94 \text{ ма}.$$

Поэтому чувствительность метода измерения (1):

$$S_m \approx 600 \cdot 10^6 \cdot 0,94 \cdot 10^{-3} \approx 5,6 \cdot 10^5,$$

т. е. можно заметить изменение сопротивления

$$\frac{\Delta R_w}{R_w} \approx 2 \cdot 10^{-4} \%,$$

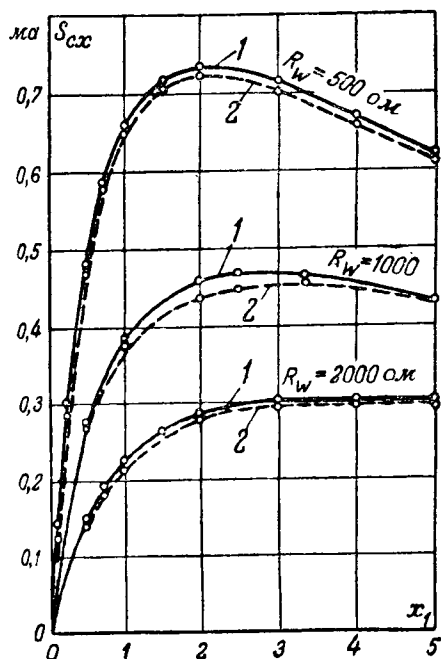


Рис. 5. Изменение чувствительности мостовой схемы в зависимости от параметра $x_1 = \frac{R_w}{R_2}$ при $x_2=1$, $E=2,1$ в, $R_y=300$ ом; $R_g=0,1$ ом.
1—теоретические кривые; 2—экспериментальные.

При этих условиях найдем [(3), (4), (5)]:

$$R_{gz} \approx \frac{0,18}{1,6} \cdot \frac{2,6}{1,18} 500 \approx 125 \text{ ом}; P_w \approx 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ вт},$$

$$R_{yy} \approx \frac{1,18}{2,6} \cdot 500 \approx 225 \text{ ом}; P_z \approx 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ вт},$$

$$R_{ww} \approx 160 \text{ ом}; \eta_{gw} \approx 0,1.$$

Для наглядности приведем кривые* изменения чувствительности схемы моста (рис. 5 и 6)

$$S_{icx_0} = S_1(x_1), \text{ при } x_2=1, E=2,1 \text{ в};$$

$S_{icx_0} = S_2(x_2)$, при $x_1=1$, $R_g=0,1$ ом; $R_y=300$ ом, численные по расчету (7) и экспериментально, задаваясь известными сопротивлениями R_w (500, 1000, 2000 ом).
*Заданы: э. д. с. источников питания E , сопротивление генератора R_g и цепи учета R_y .

Довлевающая систему уравнений (8), найдем:

$$x_1 = \sqrt{\frac{1 + \frac{R_w}{R_y}(1+x_2)}{1 + \frac{R_g}{R_w}(1+\frac{1}{x_2})}};$$

$$x_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{R_y}{R_w}(1+x_1)}{1 + \frac{R_w}{R_g}(1+\frac{1}{x_1})}};$$

$$R_w = \sqrt{\frac{x_1}{x_2} R_g R_y}$$

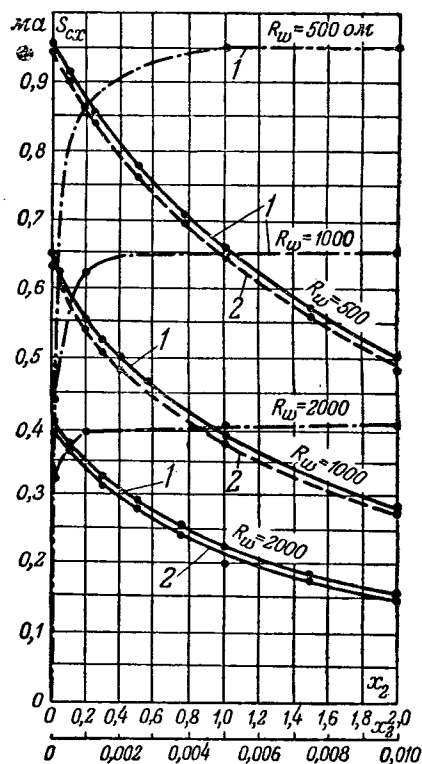


Рис. 6. Изменение чувствительности мостовой схемы в зависимости от параметра $x_2 = \frac{R_3}{R_2}$ при $x_1=1$, $E=2,1$ в, $R_y=300$ ом, $R_g=0,1$ ом.
1—теоретические кривые; 2—экспериментальные.

или в результате совместного решения:

$$\left. \begin{aligned} x'_1 &= x'_2 = 1, \\ R'_w &= \sqrt{R_g R_y}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

т. е.

$$R'_w = R'_2 = R'_3 = R'_4 = \sqrt{R_g R_y}. \quad (10a)$$

В частном случае, положив: $R_g = R_y$, получим еще одно из известных по [Л. 2—4] условий:

$$R'_w = R'_2 = R'_3 = R'_4 = R_g = R_y. \quad (10b)$$

Однако полученный результат (10) можно переписать в более общей форме, пользуясь свойствами четырехплюсников, представляющих мостовую схему.

Действительно, на основании (5) и (10) будет:

$$\left. \begin{aligned} R_w &= R_{ww}, \\ R_w &= R_{gg} = R_{yy}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Последнее соотношение в (11) перепишем в следующем виде:

$$R_w = R_{ww} = \sqrt{R_{gg} R_{yy}} \quad (11a)$$

Кроме того, легко показать, что:

$$R_{gw} = 2\sqrt{R_g}(\sqrt{R_g} + \sqrt{R_y}),$$

$$R_{yy} = 2\sqrt{R_y}(\sqrt{R_g} + \sqrt{R_y}).$$

Построение кривых и численные расчеты выполне-

А. Князевой и Т. М. Гушиной.

Отсюда к. п. д. (η_{gw}) передачи энергии через четырехполюсник, нагруженный сопротивлениями R_g , R_w , будет:

$$\eta_{gw} = \frac{1}{4} \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_g}{R_y}}\right)}.$$

По (10) чувствительность схемы достигнет значения

$$S'_{icx_0} = \frac{E}{4} \frac{1}{(\sqrt{R_g} + \sqrt{R_y})^2} = \frac{E}{R_y} \frac{\eta_{gw}}{\left(1 + \sqrt{\frac{x_3}{x_4}}\right)},$$

$$S'_{ucx_0} = \frac{E}{4} \frac{R_y}{(\sqrt{R_g} + \sqrt{R_y})^2} = E \frac{\eta_{gw}}{(1 + \sqrt{x_3 x_4})}.$$

Пример 2. Задаваясь элементами указателя и генератора (пример 1), определить оптимальные элементы моста R'_w , R'_2 , R'_3 , R'_4 (рис. 1).

Решение.

На основании (10):

$$x'_1 = 1; R'_w = \sqrt{0,1 \cdot 300} \approx 5,5 \text{ ом},$$

$$x'_2 = 1,$$

$$\text{т. е. } R'_w = R'_2 = R'_3 = R'_4 \approx 5,5 \text{ ом}.$$

Тогда (7) чувствительность схемы:

$$S_{icx_0} = \frac{2,1}{4} \frac{1}{(\sqrt{0,1} + \sqrt{300})^2} \approx 1,7 \text{ мм/ма}.$$

Отсюда (1) чувствительность метода измерения:

$$S_{\mu} = 600 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \approx 1,0 \cdot 10^6,$$

т. е. можно заметить изменение сопротивления:

$$\frac{\Delta R_w}{R_w} \approx 1 \cdot 10^{-4} \%.$$

При этих условиях:

$$R_{gg} = R_{yy} = R_{ww} \approx 5,5 \text{ ом}; P_w \approx 0,2 \text{ вт};$$

$$P_{\Sigma} \approx 0,8 \text{ вт}; \eta_{gw} = 0,25.$$

В дополнение к приведенным ранее графикам (рис. 5, 6) здесь приводится кривая (рис. 7):

$$S_{icx_0} = S_3(R_w), \text{ при } x_1 = x_2 = 1; E = 2,1 \text{ в};$$

$$R_g \approx 0,1 \text{ ом},$$

полученная по расчету (7) и проверенная экспериментально, задаваясь различным сопротивлением цепи указателя (300, 600, 1000 ом).

Пользуясь кривой (рис. 7), заметим, что в диапазоне от 0,1 до 300 ом чувствительность схемы больше 0,9 мм/ма (пример 1).

в) Заданы: э. д. с. источника питания E , сопротивления элементов схемы.

Задача заключается в подборе сопротивлений генератора и указателя схемы, элементы которой считаются заданными.

Предполагается, что изменение сопротивлений генератора и указателя, выбираемых из любой серии аппаратуры, не влияет на э. д. с. E источника питания на чувствительность указателя S_y . Это допущение освобождает нас от необходимости ограничивать свой выбор какими-либо определенными типами указателей и генераторов.

При подобном способе расчета совершенно нет необходимости считать, что указатель получает всю энергию от измерительной цепи, будучи к ней подключен непосредственно. Здесь можно предположить, что указатель подключается к схеме через промежуточный четырехполюсник (усилитель).

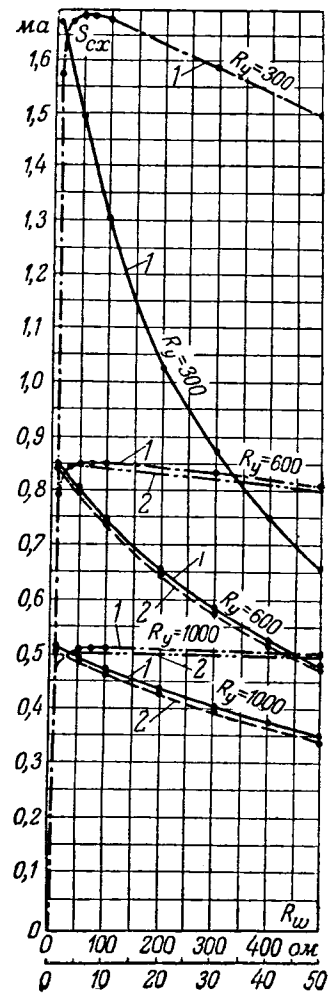


Рис. 7. Изменение чувствительности мостовой схемы в зависимости от величины регулируемого сопротивления R_w при $x_1 = x_2 = 1$, $E = 2,1 \text{ в}$, $R_g = 0,1 \text{ ом}$.

1—теоретические кривые;
2—экспериментальные.

В соответствии с (7в) исследование зависимости вида:

$$S_{icx_0} = E \frac{q_k}{p_k x_k + n_k}$$

показывает, что чувствительность схемы монотонно растет по мере убывания переменных x_3 и x_4 до наибольшего значения, при условии:

$$\left. \begin{array}{l} R_g \ll R_{gg}, \\ R_y \ll R_{yy} \end{array} \right\} S_{icx_0}$$

и

$$\left. \begin{array}{l} R_g \ll R_{gg}, \\ R_y \gg R_{yy} \end{array} \right\} S_{ucx_0}.$$

Тогда

$$S_{icx_0} = E \frac{1}{(1+x_1)\left(1+\frac{1}{x_2}\right)} \frac{R_w}{R_{gg}R_{yy}};$$

$$S_{ucx_0} = E \frac{1}{(1+x_1)\left(1+\frac{1}{x_2}\right)} \frac{R_w}{R_{gg}};$$

$$\eta_{gw} = \frac{x_1 x_2}{(1+x_1)(1+x_2)}$$

Не исключена возможность того, что завод-изготовитель ограничится перемоткой соответствующих электрических элементов указателя, включая его непосредственно в схему, сохраняя при этом все остальные электрические характеристики прибора. В этом случае можно считать, что чувствительность указателя S_y является обратной сопротивлению его обмоток. Следует рассмотреть поэтому чувствительность метода измерения

Подберем некоторые k и n так, чтобы $S_y = kR_y^n$,

$$E = \frac{kR_y^n x_1}{[1 + x_1 + x_2(1 + x_2)][R_y(1 + x_1) + R_w(1 + x_2)]}.$$

Удовлетворяя уравнению $\frac{\partial(S)_M}{\partial R_y} = 0$ и отбрасывая решение $R_y = 0$, получим:

$$R_y = \frac{n}{(1-n)} \left(\frac{1+x_2}{1+x_1} \right) R_w$$

в соответствии с (5)

$$R_y = \frac{n}{(1-n)} R_{yy}.$$

Для магнитоэлектрического указателя, при условии отсутствия объема, занимаемого проволокой рамки, плотности магнитного потока в зазоре принимают $n = 1/2$. В этом случае

$$R_y = R_{yy}, \quad (13)$$

является условием отдачи схемой с заданными элементами наибольшей мощности указателю. Чувствительность метода измерения достигает здесь значения:

$$S_M = k \frac{E}{2} \frac{x_1}{(1+x_1)(1+x_2)} \frac{\sqrt{R_y}}{R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_{gg}} \right)};$$

$$R_g \ll R_{gg},$$

$$S_M = k \frac{E}{2} \frac{x_1}{(1+x_1)\sqrt{R_w(1+x_1)(1+x_2)}}.$$

Заметим, что в частном случае, считая $R_g = R_{gg}$, по нашему решению, указанное Крапивенским [Л. 2]:

$$S_M = k \frac{E}{4} \frac{x_1}{(1+x_1)\sqrt{R_w(1+x_1)(1+x_2)}}.$$

Пример 3. Надо подобрать указатель к мостовой, собранной из четырех одинаковых по номинальному значению сопротивлений (100 ом). Источник питания э. д. с. $E = 2,1$ в, сопротивление $R_g = 0,1$ ом. В нашем распоряжении [Л. 5] имеются следующие типы: Тип МЗГ-2, $R_y = 25$ ом; $S_{iy} = 100 \cdot 10^6$ мм/а; или, $R_y = 120$ ом; $S_{iy} = 100 \cdot 10^6$ мм/а.

Для каждого из них получим соответственно: указатель МЗГ-2

$$S_{i\text{ cx } 1} = \frac{2,1}{4} \frac{1}{(100+25) 1,001} \approx 4,2 \text{ ма.}$$

Эталон*

$$S_i = \frac{2,1}{4} \frac{1}{(100+120) 1,001} \approx 2,4 \text{ ма.}$$

Чувствительность метода будет:

$$S_{M_1} \approx 4,2 \cdot 10^{-3} 100 \cdot 10^6 \approx 4,2 \cdot 10^5,$$

$$S_{M_2} \approx 2,4 \cdot 10^{-3} 100 \cdot 10^6 \approx 2,4 \cdot 10^5.$$

Заметим, что при одинаковой степени разбалансировки измерительного элемента к указателю со стороны моста относятся мощности, отношение которых будет:

$$\frac{P_{y_1}}{P_{y_2}} \approx \frac{4,2 \cdot 25}{2,4 \cdot 120} \approx 0,64.$$

Указатель типа МЗГ-2 обеспечивает большую чувствительность метода при меньшей подводимой к нему мощности.

г) Задана э. д. с. E источника питания. В этом случае имеется возможность наилучшим образом подобрать все элементы измерительной установки, достигнув условий полной согласованности включения.

Задача (рис. 1) решается при совместном удовлетворении приведенных ранее зависимостей (10) и (12), что возможно при условии:

1) Чувствительность схемы по току —

$$\left. \begin{aligned} R_w = R_2 = R_3 = R_4, \\ R_g, R_y \ll R_w. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2) Чувствительность схемы по напряжению —

$$\left. \begin{aligned} R_w = R_2 = R_3 = R_4, \\ R_g \ll R_w \ll R_y. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

В обобщенной форме, пользуясь элементами четырехполюсника, соответственно будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} R_w = (R_{ww})_{R_g \rightarrow 0} = (R_{ww})_{R_y \rightarrow 0}, \\ R_w = \sqrt{R_{gg} R_{yy}} \rightarrow 0. \end{aligned} \right\} \quad (14a)$$

$$\left. \begin{aligned} R_w = (R_{ww})_{R_g \rightarrow 0} = (R_{ww})_{R_y \rightarrow \infty}, \\ R_w = \sqrt{R_{gg} R_{yy}} \end{aligned} \right\} \quad (15a)$$

В случае (14) и (14a) возможно увеличение чувствительности только за счет бесконечно большого возрастания мощности, рассеиваемой в самой схеме, что ограничивает применение данного варианта расчета.

В случае (15) и (15a) схема находится в наиболее благоприятных энергетических режимах, к. п. д. будет:

$$\eta_{gw} = 0,25.$$

Чувствительность схемы достигает:

$$S_{i\text{ cx } 0} = \frac{E}{4} = E\eta_{gw}.$$

Наконец, в частном случае, ограничиваясь магнитоэлектрическим указателем определенного типа ($n = \frac{1}{2}$), получим:

$$\left. \begin{aligned} R_w = R_2 = R_3 = R_4 = R_y, \\ R_g \ll R_w \end{aligned} \right\}$$

или в обобщенной форме

$$\left. \begin{aligned} R_w \neq R_{ww}, \\ R_w = \sqrt{R_{gg} R_{yy}} = \sqrt{R_{gg} R_y}. \end{aligned} \right\}$$

Приложение 2. Вывод формулы (9). Пользуясь обозначениями таблицы, уравнения

$$x_1 = \sqrt{\frac{1 + \frac{R_w}{R_y}(1+x_2)}{1 + \frac{R_g}{R_w}\left(1 + \frac{1}{x_2}\right)}},$$

$$x_2 = \sqrt{\frac{\frac{R_y}{R_w}(1+x_1)}{1 + \frac{R_g}{R_w}\left(1 + \frac{1}{x_1}\right)}},$$

перепишем:

$$\left. \begin{aligned} x_1^2 x_2 (1+x_3) x_4 + x_3 x_4 x_1^2 - x_2^2 - (1+x_4) x_2 &= 0, \\ x_2^2 x_1 (1+x_3) - x_3 x_1^2 + x_2^2 - (1+x_4) x_1 x_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Введем подстановку

$$\left. \begin{aligned} x_1 x_2 &= \mu, \\ \frac{x_2}{x_1} &= \sigma; \end{aligned} \right\}$$

тогда

$$x_1 = \pm \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}, \quad x_2 = \pm \sqrt{\mu \sigma}.$$

Отбрасывая отрицательные знаки, как не соответствующие физическому смыслу, перепишем (1):

$$\mu \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} \rho x_4 + \frac{\mu}{\sigma} x_3 x_4 - \mu \sigma - \delta \sqrt{\mu \sigma} = 0, \quad (a)$$

$$\mu \sqrt{\mu \sigma} \rho - \frac{\mu}{\sigma} x_3 x_4 + \mu \sigma - \delta \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} x_3 = 0. \quad (b)$$

Для сокращения письма здесь обозначено:

$$\rho = 1 + x_3; \quad \delta = 1 + x_4.$$

Произведем следующие действия:

$$\left. \begin{aligned} (a) \times \sigma + (b) \times \sigma, \\ (a) \times \sigma^2 - (b) \times \sigma x_4; \end{aligned} \right\}$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} \mu \rho \sqrt{\mu \sigma} (\sigma + x_4) - \delta \sqrt{\mu \sigma} (\sigma + x_3) &= 0, \\ \sqrt{\mu} (x_3 x_4 - \sigma^2) [\sqrt{\mu} (\sigma + x_4) + \delta \sqrt{\sigma}] &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Отбрасывая решения $\mu = 0, \sigma = 0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \mu \rho (\sigma + x_4) - \delta (\sigma + x_3) &= 0, \\ x_3 x_4 - \sigma^2 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решение этих уравнений дает:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \sqrt{\frac{x_3}{x_4}} \left(\frac{1+x_4}{1+x_3} \right), \\ \sigma &= \sqrt{x_3 x_4}. \end{aligned} \right\}$$

Подставляя принятые обозначения (таблица), окончательно получим (9).

Литература

1. И. Н. Кротков. Электричество, № 10, 194
2. Л. Л. Крапивенский. Условия наибольшей чувствительности моста Уитстона. Труды Политехнического института, 1936.
3. Е. И. Дмитриев. Измерение малых переменных индуктивным методом. Изд. Академии наук СССР, 1949.
4. Г. Г. Гинкин. Справочник по радиотехнике. Энергоиздат, 1949.
5. И. Н. Кротков. Труды ВНИИМ. Вып. 6 (66), 1949.
6. Ф. Е. Темников и Р. Р. Харченко. Эмпирические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1948.
7. Электрические и магнитные измерения под руководством Е. Т. Шрамкова. ОНТИ, 1937.



Кривые одновременного намагничивания постоянным и переменным полями магнитного усилителя с обратной связью

Инж. И. Б. НЕГНЕВИЦКИЙ

Московский энергетический институт им. Молотова

Расчет дроссельных и трансформаторных магнитных усилителей без обратной связи удобно производить графоаналитическим методом [Л. 1], используя характеристики магнитного материала

$$B_{\sim} = f(H_{\sim}; H_{\sim}) \quad (1)$$

при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями. Зависимость (1) в определенных масштабах изображает вольтамперные характеристики дросселя с подмагничиванием. Если наложить на семейство характеристик (1) эллипс (траекторию рабочей точки), соответствующий данной нагрузке усилителя, то легко определить зависимость $H_{\sim} = f(H_{\sim})$ и, следовательно, токовую характеристику усилителя $I_{\sim} = f(I_{\sim})$. В указанной работе [Л. 1] методика такого расчета усилителей подробно изложена и будем считать ее известной.

Излагается метод расчета и качественного анализа дроссельного магнитного усилителя с обратной связью на основе предлагаемых кривых одновременного намагничивания постоянным и переменным полями. Приведены примеры графического расчета характеристик и указывается на возможность применения магнитного усилителя с обратной связью для целей стабилизации напряжения, тока и в качестве реле переменного напряжения, частоты.

При расчете магнитных усилителей с обратной связью обычно предварительно проводят расчет усилителя без обратной связи, затем графически с помощью прямой обратной связи, подбирая наклон, определяют характеристику усилителя

с обратной связью [Л. 2, 3].

Автор предлагает строить семейство характеристик, подобных (1), для магнитного усилителя с обратной связью, позволяющее непосредственно определять характеристику усилителя, не прибегая к промежуточному определению характеристики усилителя без обратной связи.

Условимся называть семейством кривых одновременного намагничивания дроссельного усилителя с обратной связью (рис. 1) кривые, выражающие зависимость магнитной индукции от магнитного поля при различных нагрузках усилителя.

симостью

$$B_{\sim} = f(H_{\sim}; H_y). \quad (2)$$

Семейство характеристик (2) отличается от (1) тем, что здесь параметром является постоянная составляющая напряженности магнитного поля H_{\sim} , а лишь часть ее, соответствующая напряженности управляющего магнитного поля H_y .

Для данного дроссельного магнитного усилителя при нагрузке $Z_n = 0$, идеальном выпрявлении и определенных дополнительных допущениях зависимость (2) в других масштабах отражает вольтамперные характеристики дросселя с подмагничиванием с обратной связью при различных управляющих токах I_y :

$$U_{\sim} = f(I_{\sim}; I_y). \quad (3)$$

При построении семейства характеристик (2) мы исходим из известного семейства характеристик (1), где H_{\sim} — среднее значение переменной составляющей напряженности магнитного поля B_{\sim} — среднее, действующее или амплитудное значение переменной составляющей индук-

сультующая постоянная, составляющая напряженности H_{\sim} , равна алгебраической сумме напряженности $H_{o.c.}$, создаваемой обратной связью ($H_{o.c.}$ всегда > 0),

$$H_{\sim} = H_y + H_{o.c.} \quad (4)$$

для дроссельного усилителя с обратной связью при известных допущениях

$$H_{o.c.} = k_{o.c.} \cdot H_{\sim}, \quad (5)$$

где $k_{o.c.}$ — коэффициент обратной связи.

Из (4) и (5)

$$H_{\sim} = H_y + k_{o.c.} H_{\sim}. \quad (6)$$

Более простой способ построения точек кривых семейства (2) сводится к следующему: задаемся H_{\sim} и H_y , по формуле (6) вычисляем H_{\sim} и проводим вертикаль из точки пересечения с кривой семейства (1), соответствующей данному H_{\sim} . Точка пересечения является точкой кривой семейства (2), соответствующей данному H_y .

Вспомогательная построения на примере. На рис. 2 пунктиром показаны кривые семейства (1). Пусть требуется построить кривую $B_{\sim} = f(H_{\sim})$ при $H_y = 0,2$. Из (6) следует, что

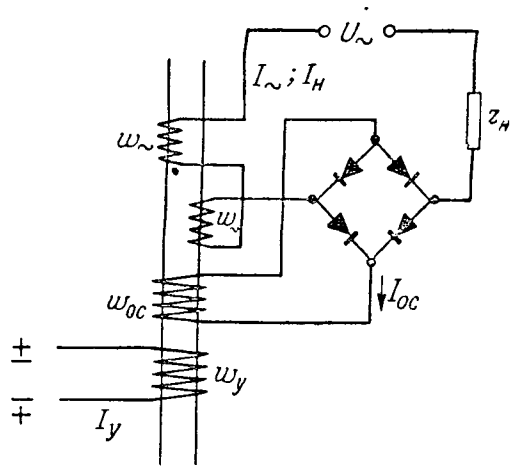


Рис. 1. Принципиальная схема дроссельного магнитного усилителя с обратной связью.

при этом $H_{\sim} = H_{\sim}$. Задаемся, например, $H_{\sim} = 1$ а/см и проводим вертикаль до пересечения с кривой $B_{\sim} = f(H_{\sim})$ при $H_{\sim} = 1$ а/см.

Точка пересечения (точка А, рис. 2) является точкой искомой кривой. Задаваясь $H_{\sim} = 0,4$ а/см, получим точку В и т. д.

Для построения кривой $B_{\sim} = f(H_{\sim})$ при $k_{o.c.} = 1$ и при $H_y = +0,1$ а/см поступаем аналогично. Задаемся, например, $H_{\sim} = 0,9$ а/см. Из (6) находим $H_{\sim} = 1$ а/см. Из точки, соответствующей $H_{\sim} = 0,9$, проводим вертикаль до пересечения с кривой семейства (1), соответствующей $H_{\sim} = 1$ а/см. Точка пересечения (С, рис. 2) является точкой искомой кривой.

При построении кривых для отрицательных H_y необходимо помнить, что кривые семейства (1) без обратной связи — одни и те же как для $H_{\sim} > 0$, так и для $H_{\sim} < 0$, так как поляри-

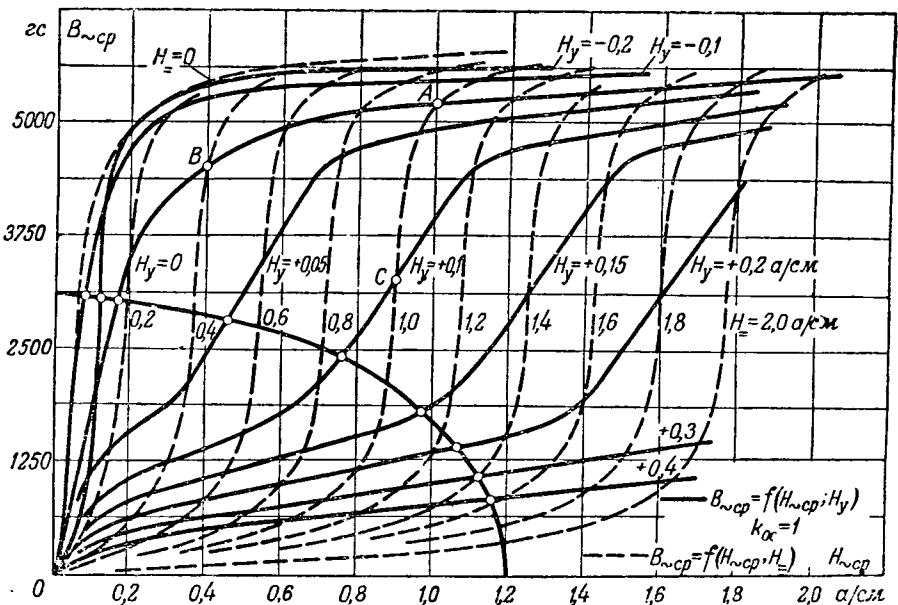


Рис. 2. Графическое построение кривых одновременного намагничивания дроссельного магнитного усилителя с обратной связью при $k_{o.c.} = 1$ и траектория рабочей точки при активной нагрузке (пермаллой).

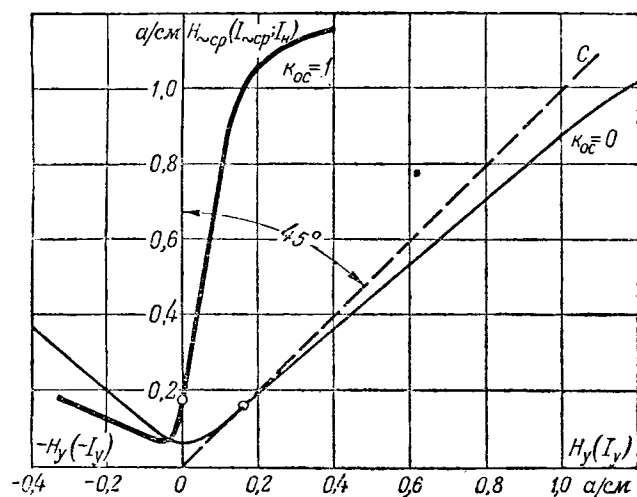


Рис. 3. Токовые характеристики дроссельного магнитного усилителя с обратной связью при $k_{о.с}=1$ и без обратной связи.

ность подмагничивания в этом случае не имеет значения.

На рис. 2 сплошными линиями показано семейство кривых (2) при $k_{о.с}=1$, построенное вышеописанным способом. Кривые позволяют легко определить характеристику дроссельного магнитного усилителя с обратной связью при той или иной нагрузке¹. Для этого надо на эти кривые наложить соответствующий эллипс—траекторию рабочей точки. На рис. 2 построен эллипс для случая активной нагрузки. На рис. 3 приведены две характеристики усилителя; одна для $k_{о.с}=0$ (без обратной связи), построенная по точкам пересечения эллипса с кривыми семейства (1), и другая для $k_{о.с}=1$, построенная по точкам пересечения эллипса с кривыми семейства (2). Здесь же (рис. 3) проведена прямая ОС обратной связи под углом 45° ($K_{о.с}=1$). Легко проверить, что по прямой ОС и характеристике при $k_{о.с}=0$ мы получим ту же характеристику для $k_{о.с}=1$.

Таким образом, исключается необходимость определения характеристики усилителя без обратной связи и в дальнейшем построений совместно с прямой обратной связи.

Предлагаемые характеристики (2) для данного материала сердечника и данного $k_{о.с}$ являются столь же универсальными, как и обычные характеристики (1). Точность расчета по ним при $k_{о.с} \leq 1$ не ниже, чем при пользовании прямой обратной связи.

Характеристики $B_- = f(H_-; H_y)$ представляют интерес не только с расчетной точки зрения. Они облегчают выявление влияния изменения напряжения U_- (рис. 1) питания переменного

тока, частоты f , сопротивления нагрузки работу усилителя с обратной связью; на характеристики (2) имеют существенно меньший наклон к оси абсцисс (рис. 2), чем характеристики (1) и поэтому изменение U_- , f , Z_n вается в большей степени при наличии обратной связи. Построив эллипс, соответствующий нужным U_- , f или Z_n , легко непосредственно определить изменение характеристики усилителя с обратной связью.

С другой стороны, эти характеристики наглядно показывают новые возможности применения магнитных усилителей с обратной связью.

Например, кривые $B_- = f(H_-; H_y)$ усилителя с обратной связью в области больших значений B_- идут более горизонтально, чем обычно для намагничивания на переменном токе (рис. 2), что говорит о возможности использования таких элементов в стабилизаторах напряжения. О других возможных применениях мы скажем ниже.

Весьма интересные характеристики $B_- = f(H_-; H_y)$ получаются при перекомпенсированной обратной связи ($k_{о.с} > 1$). Метод построения остается тем же.

На рис. 4 представлено семейство характеристик $B_- = f(H_-; H_y)$ при $k_{о.с}=1,075$. В случае $k_{о.с} > 1$ и $H_y < 0$ характерно наличие устойчивой области—падающих участков характеристик. В данных осях координат—это неустойчивые характеристики типа IV. При $H_y < 0$ и при $H_y > 0$ характеристики не имеют падающего участка. Очевидно, что и вольтамперные характеристики будут иметь такой же вид. С физической точки зрения такого рода вольтамперные характеристики можно объяснить следующим образом.

При $H_y = 0$ и при $H_y > 0$ с увеличением $U_- (B_-)$ возрастает переменный ток $I_- (H_-)$ и ток $I_{о.с} (H_{о.с})$ в обмотке обратной связи $w_{о.с}$. За счет подмагничивающего действия обратной связи ток I_- увеличивается в значительно большей мере, и вольтамперные характеристики идут более полого, чем в случае обычного дросселя со сталью. Уже при сравнительно небольших $U_- (B_-)$ характеристики идут с наклоном, соответствующим примерному наклону вольтамперной характеристики при переменном токе обычного дросселя со сталью в области большого насыщения. При $H_y < 0$ есть почти горизонтальный участок (рис. 4), при изменении $I_- (H_-)$ напряжение на обмотке $w_- (B_-)$ почти не изменяется. Этот участок характеристики также может быть использован для целей стабилизации напряжения. При $H_y > 0$ насыщение наступает более резко.

При $H_y < 0$ с увеличением $U_- (B_-)$ в определенных пределах ток $I_- (H_-)$ возрастает в меньшей степени, и вольтамперная характеристика

¹ На рис. 1 нагрузка Z_n включена на переменном токе, но все излагаемое в статье справедливо и для случая нагрузки на постоянном токе, включенной после выпрямителя последовательно с $w_{о.с}$.

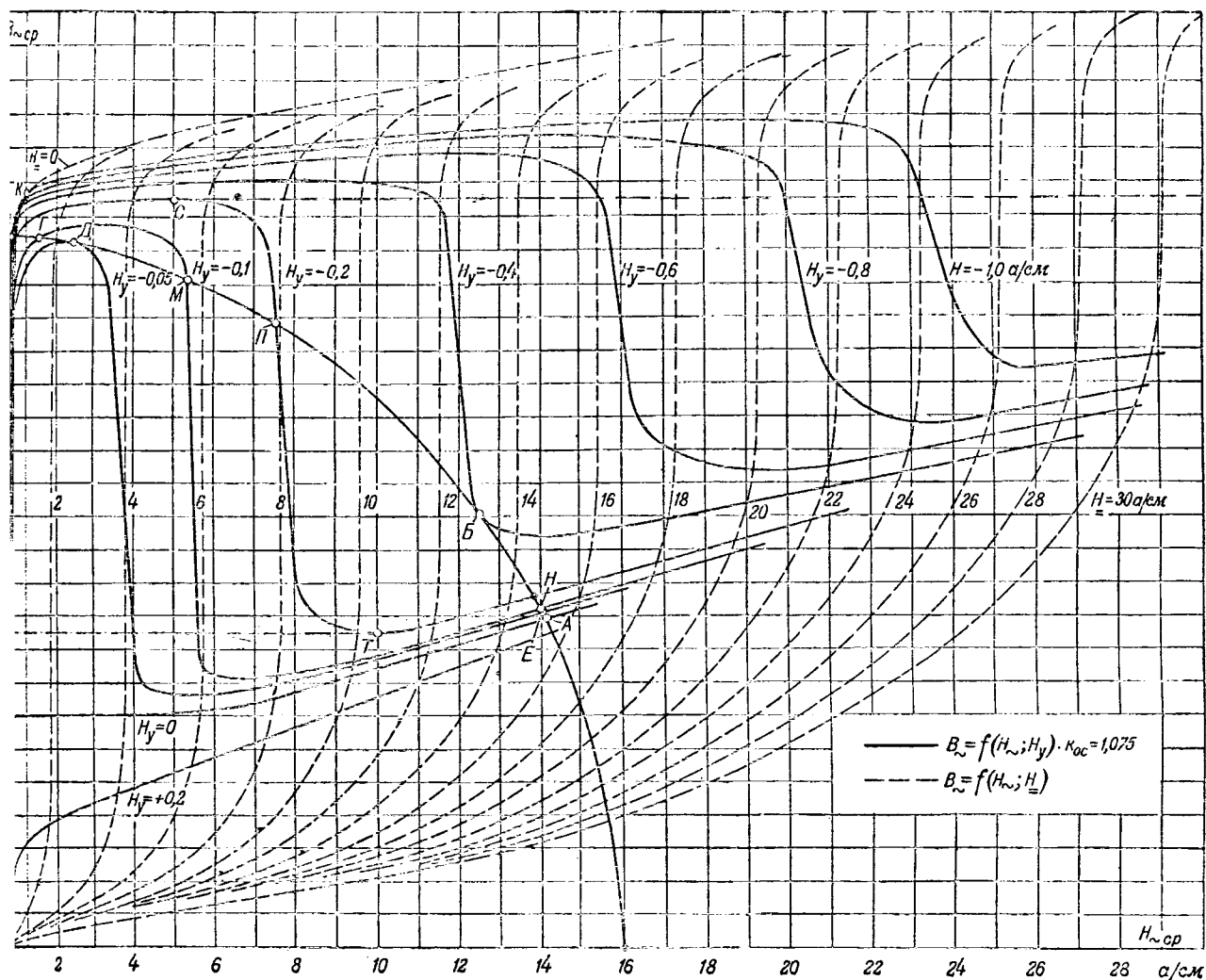


рис. 4. Кривые одновременного намагничивания дроссельного магнитного усилителя с перекompенсированной обратной связью ($k_{o.c.} = 1,075$) при различных H_y = пост и траектория рабочей точки при активной нагрузке (пермаллой).

более вертикально, чем в случае обычного селя со сталью. Это объясняется тем, что увеличением тока $I_{o.c.}$ ($H_{o.c.}$) в обмотке обратной связи результирующее подмагничивание H_{Σ} уменьшается, так как H_y и $H_{o.c.}$ противоположны по знаку ².

При некотором $U_{\Sigma}(B_{\Sigma})$ результирующее подмагничивание равно нулю ($H_{\Sigma} = H_y + k_{o.c.} H_{\Sigma} = 0$), вся характеристика касается характеристики дросселя (без обратной связи) дросселя при $H_{\Sigma} = 0$ (например, точка K рис. 4, для $H_y = -1$ A/cm).

При дальнейшем увеличении $U_{\Sigma}(B_{\Sigma})$ результирующее подмагничивание будет все время оставаться и, следовательно, ток I_{Σ} резко увеличивается. Здесь незначительное увеличение U_{Σ} идет за счет действия обратной связи, которое приводит к увеличению I_{Σ} , и при больших $H_y < 0$

характеристики в этой области почти горизонтальны.

При некотором $U_{\Sigma}(B_{\Sigma})$ в области колена кривой намагничивания начинается лавинообразный процесс возрастания тока. Например, при $H_y = -0,2$ A/cm рабочая точка перейдет „скачком“ из точки C (рис. 4) по направлению, указанному стрелкой, в точку (не показанную на рис. 4), находящуюся на правой ветви характеристики в области очень больших H_{Σ} и соответствующую данному $U_{\Sigma}(B_{\Sigma})$. При этом рабочая точка скачком проходит неустойчивую область, где за счет возрастающего подмагничивающего действия обратной связи увеличение I_{Σ} сопровождается уменьшением напряжения на обмотках w_{Σ} усилителя (участок вольтамперной характеристики с отрицательным наклоном). Можно сказать, что здесь как бы закончилось сказываться „задерживающее“ действие отрицательной напряженности H_y , и усилитель скачком переходит в область больших насыщений, где I_{Σ} возрастает практически линейно с увеличением U_{Σ} .

Отметим, что в этой области усилитель работает с отрицательной обратной связью.

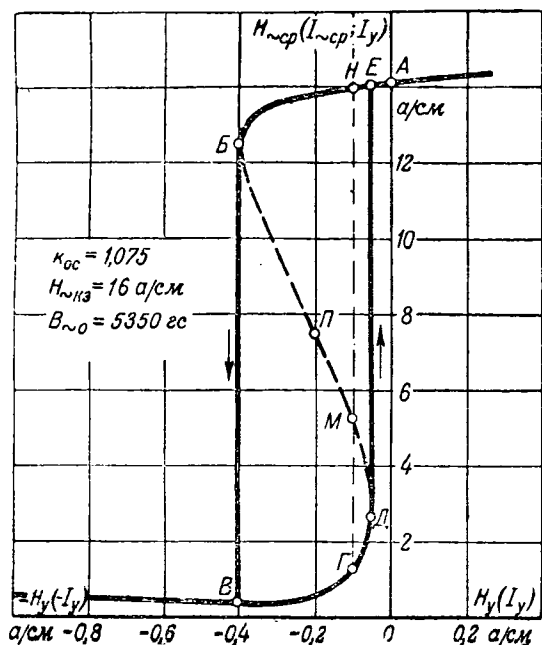


Рис. 5. Токовая характеристика бесконтактного дроссельного магнитного реле.

Если теперь уменьшать $U_-(B_-)$, то рабочая точка будет перемещаться влево по почти линейному устойчивому участку характеристики. В точке T характеристики при $H_y = -0,2$ а/см (рис. 4) начнется лавинообразный процесс уменьшения тока, и рабочая точка скачком перейдет по направлению, указанному стрелкой, в точку P (рис. 4) в области малых H_- . Здесь опять начнет сказываться наличие отрицательной напряженности H_y , ускоряющей процесс спада тока $I_-(H_-)$.

Итак, только при $H_y < 0$, за счет противоположного действия H_y и H_{oc} , характеристики вначале поднимаются до больших значений $U_-(B_-)$, а затем уже резко спадают.

Чем меньше по абсолютному значению отрицательные H_y , тем при меньшем $U_-(B_-)$ происходит скачок. Характер изменения кривых в зависимости от изменения H_y при данном k_{oc} ясно виден на рис. 4. Вольтамперные характеристики и скачки тока напоминают работу феррорезонансного последовательного контура при изменении напряжения питания.

Если на семейство характеристик (2) наложить эллипс, соответствующий нагрузке усилителя, то легко определить известную [Л. 3] релейную характеристику усилителя при $k_{oc} > 1$. На рис. 4 построен эллипс для случая активной нагрузки; по точкам пересечения его с характеристиками (2) на рис. 5 построена релейная характеристика усилителя. Пунктиром показана неустойчивая часть S-образной зависимости $H_- = f(H_y)$ или $I_n = f(I_y)$ (участок $БМВ$ рис. 5).

На рис. 6 построены характеристики $I_n = f(H_-)$ для трех различных значений k и одном и том же $H_y = -0,2$ а/см. Очевидно, чем больше k_{oc} при данном $H_y < 0$, тем меньшему $U_-(B_-)$ начнется скачок $I_-(H_-)$.

Из рис. 4 и 6 можно видеть влияние k_{oc} на вольтамперные характеристики усилителя с обратной связью.

Полученные вольтамперные характеристики магнитного усилителя с перекомпенсированной обратной связью наглядно показывают, что в наличии $H_y < 0$ можно получить релейный эффект при изменении B_- путем изменения напряжения питания U_- или частоты f . Иначе можно создать бесконтактное магнитное реле переменного напряжения и бесконтактное магнитное реле частоты.

На рис. 7 приведена характеристика усилителя $H_- = f(B_-)$ или $I_n = f(U_-)$ при $k_{oc} = f = \text{пост}$ и $H_y = -0,2$ а/см, построенная по соответствующей характеристике $B_- = f(H_-)$ и по нескольким эллипсам, соответствующим различным U_- . Неустойчивая часть S-образной зависимости $H_- = f(B_-)$ показана пунктиром (участок BEA , рис. 7). При напряжении U_- , соответствующем $B_{-0} = 5850$ гс, при данной частоте и нагрузке реле переменного напряжения „срабатывает“, и ток в нагрузке (исполнитель цепи) скачком возрастает до значительной величины. Такое реле работает аналогично магнитному реле переменного напряжения.

На рис. 8 приведена характеристика усилителя $H_- = \varphi(f)$ или $I_n = \varphi(f)$ при $k_{oc} = 1,1$, $U_- = \text{пост}$, $H_{-к.з} = 11,7$ а/см и $H_y = -0,2$, построенная по соответствующей характеристике $B_- = f(I_n)$ рис. 6 и по нескольким эллипсам, соответствующим различным частотам f . Неустойчивая часть S-образной зависимости $H_- = \varphi(f)$ показана пунктиром (участок $АМВ_1$, рис. 8). На рис. 8 частота f_1 соответствует при данном U_- индукции $B_{-0} = 6500$ гс. Если выбрать начальную рабочую точку, например на участке $Г_1П$ (рис. 8), то при уменьшении частоты до f_c магнитное реле сработает, и ток в нагрузке (исполнительной цепи) скачком возрастет до значительной величины. На рис. 6 построено также несколько эллипсов для случая $H_{-к.з} = 10,15$ а/см, по которым можно построить характеристику, подобную рис. 8.

Легко заметить, что аналогичная релейная характеристика может быть получена и при изменении сопротивления нагрузки.

⁸ При изменении U_- пропорционально изменяются полуоси эллипса.

⁴ При изменении частоты изменяется только вертикальная полуось эллипса обратно пропорционально частоте.

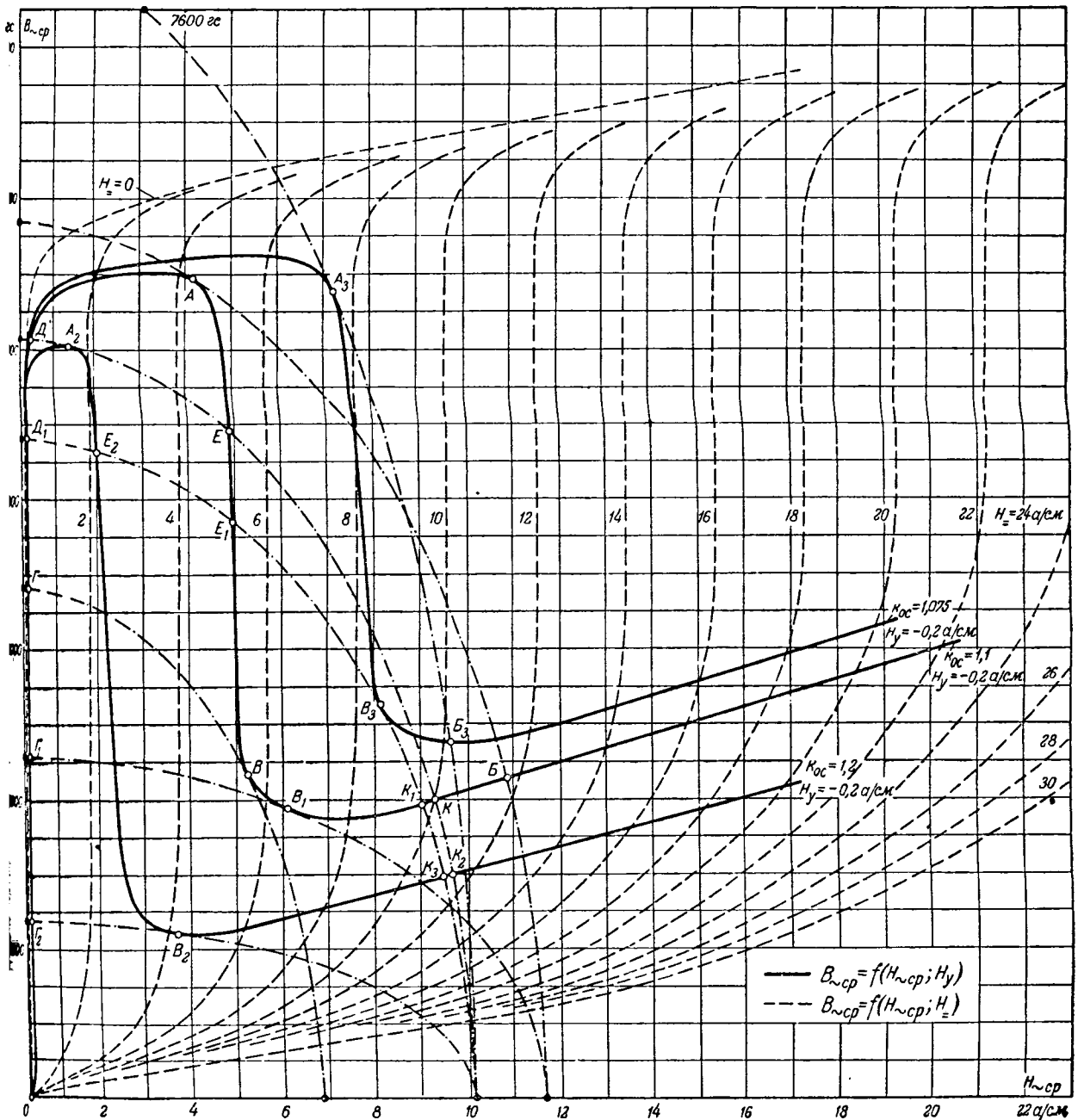


рис. 6. Кривые одновременного намагничивания дроссельного магнитного усилителя с перекомпенсированной обратной связью при неизменном $H_y = -0,2 \text{ а/см}$ и различных $k_{o.c.}$ и траектории рабочей точки при активной нагрузке и различных напряжениях питания переменного тока и частоте (пермаллой).

а рис. 9 в более удобном масштабе показана начальная часть характеристик $B_{\sim} = f(H_{\sim})$ при $k_{o.c.} = 1,075$ и $H_y = -1,0 \text{ а/см}$ и $H_y = -1,5 \text{ а/см}$. Мы уже отмечали, что здесь характеристики в определенной области (AB, рис. 9) значительно более вертикально, чем обычные характеристики (без обратной связи). Это объясняется тем, что в дополнение к так называемому эффекту «магнитного выпрямления» имеется встречное действие H_y и $H_{o.c.}$. Видно, что изменение U_{\sim} , f , Z_n в определенных пределах практически не изменит I_{\sim} . Любопытная характеристика может быть использо-

вана для целей стабилизации переменного тока.

Заключение. Предлагаемые кривые одновременного намагничивания постоянным и переменным полями магнитного усилителя с обратной связью могут облегчить расчет усилителя с обратной связью. Кривые более наглядно показывают влияние изменения напряжения питания, частоты и нагрузки на характеристику усилителя, более наглядно раскрывают физические процессы и новые возможности применения магнитного усилителя с обратной связью в целях стабилизации напряжения, тока, в качестве бесконтактного реле переменного напряжения, реле частоты и т. д.

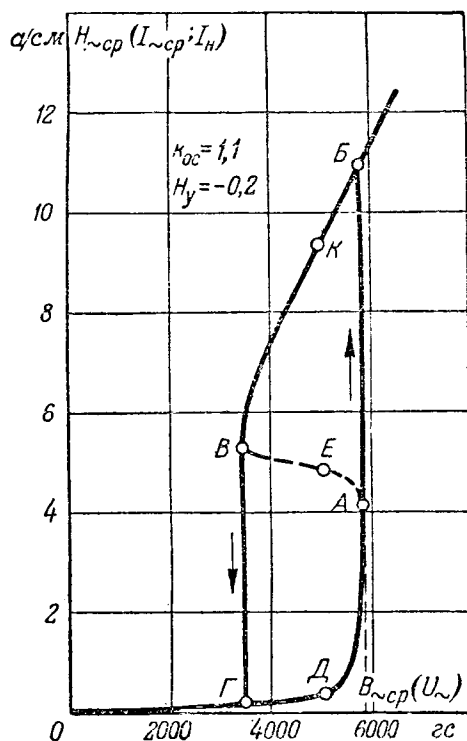


Рис. 7. Характеристика бесконтактного дросельного магнитного реле переменного напряжения ($f = \text{пост}$).

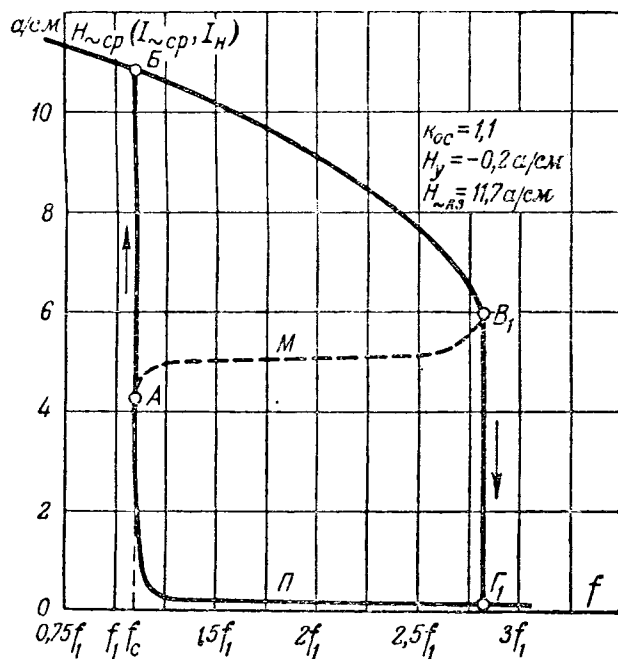


Рис. 8. Характеристика бесконтактного дросельного магнитного реле частоты ($U_{\sim} = \text{пост}$).

В рамках данной статьи не представляется возможным подробно остановиться на всех этих вопросах, так как каждый из них является са-

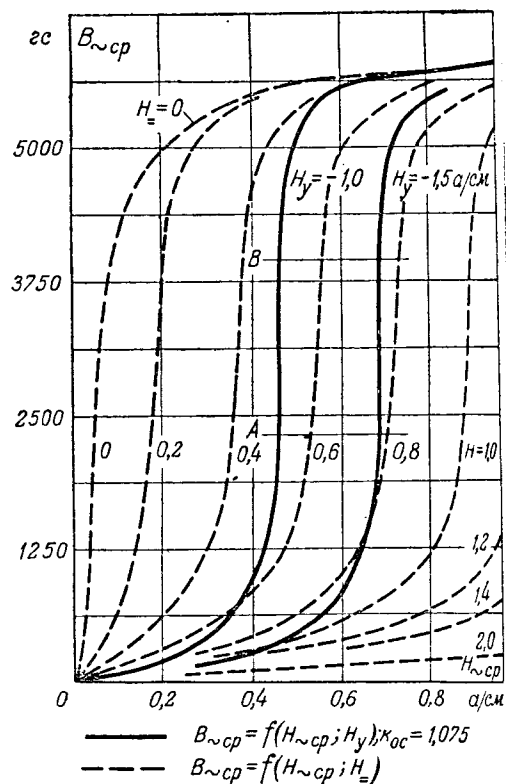


Рис. 9. Кривые одновременного намагничивания дросельного магнитного усилителя с перекомпенсированной обратной связью ($k_{o.c.} = 1,075$) при $H_y = \text{пост} < 0$, иллюстрирующие область (AB) стабилизации переменного тока

мостоятельной задачей, требующей большой теоретической и экспериментальной работы.

Отметим, что, как показала практика, предлагаемые кривые могут быть с успехом использованы для расчета магнитных усилителей с обратной связью при $k_{o.c.} \leq 1$. В случае перекомпенсированной обратной связи ($k_{o.c.} > 1$) точность расчета резко снижается и лучше не пользоваться для выяснения качественных соотношений. Для повышения точности расчета при $k_{o.c.} > 1$ необходимо иметь весьма точные исходные характеристики (1).

Расчет однотактных трансформаторных магнитных усилителей с обратной связью так же может быть проведен непосредственно с использованием кривых, аналогичных (2).

Литература

1. А. М. Рывкин. Амплитудный метод расчета дроселей насыщения. Электричество, стр. 57, № 8, 1959.
2. М. А. Розенблат. Магнитные усилители. Энергоиздат, 1949.
3. И. Б. Негневицкий. Магнитный усилитель релейном режиме. Электричество, стр. 46, № 4, 1949.



методах нормирования расхода электроэнергии на обработку металлов резанием

Инж. М. Н. ОСОКИН

Энергосбыт Молотовэнерго

изработка и внедре-
в практику рабо-
машиностроительных
приятий техниче-
ских

*Дана оценка различным методам нормирования рас-
хода электроэнергии на обработку металлов реза-
нием с точки зрения их применения на практике.*

Метод определения
расхода электроэнергии
на операцию, предложен-
ный С. А. Пресс [Л. 1

ованных, прогрессивных норм удельного
да электроэнергии на металлообработку
исключительное значение для снижения
т энергии на выпуск продукции. Однако по-
ние с нормированием расхода электроэнер-
на обработку металлов резанием нельзя при-
удовлетворительным. Существующие мето-
нормирования являются либо неточными, ли-
лишком сложными и не находят применения
ромышленности. Вследствие этого широкое
ространение получили совершенно неудовлет-
ельный способ определения удельной нормы
нове статистических данных.

дной из основных задач правильного норми-
ния является выбор единицы продукции, к
ой относится удельная норма. Очевидно,
более приемлемой следует считать единицу
скаемой продукции — деталь, узел, изделие
и т. д. На практике применяются и другие еди-
и, такие как 1 000 руб. стоимости выпущен-
продукции, тонна выпущенной продукции,
станко-час, норма-человеко-час станочника.
выпущенной продукции и 1 000 руб. стои-
явно непригодны в качестве единицы нор-
рования, так как ни стоимость, ни вес продук-
не находятся в прямой связи с расходом
энергии. Норма-станко-час и норма-чело-
станочника также нельзя рекомендовать
стве такой единицы, хотя они и имеют бо-
льшую связь с затратами энергии на изготов-
изделия.

и расчете нормы должны быть учтены сле-
дующие составляющие: а) полезный расход энер-
гии на обработку деталей; б) потери энергии в
приводе (станок, передача, двигатель);
в) расход энергии на неуставившиеся режимы
и торможения; г) расход энергии на вспо-
могательные электрифицированные операции (пе-
дальники суппортов и задних бабок крупных
и т. д.).

и 2], страдает крупными недостатками, к кото-
рым относятся сложность и трудоемкость опре-
деления мощности резания и слишком прибли-
женный учет потерь энергии. Опытная проверка
этого на одном из заводов г. Свердловска показа-
ла расхождение расчетных значений с фактиче-
скими в среднем на 10% в сторону превышения.
При такой погрешности нельзя считать этот ме-
тод удовлетворительным.

Не имеет практического значения вследствие
своей громоздкости и неточности расчетный ме-
тод, предложенный Л. В. Литваком [Л. 3].

В основу объемного метода нормирования,
предложенного А. Л. Матвеевым [Л. 4 и 5], по-
ложено определение удельного расхода энергии
в зависимости от объема снятой стружки. Для
расчета удельной нормы на деталь по этому ме-
тоду из технологических данных достаточно знать
характеристику обрабатываемого металла, вес
заготовки и готовой детали со средними допуска-
ми, а также примерный объем металла, снимае-
мого шлифованием. Последний вариант метода
[Л. 6] дает возможность определить среднюю
удельную полезную работу сразу по детали в
целом, не прибегая к определению ее по отдель-
ным операциям. Объемный метод нормирования
заслуживает серьезного внимания. Массовая про-
верка этого метода на предприятиях позволит
уточнить и еще более упростить его.

Опытная проверка метода С. А. Пресс и объ-
емного метода на двух деталях показала, что
расчет по второму методу дал отклонение на
3,5% по сравнению с фактическим расходом
энергии, а по первому — на +31%. Это под-
тверждает преимущество объемного метода.

В тех случаях, когда номенклатура деталей, вы-
пускаемых механическим цехом, разнообразна и
неустойчива, применение расчетных методов нор-
мирования становится практически невозмож-
ным. В этих случаях для определения нормы на
деталь необходимо предварительно установить

норму удельного расхода электроэнергии на станко-час.

Метод нормированных станко-часов дает И. В. Гофман [Л. 7] с учетом возможного увеличения загрузки станка и снижения потерь. Установив при помощи этого метода средний удельный расход энергии на станко-час, нетрудно на основании технологических карт получить удельную норму и на каждую деталь. При очень обширном ассортименте деталей нормирование может быть упрощено путем разбивки всех деталей на однородные классы. Удельная норма устанавливается на среднюю для данного класса деталь.

С. А. Ринкевич [Л. 8] предлагает устанавливать норму на станко-киловаттчас, понимая под последним произведение машинного времени T_m соответствующей операции на номинальную мощность двигателей P_n , установленных на станке. Этот метод в том виде, в каком он предлагается С. А. Ринкевичем, для прогрессивного нормирования непригоден, так как по существу является методом статистическим, узаконивающим все недочеты производственного процесса.

Чтобы применить метод станко-киловаттчасов для целей прогрессивного нормирования, И. И. Иванов [Л. 9] предлагает принять за единицу нормирования станко-час. Снижение потерь в станке и рост производительности труда станочников учитываются путем введения соответствующих коэффициентов.

Однако в принципе правильные поправки И. И. Иванова к методу С. А. Ринкевича практически весьма осложняют дело, так как определение поправочных коэффициентов, по крайней мере в отношении потерь, нужно будет выполнять по каждому станку. Это лишает метод простоты и делает его крайне громоздким. Если при нормировании не переходить от станко-часа к детали в целом, то введение поправки на рост производительности труда в предложенном виде приводит к противоречию: с ростом производительности удельный расход на станко-час будет возрастать, тогда как фактический удельный расход на деталь будет снижаться. Все это показывает, что предлагаемая И. И. Ивановым методика нуждается в серьезной доработке.

Выводы. 1. Вопрос о создании несложного и достаточно точного метода нормирования расхода электроэнергии на обработку металлов резанием считать решенным еще нельзя.

2. При массовом и серийном производстве должен применяться объемный метод, предложенный А. Л. Матвеевым, после проверки в широком масштабе в производственных условиях и соответствующего уточнения и доработки.

3. Для цехов с разнообразной номенклатурой выпускаемых изделий (ремонтные, инструментальные цехи и т. п.) впредь до разработки более совершенного метода надо считать наиболее приемлемым метод нормированных станко-часов, также после соответствующей проверки в предприятиях и внесения необходимых уточнений и поправок.

4. Необходимо обратить серьезное внимание на разработку вопроса об удельном расходе энергии на неустановившиеся режимы (пусковые) и на электрифицированные операции (подача смазки и охлаждающих эмульсий, движение суппортов и т. д.). В рассмотренных расчетных методах нормирования эти расходы или совсем не учитываются, или учитываются недостаточно.

Литература

1. С. А. Пресс. Нормирование электроэнергии потребляемой металлорежущими станками. Электричество, № 1—2, 1944.
2. С. А. Пресс. О нормировании расхода электрической энергии для металлорежущих станков. Промышленная энергетика, № 3, 1945.
3. Л. В. Литвак. Нормирование удельного расхода электроэнергии в механических металлообрабатывающих цехах (массового и серийного производства). Обработка металлов, № 1, 1944.
4. А. Л. Матвеев. Объемный метод нормирования удельного расхода электроэнергии при поточно-массовом производстве. Электричество, № 3, 1944.
5. А. Л. Матвеев. Приближенный объемный метод нормирования электропотребления на металлорежущих станках. Промышленная энергетика, № 4, 1944.
6. А. Л. Матвеев. О технически обоснованном нормировании расхода электроэнергии на металлообрабатывающих предприятиях. Промышленная энергетика, № 1, 1949.
7. И. В. Гофман. Основы нормирования и учета энергопотребления в промышленности. Лениздат, 1948.
8. С. А. Ринкевич. Об удельном потреблении электроэнергии металлорежущими станками на машиностроительных заводах. Сборник информационных материалов энергосбыта Ленэнерго, Вып. 3, 1948.
9. И. И. Иванов. К вопросу о нормировании расходов электроэнергии в механических цехах машиностроительной промышленности. Промышленная энергетика, № 4, 1950.



Восьмой Всероссийский электротехнический съезд

К 30-летию обращения В. И. Ленина к 8-му съезду

1 по 9 октября 1921 г. в Москве, в одной из обширнейших аудиторий Политехнического музея работал Всероссийский электротехнический съезд, созданный по инициативе¹, при содействии и под руководством² Председателя Совета Народных Комиссаров В. Ульянова (Ленина), во исполнение резолюции VIII Съезда Советов³, для всестороннего обсуждения технико-экономических вопросов, связанных с осуществлением плана электрификации России, а также привлечения широких народных масс к активному участию в деле электрификации народного хозяйства.

На электротехническом съезде были представлены 102 делегата, в работах приняли участие 893 делегата и, кроме того, около 500 гостей. Свыше 30% общего числа делегатов составляли практические инженерно-технические работники. Значительное число составляли научные деятели и — впервые в истории электротехнических съездов — рабочие предприятия.

На 8-м съезде были впервые созданы новые секции: технико-экономическая и пропаганды электротехнических знаний⁴. Из общего количества докладов (218) научно-технической секции заслушала 124 доклада, технико-экономическая секция — 29 и секция пропаганды — 19 докладов. Основная тема докладов — это работы Государственной комиссии по электрификации России, вопросы, связанные с планом электрификации с единым общегосударственным хозяйственным планом, вопросы организации электропромышленности и электростроительства, связи электрификации транспорта, электрической промышленности и радиосвязи и вопросы электротехнического образования и пропаганды электротехнических знаний в широких массах населения.

Председателем Оргкомитета съезда при Президиуме был Г. М. Кржижановский, а руководителями секций технико-экономической — И. Г. Александров и др., технической — М. А. Шателен и М. К. Поливанов, пропаганды электротехнических знаний — К. А. Круг, Шателен и др.

В день открытия съезда 1 октября 1921 г., под бурные аплодисменты всех присутствующих Владимир Ильич был единодушно избран почетным председателем «ввиду тех неопенимых услуг, которые оказываются отцом Совнаркомом В. И. Лениным-Ульяновым, и той особой горячей поддержки, которую имела Государственная комиссия по электрификации и все работы «техники»⁵. Съезд постановил довести до сведения народа Ильича, что он приглашается Почетным Председателем Съезда⁶.

В. И. Ленин не смог лично участвовать в работах съезда. В 8 октября 1921 г. обратился в Президиум съезда почетным письмом, которое было оглашено на заседании 9 октября 1921 г.⁷ и напечатано в Бюллетене съезда, вып. 3.

Президиум VIII Всероссийского электротехнического

Крайне сожалею, что мне не удалось лично приветствовать съезд.

О значении книги «План электрификации» и еще более самой электрификации мне доводилось высказываться не раз. Крупная машинная промышленность и перенесение ее в земледелие есть единственная экономическая база социализма, единственная база для успешной борьбы за избавление человечества от ига капитала, от избиения и калечения десятков миллионов людей для решения вопроса, будет ли иметь перевес в разделе земли хищник английский или немецкий, японский или американский и т. п.

Рабоче-крестьянская советская республика начала систематическую и планомерную электрификацию нашей страны. Как ни скучно, как ни скромно наше начало, как ни невероятно велики трудности этого дела для страны, которую разорили помещики и капиталисты 4-х летней империалистической и 3-х летней гражданской войной. Для страны, которую подкарауливает буржуазия всего мира, желая раздавить ее и превратить в свою колонию, как ни мучительно медленно идет вперед электрификация у нас, а все же она идет вперед. При помощи вашего съезда, при помощи всех электротехников России и ряда лучших, передовых ученых сил всего мира, при героических усилиях авангарда рабочих и трудящихся крестьян мы эту задачу осилим, мы электрификацию нашей страны создадим.

Приветствую VIII Всероссийский съезд электротехников и желаю ему всяческого успеха в его работах.

Председатель Совета Народных Комиссаров

В. Ульянов (Ленин)⁸

Как видно из этого письма, Ленин придавал большое значение съезду для мобилизации общественного мнения вокруг задач электрификации страны. Подписывая 8 февраля 1921 г. постановление Совнаркома о созыве электротехнического съезда, Владимир Ильич рассчитывал, что обсуждение на таком широком и представительном съезде электриков научно-технических и технико-экономических вопросов и перспектив электрификации поможет быстрому и правильному разъяснению величайшего значения плана ГОЭЛРО для восстановления и развития народного хозяйства Советского государства, привлечет широкие народные массы на сторону плана ГОЭЛРО и окажет существенное влияние на успешную его реализацию. Следует напомнить, что изданный в декабре 1920 г. сборник «План электрификации РСФСР. Доклад 8-му съезду Советов Государственной комиссии по электрификации» подвергался злостным и издевательским нападкам со стороны правых оппортунистов, троцкистов и прочих враждебных элементов. Ленин и Сталин вели напряженную и непримиримую борьбу с врагами плана ГОЭЛРО. После исторического доклада на VIII Съезде Советов (22 декабря 1920 г.), в котором была провозглашена знаменитая ленинская формула «Коммунизм — это

¹ Постановление СНК от 8 февраля 1921 г. «О жизни и деятельности В. И. Ленина». Соч., 4-е изд., т. 43.

² В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 27—28.

³ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 27—28.

⁴ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 27—28.

⁵ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 27—28.

⁶ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 27—28.

есть советская власть плюс электрификация всей страны», Ленин затем неоднократно возвращался к вопросам плана ГОЭЛРО.

21 февраля 1921 г. Ленин писал («Правда» от 22 февраля 1921 г.):

«Единственно серьезная работа по вопросу об едином хозяйственном плане есть «План электрификации РСФСР», доклад VIII съезду Советов от «Гозлро» (Государственная комиссия по электрификации России), изданный в декабре 1920 г. и розданный на VIII съезде. В этой книге изложен единый хозяйственный план, который разработан — разумеется, лишь в порядке первого приближения — лучшими учеными силами нашей республики по поручению высших ее органов»⁹.

«Результатом работ «Гозлро» явился названный выше обширный — и превосходный — научный труд. В нем участвовало свыше 180 сотрудников — специалистов»¹⁰.

«Чтобы оценить всю громадность и всю ценность труда, совершенного «Гозлро», бросим взгляд на Германию. Там аналогичную работу проделал один ученый Баллод. Он составил научный план социалистической перестройки всего народного хозяйства Германии. В капиталистической Германии план повис в воздухе, остался литературщиной, работой одиночки»¹¹.

«Никакого другого единого хозяйственного плана, кроме выработанного уже «Гозлро», нет и быть не может. Его надо дополнить, развивать дальше, исправлять и применять к жизни на основании указаний практического опыта, внимательно изучаемого»¹².

Спустя несколько дней И. В. Сталин написал замечательное по своей практической целеустремленности и политической ясности письмо В. И. Ленину, неоднократно цитировавшееся в литературе, — письмо, в котором товарищ Сталин дал высокую оценку сборнику «План электрификации России».

«Превосходная, хорошо составленная книга. Мастерский набросок действительно единого и действительно государственного хозяйственного плана без ковычек»¹³.

Подвергнув в этом письме уничтожающей критике дававшиеся до ГОЭЛРО убогие, кустарные попытки «планирования», а также маниловскую «критику» плана ГОЭЛРО со стороны рутинеров и обывателей, товарищ Сталин начертал, ставшие знаменитыми, пять коротких пунктов очередных практических мероприятий для немедленного приступа к реализации плана ГОЭЛРО.

В месяцы, предшествовавшие открытию 8-го Всероссийского электротехнического съезда, Владимир Ильич Ленин неоднократно обращался к роли электрификации и к вопросам, связанным с планом ГОЭЛРО. 21 мая 1921 г. Владимир Ильич написал обстоятельный «Наказ от СТО (Совета Труда и Оборона) местным советским учреждениям»¹⁴. Наказ был внесен Лениным на обсуждение III сессии ВЦИК 30 мая 1921 г. При обсуждении проекта «Наказа» Ленин выступил с речью. Сессия ВЦИК, приняв «Наказ», передала его на утверждение Президиума ВЦИК. 30 июня 1921 г. «Наказ» был утвержден¹⁵. В Наказе (изданном в 1921 г. также отдельной брошюрой) Ленин записал:

«Первоочередной задачей Советской республики является восстановление производительных сил, подъем сельского хозяйства, промышленности и транспорта»¹⁶.

Далее Ленин характеризует и связывает «практическое мерило успехов нашего хозяйственного строительства в общегосударственном масштабе», во-первых, с успехом реализации продовольственного налога и, во-вторых, — «и это особенно важно», с успехом оборота между земледелием и промышленностью.

«Это, — пишет Ленин, — самое насущное, немедленно и во что бы то ни стало необходимое. Это — проверка всей работы и закладка фундамента для осуществления

великого плана электрификации, которая даст нам становление крупной промышленности и транспорта тех размерах и на такой технической основе, чтобы чательно и навсегда победить голод и нищету»¹⁷.

Остановившись в «Третьей группе вопросов» каза на электрификации (п. 24-й. Электрификацию Ленин выдвигал следующие актуальные вопросы.

«Есть ли в местной губернской и уездной библиотеке «План электрификации РСФСР», доклад VIII съезда Советов?.. (на VIII съезде Советов были розданы 1 200 экземпляров для местных библиотек).

Какие меры приняты во исполнение постановки VIII съезда Советов о широкой пропаганде плана электрификации? Сколько статей в местных газетах об электрификации? Сколько докладов? Число слушателей на них?

Мобилизованы ли для таких докладов и для давания все местные работники, обладающие теоретическими или практическими знаниями об электричестве? Сколько таких работников? Как ведется их работа? пользуются ли для лекций и занятий местные или больше электрические станции? Число их?

В скольких учебных заведениях введено, по решению VIII съезда Советов, преподавание плана электрификации?

Сделано ли что-либо практическое и что именно для осуществления этого плана? или вне плана съезда работ по электрификации?

Есть ли местный план и очередь работ по электрификации?»¹⁸.

Подробно, не пренебрегая, казалось бы, «мелочами», Ленин настойчиво внедрял в сознание местных советских работников значение самого пристального и оперативного отношения к мероприятиям по пропаганде и реализации плана ГОЭЛРО.

Через несколько дней в письме от 5 июня 1921 г. Владимир Ильич проявляет заботу о том, чтобы съездом электрификации были ознакомлены члены II конгресса Коммунистического Интернационала.

В течение августа — декабря 1921 г. Лениным были распоряжения ВСНХ, Наркомпути, Наркоминдел и другим наркоматам об обеспечении строительства ширской и Волховской электростанций рабочей и всеми необходимыми материалами²⁰.

Наряду с практической помощью строительству объектов электрификации Ленин следил за деятельностью Оргкомитета по созыву электротехнического съезда, содействуя работе комитета руководящими указаниями и советами²¹.

Примерно за месяц до открытия 8-го Всероссийского электротехнического съезда (28 августа 1921 г.) товарищ Сталин в своей статье в «Правде» «Партия и взятие власти»²², формулируя задачи партии в России, как партии мирной строительной работы, звал на постепенную электрификацию сельского хозяйства, как на один из необходимых факторов для укрепления союза пролетариата и трудового крестьянства, электрификацию транспорта, крупной промышленности как на один из необходимых факторов для индустриализации страны.

Так, систематически Ленин и Сталин указывали на электрификацию, как на важнейшее средство преодоления разрухи, восстановления хозяйства и дальнейшего развития страны по социалистическому пути.

Съезд открылся, как уже отмечалось выше, 1 октября. На пленарном заседании 2 октября был заслушан подготовленный Г. М. Кржижановским по поручению Ленина обстоятельный доклад «О работах Государственной комиссии по электрификации России». Докладчик черкнул, что партий и правительством на съезде была поставлена задача исключительной важности и ответственности — критически рассмотреть и обсудить работы и предложения комиссии ГОЭЛРО, отбросив в сторону все голословные и враждебные нападки на план маломасштабной электрификации и шептунов как справа

⁹ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 32, стр. 114—115.

¹⁰ Там же, стр. 116.

¹¹ Там же, стр. 117. Об упомянутом Лениным Баллоде см. примечание ИМЭЛ, № 301 в т. 35 (стр. 510): «Ленин имеет в виду книгу Карла Баллода «Государство будущего». В русском переводе книга была издана в 1920 году. О книге К. Баллода Ленин говорит в статье «Об едином хозяйственном плане»».

¹² Там же, стр. 120.

¹³ И. В. Сталин. Соч., т. 5, стр. 50—51.

¹⁴ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 32, стр. 353—376.

¹⁵ Там же, примечание ИМЭЛ, № 25.

¹⁶ Там же, стр. 353.

¹⁷ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 32, стр. 354.

¹⁸ Там же, стр. 373—374.

¹⁹ Там же, т. 35, стр. 431.

²⁰ Там же, т. 33, стр. 483.

²¹ Там же, стр. 483.

²² И. В. Сталин. Соч., т. 5, стр. 111—112.

А переписи.

8²² W. R. Thompson. Agda

Крайне сожалею, что мне не удалось было
 издать этого свода. В частности книги "Мно-
 гостраничники" и еще более важно
 многостраничники мне доверено выдать.
 Это не раз крупная материальная помощь.
 Книжки и журналы с благодарностью
 от одиозной экономической базе
 социализма, (Однородная база для всех - Грехов)
 государства, от ученых и казенных учреждений
 и многих людей для решения вопроса,
 чтобы и мы первые в области науки
 и техники. А именно: в области науки, ин-
 ститута-кредитная система, решение
 и как таковая система, которая и
 мероприятия многостраничники как и
 др.

и слева. В докладе была заострена перед членами съезда необходимость тщательного обсуждения, в частности, вопроса о планировании топливных ресурсов и вопроса об экономическом районировании России и было выражено убеждение, что намеченная в плане ГОЭЛРО программа электрификации России будет осуществлена, при условии поддержки плана всем трудовым народом, менее чем в 10-летний срок²³.

На следующих пленарных заседаниях выступили: акад. А. Ф. Иоффе с докладом «Строение материи», в котором была рассмотрена также природа электрических явлений и были разоблачены идеалистические взгляды буржуазных физиков, отрицавших материальную сущность электричества; проф. В. Ф. Миткевич с близким этой теме докладом «О природе электрического тока», в котором была исследована связь электричества и магнетизма и было высказано соображение об идентичности электрона — атома электричества и сократившегося до предельно малых размеров «магнитного звена»²⁴; проф. А. А. Горев с докладом «Новые проекты электрификации в Северной Америке»; проф. М. В. Шулейкин — «Развитие радиотелеграфии и радиотелефонии»; проф. А. А. Петровский — «Радиоассоциация и перспективы будущего»; проф. М. А. Шателен с докладами «Центральный электротехнический совет за три года его существования» и «Задачи стандартизации в области электротехники и международные нормы»; проф. В. К. Лебединский с докладом «Ожидания в науке и технике», в котором перед учеными, инженерами и изобретателями России была выдвинута задача — всемерно способствовать наилучшему осуществлению плана электрификации и практическими применениями своего творчества открывать новые возможности и пути для прогресса.

К обсуждению на секциях съезда Оргкомитетом был намечен большой список докладов²⁵. Наряду с организационными вопросами электрохозяйства страны проектировались доклады по технико-экономическим вопросам, в их числе: А. В. Вульфа об электрификации русских железных дорог, М. А. Шателена об электрификации нефтяной промышленности и др. Особое внимание уделялось научно-техническим темам, на которые готовились доклады: В. К. Аркадьева о вибрации элементарных магнитов, Б. А. Введенского о радиоизмерениях и о проникаемости железа в полях радиочастот, А. А. Чернышева о пустотных приборах, М. В. Шулейкина о защите от перенапряжений, В. Ф. Миткевича о нормах напряжений, А. А. Горева о технике высоких напряжений и о высоковольтных изоляторах, Г. О. Графтио об электрификации транспорта, А. В. Вульфа о системе тока на русских железных дорогах и о технических условиях для электропоездов, К. И. Шенфера о достижениях в области турбогенераторостроения и трансформаторостроения, В. А. Толвинского о достижениях в области электромашии, А. А. Воронова о генераторах и трансформаторах, И. В. Егнзарова о гидроэлектростанциях, В. С. Кулебакина о применении электроэнергии в горном деле, В. И. Полонского о системах гребных электроприводов, А. А. Смурова о нормах механического расчета линий электропередачи, М. А. Шателена о задачах осветительной техники и много других докладов (о гидроторфе, об электросварке, об электрической вспашке, по вопросам теплотехники, по вопросам среднего и высшего электротехнического образования и пр.).

Некоторые из намечавшихся Оргкомитетом докладов не были подготовлены во-время, но зато был представлен ряд докладов сверх программы²⁶. Из их числа можно назвать интересный инженерный доклад С. Я. Жука о судостроении на р. Свири и об ее шлюзовании, М. А. Шателена о кооперации высших школ с заводами и строительными в деле подготовки инженеров, А. А. Петровского о применении радио к определению местоположения, А. А. Чернышева о катодных реле большой мощности и об осциллографе для токов высокой частоты, В. А. Толвинского об использовании энергии ветра, М. П. Ко-

стенко о получении переменных частот от коллекторного альтернатора и др.

Делегаты съезда активно участвовали в обмене мнениями по заслушанным докладам. В резолюциях съезда даны не только общие оценки каждого доклада, но и содержатся также поправки и дополнения к отдельным докладам.

Резолюции съезда состоят из нескольких разделов. В первом разделе «По общему плану электрификации РСФСР» записано, в частности, следующее.

«а) План электрификации Государственной комиссии по электрификации России, объединившей для разработки лучшие научные и технические силы страны, в своем целом является правильной схемой, по которой должно строиться Государственное плановое хозяйство. Съезд, придавая особое значение развитию добывающей промышленности, признает что предложенную ГОЭЛРО сеть районных станций следует рассматривать, как основную.

б) Дальнейшее развитие этого плана, который не следует считать жестким ни в смысле очередности, ни в смысле срока его выполнения, так как это всецело зависит от реальных условий внутренних и международных, должно проводиться с привлечением местных экономических и органов».

Резолюция по докладам в технико-экономической части состоит из решений, посвященных электрификации отдельных районов: Юга (п. 2), Северо-Западного района (п. 3), Уральского района (п. 4), Сибири (п. 5), Туземного населения (п. 6), Юго-Востока (п. 7), а также вопросы снабжения деревни электрической энергией (п. 8), заготовки русской металлопромышленности в связи с заготовкой наметенной электрификации страны (п. 9), вопроса электрификации железных дорог (п. 10), поднятия нефтяной промышленности путем ее электрификации (п. 11) и т. д.

Съезд уполномочил Оргкомитет разработать положение о Постоянном комитете Всероссийских электротехнических съездов.

Работы съезда получили широкий отклик. Об электротехническом съезде писали центральные и местные газеты. Сотни делегатов, разбегавшихся по окончании съезда на места, информировали инженерно-техническую общественность предприятий, железных дорог, связи, высших школ и пр. об обращении вождей Революции Главноуправляющего Советского правительства В. И. Ленина к съезду, о докладах на съезде, о решениях съезда, о значении электрификации страны, о роли электрификации всей советской страны для социалистического строительства.

Владимир Ильич Ленин весьма одобрительно отзывался о результатах деятельности 8-го Всероссийского электротехнического съезда. Выступая в следующем месяце (в декабре 1921 г.) на IX Всероссийском съезде Советов, В. И. Ленин сообщил верховному органу страны, что электротехнический съезд «дал серьезнейший и богатейший материал, проверку лучшими техническими и научными силами России того плана, который является единственно научно-проверенным, кратчайшим и ближайшим планом для восстановления нашей крупной промышленности, требующим для выполнения не менее 10—15 лет».

Известно, что осуществление плана ГОЭЛРО, проводившееся в основном уже после смерти Ленина, под руководством великого продолжателя дела Ленина — Иосифа Виссарионовича Сталина, было закончено значительно ранее этого срока. За истекшие 30 лет развитие электрификации Советского Союза двинулось вперед гигантскими темпами. Исполнилось предсказание Ленина о роли электрификации в строительстве социалистического и коммунистического общества в СССР. По инициативе и под руководством товарища Сталина в стране вернулось строительство величайших гидроэлектростанций.

В истории осуществления ленинско-сталинского плана электрификации — 8-й Всероссийский электротехнический съезд, созданный по указанию В. И. Ленина, занимает одно из видных мест.

²³ Труды 8-го Всероссийского электротехнического съезда, вып. I, там же, стр. 169.

²⁴ Бюллетень № 1 Оргкомитета 8-го Всероссийского электротехнического съезда, ГОНТИ ВСНХ, 1921.

²⁵ Бюллетень № 2, то же издание.

²⁷ Труды VIII Всероссийского электротехнического съезда, вып. стр. 163—191.

²⁸ В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 139.

Испытания электроплуга в 1921 г.

К 30-летию посещения В. И. Лениным учебно-опытного хозяйства МВЗИ

22 октября 1921 г. Владимир Ильич Ленин присутствовал при испытаниях электроплуга в учебно-опытном хозяйстве Московского высшего зоотехнического института (тырский хутор)¹.

Задолго до Великой Октябрьской социалистической революции В. И. Ленин придавал особое значение применению электроэнергии в сельском хозяйстве. В работе рарыный вопрос и «критики Маркса», направленной тив ревизионистов, «критиков» марксистской теории ирного вопроса, и написанной в июне — сентябре 1 г.² В. И. Ленин писал:

«Электрическая энергия дешевле паровой силы, она ичается большей делимостью, ее гораздо легче перепать на очень большие расстояния, ход машин при этом вильнее и спокойнее, — она гораздо удобнее, поэтому именяется и к молотье, и к паханию, и к дозною, и к корма скоту* и проч.».

И далее: «Мы не будем распространяться о том, кагигантскую победу крупного производства будет озать (отчасти означает уже) введение электротехники иземледелие, — это обстоятельство слишком очевидно, ина нем настаивать».³

Это было написано В. И. Лениным полвека назад. икает глубина предвидения Лениным перспектив ипуразвития сельского хозяйства в нашей стране.

В. И. Ленин внимательно следил за развитием вопроэлектрификации земледелия. От его пристального ада не ускользнул даже такой факт, как доклад А. Ржевского на II Электротехническом съезде на «Электричество в сельском хозяйстве». В своей ра«Развитие капитализма в России» В. И. Ленин отмеэтот доклад.

После Великой Октябрьской социалистической ревои В. И. Ленин много раз возвращался к вопросу ификации сельского хозяйства в целом и земледее в частности. Он видел в электрификации одно из их средств ликвидации противоположности между юм и деревней — необходимое условие построения унизма.

Общаясь к молодежи, В. И. Ленин говорил на III ссийском съезде РКСМ 2 октября 1920 г.:

Мы знаем, что коммунистического общества нельзя ить, если не возродить промышленность и земле, причём надо возродить их не по-старому. Надо ить их на современной, по последнему слову науки иенной, основе. Вы знаете, что этой основой является ичество, что только, когда произойдет электрифи- всей страны, всех отраслей промышленности и зем- я, когда вы эту задачу освоите, только тогда вы ебя сможете построить то коммунистическое обще- которого не сможет построить старое поколение. а вами стоит задача хозяйственного возрождения страны, реорганизация, восстановление и земледее промышленности на современной технической ос- которая покоится на современной науке, технике, иричестве».⁴

В своем докладе на VIII Всероссийском съезде Совет- И Ленин так охарактеризовал значение электри-

из плана электрификации мы перейти к действи- у строительству не можем.

аждый, внимательно наблюдавший за жизнью де- в сравнении с жизнью города, знает, что мы кор- итализма не вырвали и фундамент, основу, у внут- врага не подорвали. Последний держится на мел- рязьстве и чтобы подорвать его, есть одно сред- иперевести хозяйство страны, в том числе и земле- на новую техническую базу, на техническую базу

современного крупного производства. Такой базой является только электричество.

Коммунизм — это есть Советская власть плюс элек- трификация всей страны»⁵.

Живо интересуясь практическим ходом развития сель- ской электрификации, В. И. Ленин присутствует 14 но- ября 1920 г.⁶ на открытии электрической станции в де- ревне Кашино Волоколамского уезда, Московской губер- нии; беседует с крестьянами, выступает с речью о зна- чении электрификации в народном хозяйстве; вечером выступает на собрании крестьян в помещении народного дсма в селе Ярополец. Вспоминая об этом посещении, В. И. Ленин на VIII Всероссийском съезде Советов го- ворил:

«Мне пришлось не очень давно быть на одном кре- стьянском празднике в отдаленной местности Московской губернии, в Волоколамском уезде, где у крестьян имеется электрическое освещение.⁹⁹ На улице был устроен митинг, и вот один из крестьян вышел и стал говорить речь, в которой он приветствовал это новое событие в жизни крестьян. Он говорил, что мы, крестьяне, были темпы, и вот теперь у нас появился свет, «неестественный свет, который будет освещать нашу крестьянскую темноту». Я лично не удивился этим словам. Конечно, для беспар- тийной крестьянской массы электрический свет есть свет «неестественный», но для нас неестественно то, что сотни, тысячи лет могли жить крестьяне и рабочие в такой тем- ноте, в нищете, в угнетении у помещиков и капиталистов. Из этой темноты скоро не выскочишь. Но нам надо добиться в настоящий момент, чтобы каждая электриче- ская станция, построенная нами, превращалась действи- тельно в опору просвещения, чтобы она занималась, так сказать, электрическим образованием масс.

...если Россия покроется густою сетью электрических стан- ций и мощных технических оборудований, то наше ком- мунистическое хозяйственное строительство станет образ- цом для грядущей социалистической Европы и Азии»⁷.

С особым интересом Владимир Ильич Ленин следил за развитием электропахоты и много раз лично давал указания об ускорении изготовления опытных электро- плугов. Так, например, в телеграмме петроградским орга- низациям 27 мая 1921 г. он писал: «Ввиду жалобы со стороны тов. Михайлова на невыдачу продпремий рабо- чим Электроплуг, предлагаю вопрос срочно урегулировать и согласовать, имея в виду важность изготовления двад- цати электроплугов для осенней вспашки. Ответьте совер- шенно точно. [497].

Председатель Совтрудобороны Ленин»⁸.

В Ленинском сборнике от редакции указано, что текст телеграммы написан на пишущей машинке за исключением слов «ответьте совершенно точно. Ленин», приписанных Лениным.

С особым вниманием Владимир Ильич отнесся к письму председателя Петроградского Совнархоза Ми- хайлова, о первом выпущенном электроплуге.

В приводимом ниже письме Михайлова указаны все личные подчеркивания Владимира Ильича.

«[27 сентября 1921]

Дорогой Владимир Ильич!

Сегодня, 23 сентября, мы на большом участке земли испытали наш первый, выпущенный в дело, электроплуг.

Со всех сторон я слышал по его адресу комплименты, прибавлю заслуженные, так как пашет он, я сказал бы,

1. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 33, стр. 485.

2. Там же, т. 5, стр. 522.

3. Там же, стр. 126—127.

4. Там же, т. 31, стр. 264.

5. В. И. Ленин. Соч., 4-е изд., т. 31, стр. 482—484.

6. Там же, стр. 536.

7. Там же, стр. 480—486.

8. Ленинский сборник, XX, стр. 225.

с элегантною легкостью, одну десятину в час и будет пахать в тот же один час еще и больше.

Приблизительно два года тому назад родилась в моей голове элементарная мысль эмансипировать петроградское население от привозных овощей, а наши железные дороги избавить от транспортирования в Петроград, к стыду нашей прекрасной Невы, тысячами вагонов воды: воды потому, что она равняется 80% содержимого овощей... Я стоял на своем, результатом чего получилась огородная площадь в 9 000 с чем-то десятин в самом Петрограде, обеспечивающих на круг, включая и детское население, всякого жителя Петрограда на 6—7 месяцев овощами, считая по 2 пуда на человека.

Но почему не пойти дальше, почему не создать вокруг больших центров свои сельские хозяйства, уменьшающие зависимость города от деревни, сказал я себе. Псему не поднять лежащие вокруг городов пустыри, не вспахать эту целину? И убедившись, что кабельная сеть Петрограда дает возможность, не в ущерб ее основной работе, вспахивать электрическим током пару десятков тысяч десятин земли под полевую культуру, я объявил конкурс на «электропflug».

После долгих физических и нравственных мучений этот пflug создан. Не стану утомлять Вас арифметическими подсчетами, дающими этому пflugу великолепную аттестацию. Знаю, что это не последнее слово техники, и первый буду стоять на том, чтобы его дальнейшее изготовление приостановить, когда над ним одержит верх новая, более удачная, выдумка, а пока надо пустить все в ход, чтобы к ранней весне 1922 года было сделано ну хотя бы 20 комплектов этой машины. Машины не сложной, но дающей большие возможности Екатеринбург, Самаре, Харькову, Москве и т. д.

Это сделать можете только Вы»⁹.

Владимир Ильич, прочтя письмо, дал распоряжение об оказании автору письма полного содействия в изготовлении электропflugов.

В те годы единственным техническим средством механической обработки земли была так называемая лебедочная система канатной тяги, работающая с балансирным пflugом. Выполненные в 1921 г. электропахотные агрегаты на Ленинградском металлическом заводе представляли собой сложное устройство. Каждая из двух лебедок в агрегате весила по 15 т. Вес балансирного плуга около 6 т, мощность электродвигателя на каждой лебедке составляла 55 квт при рабочем напряжении в 2 000 в.

Присутствуя при испытании электроплуга на Бутырском хуторе 22 октября 1921 г., Владимир Ильич Ленин, по свидетельству очевидцев, очень долго и внимательно наблюдал за работой электропflugов, затем беседовал с рабочими совхоза, с инженерами и высказывал мысль о необходимости продолжения экспериментальных работ по электропахоте.

После этого в течение ряда лет в СССР велись широкие экспериментальные работы по электропахоте. Лебедочная система канатной тяги была признана по техническим и агротехническим условиям неприемлемой и советскими конструкторами была разработана новая машина — электрический трактор.

К весне 1949 г. по указанию товарища Сталина была изготовлена опытная партия электрических тракторов в количестве 30 агрегатов конструкции Энергетического института Академии наук СССР и Всесоюзного института электрификации сельского хозяйства.

Испытания и хозяйственная эксплуатация электрических тракторов опытной партии проводились в 1949 и 1950 гг. в МТС, расположенных в различных географических зонах (Украина, Урал, Средняя Азия, Северный

Кавказ, Подмоскowie), с различными почвенно-климатическими условиями, рельефом, направлением хозяйственных и различных условий электроснабжения.

Разнообразие условий, при которых работали электропflugи, позволили судить о применимости машин в различных зонах СССР.

Основные итоги работы электропflugов в 1949 и 1950 гг. сводятся к следующему. Электропflugи работали на полях 36 колхозов до 20 различных по направлению и характеру полевых сельскохозяйственных работ. Выполнялись такие работы: весновспашка с однократным боронованием, вспашка и боронование ранних посевов озимых, вспашка под озимь, подъем и посев озимых, вспашка под ярь, раскорчевка пней, вспашка кустарников и обмолот хлебов. Из общего объема выполненных работ 85% должно быть отнесено к полевым работам.

Всего 30 электропflugными агрегатами за 1949 и 1950 гг. сделано в поле 45 000 га.

Выполненный объем работ говорит о работоспособности электрического трактора и возможности решения проблемы электрификации полеводства на базе электрических тракторов.

Средний расход электроэнергии на вспашку составил 45 квт.

При длине питающего кабеля 800 м и при малой длине борозды 1,5 км электропflugи от одного присоединения подстанции к линии обрабатывали от 60 до 100 га в зависимости от длины гона.

Электрические тракторы конструкции ЭТ-59 ВИАХ показали в работе хорошие тяговые свойства, надежность работы тягового электродвигателя, простоту технического обслуживания, легкость пуска, экономичность и рабочей силы из-за отсутствия заправки горючим и водой. По этим показателям электрические тракторы стоят выше современных тепловых тракторов.

Два свойства электропflugа — повышенное тяговое усилие и сохранение постоянной скорости движения обеспечивают высокое качество пахотных работ.

Наряду с отмеченными положительными свойствами при испытаниях электропflugов необходимо подчеркнуть, что в современной конструкции электропflugа и организации его эксплуатации имеются еще существенные недостатки, над устранением которых продолжается работа в настоящее время.

В 1950 и 1951 гг. масштаб применения электропflugов значительно расширился. Введены в эксплуатацию электропflugи еще в трех МТС. Введены также в эксплуатацию специальные протаскивающие колесные электропflugи.

Народнохозяйственное значение электрификации полеводства может быть охарактеризовано следующими основными выводами.

1. Внедрение электрического трактора может в значительной мере ликвидировать сезонность в использовании тракторного парка. Как известно, современные тепловые тракторы имеют относительно короткие межремонтные периоды работы, главным образом вследствие прогрессирующей потери мощности, определяемой продолжительностью эксплуатации трактора. Продолжительность эксплуатации электропflugного двигателя без снижения мощности капитального ремонта измеряется десятками тысяч часов против нескольких тысяч часов эксплуатации трактора с двигателем внутреннего сгорания. Вместе с ликвидацией сезонности в использовании тракторного парка более равномерное и в течение года могут быть использованы в сельскохозяйственном производстве и трудовые ресурсы колхозов.

2. Внедрение электрического трактора может в значительной мере ликвидировать существующий разрыв между мобильной полевой и стационарной энергетикой. Электрический трактор, в отличие от теплового, может быть рационально использован помимо полевых работ и для стационарных нужд сельского хозяйства. Это даст возможность осуществить комплексную электрификацию сельского хозяйства с минимальными затратами и с максимальным эффектом.

3. Внедрение электрического трактора радикально решает проблему дефицита дальнопривозного топлива и снижает затраты на приобретение местного топлива.

⁹ Ленинский сборник, XXIII, стр. 10—11.

4. Внедрение электрического трактора обеспечивает экономию труда в тракторных и ремонтных бригадах.

5. Электрический трактор создает предпосылку для реконструкции и создания системы сельскохозяйственных машин на основе внедрения индивидуального и одвигательного электропривода, по аналогии с современной тенденцией в электрификации рабочих машин промышленности (самоходные многомоторные электрические комбайны, многомоторные тракторные электрифицированные косилки, дождевательные машины и т. д.).

В исторических постановлениях правительства о величине предусматривается широкая электрификация

земледелия. К моменту ввода в действие Куйбышевской, Сталинградской, Каховской и Цимлянкой гЭС электрические тракторы и самоходные электрические комбайны на полях колхозов и совхозов получают широкое применение. Для социалистического сельского хозяйства нашей страны открываются новые перспективы в деле его технического оснащения.

Доктор техн. наук, проф. П. Н. ЛИСТОВ

Московская сельскохозяйственная академия им. Тимирязева



ИСКУССТВИИ

К статье Б. А. Ягунова „Об основных принципах стандартизации графических условных обозначений в электрических схемах“

(Электричество, № 2, 1951)

А. А. ЮМАТОВ

Следует отметить необходимость скорейшего создания единой научно-обоснованной, обязательной для всех, терминологии и системы условных обозначений для принципиальных схем в области электроэнергетики, электропривода, автоматического управления и регулирования. Комитет технической терминологии при Академии наук СССР уже форсировать свои работы в этой области.

Путаница в вопросе об единых графических условных обозначениях существует давно и она принимает, очевидно, большие размеры. Например, в обозначении химического источника электрического тока неясно — короткой длинной чертой надо показывать положительный полюс. Авторы различных учебных пособий делают это по-разному и оба эти обозначения существуют параллельно.

То же самое можно сказать и о многих других условных обозначениях.

Нельзя согласиться с положением, выдвинутое в статье Б. А. Ягунова, что в монтажной схеме нас не должна интересовать конструкция аппарата. По нашему мнению, в монтажной схеме надо давать размещение электроэлементов, указывать трассы электропроводки и принцип работы каждого электроэлемента схемы; при этом должна быть отражена его конструкция. Только такая монтажная схема сможет дать полное представление об установке.

Следует приветствовать предложение Б. А. Ягунова о необходимости созвать специальные конференции для обсуждения вопроса об единых графических условных обозначениях в электрических схемах.

Инж. Л. Г. РАШКОВСКИЙ

Москва

Вопрос об единых графических символах для электрических развернутых схем, являющихся средством изображения действия отдельных элементов (катушки, конденсаторы, ключи управления и т. д.), соединенных в определенно зависимой последовательности друг с другом, имеет большую давность (Электричество, № 13, 1934; № 8, 1938; № 12, 1946). Отсутствие обязательных изображений символов значительно затрудняет пользование схемами и может повести к ошибкам.

Необходимо разработать для этих схем графические символы основных элементов, общих для всех областей техники (электропитания, электропривода, автоматической телефонии, радио и т. д.), как, например, катушки индуктивности, контакты, конденсаторы, вентили окислительные лампы, сопротивления и т. п.

Символы должны отвечать следующим требованиям.

1. Иметь только одно функциональное значение независимо от того, к какой области электротехники относятся элементные схемы.

2. Быть однозначными без специальных правил чтения для них сверху вниз, слева — направо и не зависеть от конструкции прибора (см. п. 6 ст. Б. А. Ягунова).

3. Сохранять рисунок и в тех случаях, когда он получает дополнительную функцию.

4. Быть однозначными независимо от того, вычерчены ли они бегло от руки или с помощью линейки и циркуля.

Комитету технической терминологии при Академии наук СССР следует получить от ведущих союзных проектных организаций таблицы применяемых ими графических изображений символов развернутых схем и на основании этого материала разработать проект стандарта.



О КОЭФФИЦИЕНТАХ НЕСИММЕТРИИ

Коэффициенты несимметрии, представляющие отношения симметричных составляющих системы векторов или комплексов, служат весьма удобной безразмерной характеристикой структуры и свойств такой системы. К сожалению, вопрос об этих коэффициентах излагается в литературе не безупречно.

Возьмем для примера безусловно хорошую книгу С. А. Ульянова „Короткие замыкания в энергетических системах“, ГЭИ, 1949. Рассматривая (стр. 200—203) систему трех произвольных комплексов $\dot{F}_a, \dot{F}_b, \dot{F}_c$ и вводя понятие об ее симметричных составляющих \dot{F}_0, \dot{F}_1 и \dot{F}_2 , автор указывает, что разлагать на симметричные составляющие можно как токи и напряжения, так и сопротивления. Далее автор рассматривает отношения между отдельными симметричными составляющими, принимая за основу составляющую положительной последовательности, и вводит, таким образом, следующие два коэффициента несимметрии:

$$b_2 = \frac{\dot{F}_2}{\dot{F}_1} \text{ и } b_0 = \frac{\dot{F}_0}{\dot{F}_1}, \quad (1)$$

называя b_2 — коэффициентом несимметрии, а b_0 — коэффициентом неуравновешенности. При этом он не оговаривает, что его изложение вопроса о коэффициентах несимметрии относится *только к токам и напряжениям*, но не относится к сопротивлениям.

Между тем, легко убедиться, что в применении к симметричным составляющим *сопротивлений (проводимостей)* коэффициенты b_2 и b_0 не имеют того физического смысла, который предполагается в их наименованиях и который они имеют для токов (напряжений). Это происходит потому, что *нормальные симметричные режимы* для системы токов (напряжений) и сопротивлений (проводимостей) *различны*.

Действительно, в нормальном симметричном режиме токи (напряжения) будут:

$$\dot{I}_a = a\dot{I}_b = a^2\dot{I}_c; \quad \dot{I}_0 = 0, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_a, \quad \dot{I}_2 = 0,$$

а сопротивления (проводимости) будут:

$$Z_a = Z_b = Z_c; \quad Z_0 = Z_a, \quad Z_1 = 0, \quad Z_2 = 0,$$

т. е. в нормальном симметричном режиме в системе токов (напряжений) существует только составляющая *положительной* последовательности, тогда как в системе сопротивлений (проводимостей) существует только составляющая *нулевой* последовательности.

Поэтому, если для токов (напряжений) в нормальном симметричном режиме

$$b_2 = 0 \text{ и } b_0 = 0,$$

то для сопротивлений (проводимостей) в таком же режиме

$$b_2 = \frac{0}{0} \text{ и } b_0 = \infty.$$

Таким образом, *нельзя* применять к системам токов (напряжений) и сопротивлений (проводимостей) одинаково построенные коэффициенты несимметрии и ожидать при этом, что они будут иметь одинаковый физический смысл.

Для сопротивлений (проводимостей) нужно строить коэффициенты несимметрии (в общем смысле этого слова) взяв для них за основу в качестве знаменателя характеристику нормального симметричного режима, т. е. составляющую *нулевой*, а не положительной последовательности. Коэффициенты несимметрии будут¹

$$\xi_1 = \frac{\dot{F}_1}{\dot{F}_0} \text{ и } \xi_2 = \frac{\dot{F}_2}{\dot{F}_0}.$$

Тогда для сопротивлений (проводимостей) при нормальном симметричном режиме ($Z_0 \neq 0, Z_1 = 0, Z_2 = 0$) оба коэффициента несимметрии будут равны нулю:

$$\xi_1 = \frac{Z_1}{Z_0} = 0 \text{ и } \xi_2 = \frac{Z_2}{Z_0} = 0.$$

Все сказанное по отношению к сопротивлениям (проводимостям) справедливо и для комплексов *фазных токов* \dot{P}_a, \dot{P}_b и \dot{P}_c , поскольку при нормальном симметричном режиме

$$\dot{P}_a = \dot{P}_b = \dot{P}_c, \text{ а } \dot{P}_0 = \dot{P}_a \text{ и } \dot{P}_1 = 0 = \dot{P}_2.$$

Применение коэффициентов несимметрии типа ξ_1 и ξ_2 одновременно с коэффициентами несимметрии типа b_2 и b_0 было бы весьма целесообразно, так как позволило бы давать краткую и наглядную характеристику разных режимов несимметричных цепей и получать более компактную и наглядную формулу для многих выражений теории несимметричных цепей. При этом коэффициенты типа b_2 и b_0 должны быть *комплексными* (как и коэффициенты типа ξ_1 и ξ_2), а не вещественными, какими они получаются, если рассматривать в качестве b_2 и b_0 отношения абсолютных величин соответствующих симметричных составляющих (1). Вещественные коэффициенты несимметрии не дают полной характеристики свойств системы, так как свойства системы и результаты ее воздействия зависят не только от соотношения величин, образующих ее симметричные составляющие, но и от их фазных соотношений, описываемых аргументами комплексных коэффициентов несимметрии.

Кандидат техн. наук М. Е. СЫРКИН

¹ Чтобы оттенить, какая составляющая принята за основу, можно применить двойные индексы при коэффициентах несимметрии; например,

$$b_{21} = \frac{\dot{F}_2}{\dot{F}_1} \text{ и } \xi_{20} = \frac{\dot{F}_2}{\dot{F}_0}.$$



ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЛАЖНОСТИ БУМАГИ И ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Группой автоматики Камского целлюлозно-бумажного комбината разработан метод непрерывного контроля влажности бумаги и целлюлозы. Сконструированные комбинации электронных измерителей влажности установлены уже на нескольких машинах и работают круглосуточно. Они показали существенное преимущество перед обычным способом определения влажности, заключающимся в периодическом сравнении в лаборатории веса образцов бумаги до и после сушки. Электронный измеритель позволяет осуществлять непрерывный контроль влажности бумаги в процессе ее изготовления, у самой машины.

Идея прибора заключается в измерении емкости конденсатора-датчика, по поверхности которого скользит бумажное полотно, диэлектрические свойства которого изменяются, как известно, в зависимости от влажности. Основными узлами прибора служат: а) конденсатор-датчик (набор бронзовых пластин, соединенных через одну); б) мостик, реагирующий на емкостную составляющую сопротивления датчика; в) генератор 800 гц на лампе 6С5, создающий синусоидальное напряжение на мостик; г) двухтактный усилитель на лампах 6Ф5 и 6С5, на выходе которого включено измерительное устройство с двумя купальными столбиками, собранное по фазочувствительной схеме; д) выпрямитель питания на лампе 6Н7 с феррорезистивным стабилизатором напряжения. Самопишущее устройство непрерывно фиксирует степень влажности бумаги на бумажной ленте — рулоне.

Развитие схемы позволило в дальнейшем ввести и световую сигнализацию, действующую автоматически с помощью контактного гальванометра.

(Радио, № 6, 1951, М. Снегирев)

ротором с фрезерованными пазамн. Последний двигатель имеет более толстую пазовую изоляцию обмотки статора (1,2 мм вместо 0,5 мм в первом варианте) и больший воздушный зазор (1 мм вместо 0,5 мм), а также более совершенный ротор. Конструкция шпинделя, передающего вращение электродвигателя к долоту, предусматривает погашающие вибрации резиновые опоры и работу непосредственно в глинистом растворе.

Мощность, развиваемая на долоте при 520 об/мин (независимо от глубины бурения), достигает 110...175 квт. Из сети электробур забирает: при глубине бурения до 2 000 м 230...250 квт и при 2 500 м 267 квт. Напряжение, подводимое к электробур (независимо от глубины бурения), 1100 в. Крутящий момент на долоте: пусковой 495 кгм, номинальный 250 кгм и максимальный 475 кгм. Допустимая осевая нагрузка 40 т. Вес электробур 4 т. Диаметр бурения 300 ... 560 мм.

Токоподвод к электробур выполнен в виде отдельных отрезков шлангового кабеля с резиновой изоляцией, вмонтированных в каждую бурильную трубу и снабженных на концах специальными герметическими контактными кабельными соединениями. К наземному оборудованию электробур относятся: силовой трансформатор 250 квд, машинная группа автомата подачи, магнитная станция управления электробуром и автоматом подачи.

Буровой автоматический регулятор БАР-1 обеспечивает переменную скорость подачи бурового инструмента и его реверс, а также расширение ствола скважины автоматически в функции заданной величины тока нагрузки бурового двигателя. БАР-1 уменьшает кривизну бурения и уход от устья, ускоряет примерно на 25% проходку и облегчает труд бурильщика.

(Энергетический бюллетень, № 6, 1951, Н. Г. Григорян)

СОВЕТСКИЙ ЭЛЕКТРОБУР

Впервые в истории мировой техники электробур был создан группой советских специалистов нефтяной промышленности. В начале 1940 г. в районе Баку первым опытным электробуром была пройдена скважина глубиной 1 500 м.

Наряду с современными способами турбинного и роторного бурения электробурение отвечает задаче перенесения бурового двигателя в забой скважины, но сверх того обладает рядом преимуществ по сравнению с турбинным и роторным бурением. Так, нормальный режим электробурения равнозначен форсированному режиму бурения турбобуром и достигается на низконапорных грязевых скважинах, не пригодных для форсированного режима в турбинном бурении. Далее, при проходке скважин электробуром достигается экономия электроэнергии: по сравнению с роторным бурением на 47,5% и по сравнению с турбинным бурением на 24%. Электробур пригоден как в эксплуатации, так и в разведочном бурении, а также для бурения наклонных скважин; безредукторный электробур имеет КПД 94%, высокоэффективная экономичная электрическая машина для скоростной проходки скважин глубиной до 2 000 м — таков вывод по результатам промышленных испытаний 1949—1950 гг. в Азнефти и Башнефти различных геологических и климатических условиях.

Электродвигатель безредукторного электробур был выполнен в двух вариантах: на частоту тока 50 гц — с 13-полусовой обмоткой статора и 13-секционным шихтовым ротором и на частоту тока 20 гц — с 4-полусовой обмоткой статора и 6-секционным шихтовым ротором.

ПРИМЕНЕНИЕ БАКТЕРИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

В заботе о благоустройстве населенных мест и охране здоровья трудящихся советская сантехника непрерывно повышает требования к качеству воды, подаваемой водопроводами. Среди примесей, могущих содержаться в питьевой воде, наибольшую опасность для здоровья населения, пользующегося ею, представляют так называемые патогенные микроорганизмы — возбудители водных инфекционных заболеваний (брюшной тиф, дизентерия и др.). Поэтому обеззараживание питьевой воды на водоочистных станциях водопроводов — наиболее ответственный этап во всем комплексе обработки воды перед подачей ее потребителям. В настоящее время основным методом обеззараживания питьевой воды на водоочистных станциях является обработка ее хлором. Однако, физические методы обеззараживания питьевой воды, и в первую очередь использование бактерицидного эффекта ультрафиолетового излучения, имеют ряд преимуществ перед химическими (реагентными) методами и заслуживают особого внимания.

Бактерицидным действием обладают лучи с длиной волны от 2 950 до 2 000 Å, вследствие чего эта область ультрафиолетовых лучей называется бактерицидной. Максимум бактерицидного действия располагается около длины волны 2 600 Å. Бактерицидное действие лучей практически мгновенно; иначе говоря, обеззараженная вода может немедленно подаваться потребителям. Эксплуатация

облучающих устройств проще и безопаснее для персонала, чем хлорирующих.

В результате исследований, проведенных Академией коммунального хозяйства им. Памфилова, разработан метод расчета и даны типовые конструкции аппаратов для обеззараживания воды.

Излучение появившихся в последнее время аргонно-ртутных ламп низкого давления сосредоточено в основном в одной спектральной линии 2537 Å, находящейся близко к максимуму бактерицидного действия, что позволило назвать эти лампы «бактерицидными».

На основании исследований источников бактерицидного излучения было сделано следующее заключение: для целей обеззараживания воды наиболее рационально использовать аргонно-ртутные лампы низкого давления; расчетная бактерицидная мощность таких ламп должна приниматься равной мощности ламп в конце срока их службы, т.е. на 30...40% ниже номинальной; применение бактерицидных ламп для обеззараживания воды возможно как при размещении ламп в воздухе, над поверхностью облучаемой воды, так и при погружении их в воду в кварцевых чехлах, защищающих лампу от влияния температуры воды на мощность их бактерицидного излучения.

В результате исследований источников бактерицидного излучения были разработаны два типа аппаратов — с непогруженными и погруженными источниками.

Расход электрической энергии на обеззараживание питьевой воды при использовании в качестве источника бактерицидной энергии бактерицидных ламп зависит от вида и количества микроорганизмов в облучаемой воде, ее физико-химических свойств и конструкции аппарата. В стандартных условиях (при оценке качества обеззараженной воды по индексу кишечной палочки) расход электрической энергии определяется в 10...30 втч на 1 м³ обеззараженной воды.

(Известия Академии наук СССР. Отд. технических наук, № 3, 1951, В. Ф. Соколов)

ЗА РУБЕЖОМ

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, РАБОТАЮЩИЕ НА ВУЛКАНИЧЕСКОМ ПАРЕ

В Италии имеются электростанции, использующие пар источников вулканического происхождения. Его состав ~96,5% воды и ~3,5% борной кислоты. Суммарная мощность таких установок по годам составляла: 1904 г. — 0,7 кВт, 1932 г. — 14 770 кВт; 1939 г. — 60 000 кВт; 1948 г. — 150 000 кВт.

Использование пара производится тремя способами.

1. Пар непосредственно подводится к турбине. В этом случае расход пара составляет 19 кг/кВтч.

2. Вулканический пар пропускается через теплообменник и его тепло используется для нагрева и испарения чистой воды. Этот «вторичный» пар поступает в турбину. Его расход составляет 14 кг/кВтч.

3. При использовании пара в турбине с конденсацией его расход снижается до 10 кг/кВтч.

Паровые скважины дают 100...200 кг пара в час при давлении 3,5 ат с температурой 205°С. Глубина скважин колеблется от 200 до 600 м.

В Исландии в 25 км от г. Рейкьявик несколько лет велась разведка по определению мощности источников подземного вулканического пара, сопровождающаяся бурением скважин. Полученные материалы подтвердили возможность постройки электростанции мощностью 3 000 кВт. Пар получается из расщелин и трещин в голубом базальте на склоне вулкана. Полученный из-под земли пар будет поступать в бойлеры и затем, после сепарации, в конденсационную турбину. После пуска первой электростанции намечена дальнейшая постройка аналогичных установок.

LElektricien, февраль, № 1890, стр. 28, 1951; Electrical Times, апрель, № 3101, стр. 614 и № 3102, стр. 717, 1951.

Инж. Б. А. ПРОТОПОВ

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА ЗА РУБЕЖОМ

Экономические затруднения капиталистических отражающиеся в энергетике дефицитом и вздорожание топлива, возбуждают интерес этих стран к возможному ветроиспользованию в большой энергетике. Показ этого интереса в Западной Европе являются проведенные в 1950 г. два международных совещания в Париже и Лондоне, посвященные обсуждению и координации научно-исследовательских работ по ветроэнергетике. В этих совещаниях участвовали представители 19 маршалов стран.

В США, несмотря на дальнейшее развитие сетей, питаемых от крупных энергосистем, не ожидается увеличение числа мелких ветроэлектрических установок мощностью до 1 кВт, используемых в удаленных пунктах для зарядки автомобильных аккумуляторов освещения и питания радиоприемников. Число этих установок по последним данным составляет в США 500 000 шт. Строительство крупных установок после постройки в 1941 г. ВЭС $D = 53$ м, 1 000 кВт не предвидится.

Работы по ветроэнергетике в разных странах в последние годы в основном по трем направлениям: 1) аэрологические исследования в районах с большими средними скоростями ветра, перспективных по ветроэнергетике, и разработка технико-экономических вопросов в этой области; 2) разработка энергетических схем ветроагрегатов; 3) опытное строительство.

Работы по исследованию аэрологических режимов проводились в ряде стран, особенно в Англии и Франции. В довольно крупном масштабе, но не представляющем особого интереса, так как они велись известными ранее методами с применением обычной измерительной аппаратуры. Более новым является выдвинутое во Франции предложение о непосредственном измерении в энергетических целях кубов скорости ветра, которым пропорциональна мощность воздушного потока, взамен обычных измерений скорости. Измерение предлагается вести с помощью ветрянки с генератором, работающим на переменном токе, с жесткими лопастями, вращающимися с постоянной скоростью. Разработана конструкция такой ветрянки. В СССР подобное предложение было выдвинуто ранее.

В Германии проведена теоретическая работа по определению выгодности различных аэродинамических режимов ветродвигателей с учетом повторяемости скоростей ветра. Найдено, что режим при постоянной скорости вращения ветроколеса при непосредственном жестком соединении ветродвигателя с генератором трехфазного тока дает большую отдачу электроэнергии, при условии изменения частоты вращения в зависимости от скорости ветра, лишь на 10%, чем режим ветроколеса при переменном числе оборотов и постоянной модуле быстротходности. Этот результат немецкого исследования сходится с результатами произведенной нами в СССР подобной же работы наших ветровых условий (Электричество, № 10, 1949).

В области разработки энергетических схем и конструкций мощных ветроэлектрических агрегатов имеются предложения, представляющие интерес.

Несмотря на принципиальную возможность применения простых жестких лопастей, почти все построенные до сих пор ветроустановки переменного тока имели сложные лопасти. Исключение представляет наиболее крупная и построенная позднее других, ветроустановка (в Дании, $D = 24$ м мощностью 100 кВт, имеющая регулирование ветроколеса тормозными открываками. В этом агрегате ветроколесо вращает через редуктор генератор постоянного тока, с помощью вращающегося преобразователя, в котором постоянный ток преобразуется в переменный.

В большинстве проектных решений последнего времени применяются ветроколеса с жесткими лопастями без регулировки, но с ограничением числа оборотов, при этом в ряде последних проектов, например, ветроагрегатов мощностью 6 500 и 7 500 кВт в США, принята также схема преобразования постоянного тока в переменный (Электричество, № 2, 1946). Основным недостатком этой схемы является дублирование установочной мощности электрических машин, удорожающее установку и ухудшающее ее экономичность.

В Германии после ряда проектов, составленных в свое время и предлагавших применение сверхтихоходных агрегатов, конструктивно объединенных с ветроколесом, что трудно осуществимо в природе и было выполнено инж. Гонеф только на моделях мощностью 20 и 40 квт, предложили использовать в ветроэлектрических агрегатах гидравлическую передачу от ветроколеса к генератору. Такие передачи получили в последнее время распространение в ряде отраслей промышленности, на агрегатах, где требуется работа при переменном числе вращений. В применении к ветроагрегатам этот вид передачи дает возможность применять жесткие крылья и обходить дорогой и громоздкий редуктор. В отличие от гидравлической передачи гидравлической передачей можно передавать большие мощности. В настоящее время такие передачи построены на мощность до 1000 квт. Они хорошо регулируются, имеют к. п. д. порядка 0,9 и небольшие габариты.

Преимуществами ветроагрегата с гидравлической передачей являются: 1) простота конструкции ветроколеса жесткими лопастями и его режим работы при максимальной к. п. д.; 2) относительная простота регулирования скорости вращения генератора и мощности агрегата; легкий вес и высокий к. п. д. передачи.

Другое предложение касается энергетической схемы ветроагрегата с воздушной передачей. Жесткие полые лопасти ветроколеса имеют близ концов щелевые отверстия, через которые при вращении выбрасывается из лопастей воздух. Полости лопастей соединены воздухопроводом с воздушной турбиной, через которую засасывается ружный воздух и которая вращает синхронный генератор.

Американская опытная установка $D = 53$ м 1000 квт, построенная в 1941 г., как известно, после аварии 1946 г., была восстановлена, ввиду отказа в отпуске средств, необходимых на дальнейшие исследовательские работы по улучшению. В вышедшей в 1948 г. книге конструктора агрегата инж. Путнэм содержатся некоторые неопубликованные до этих пор конструктивные и опытные данные о агрегате (см. Электричество, № 2, 1946). Двухлопастное ветроколесо, принятое для агрегата, по исследованию лаборатории Кармана было выгоднее трехлопастного, так как, уменьшая годовую норму выработки электроэнергии только на 2%, оно значительно удешевляло конструкцию. Сечение лопастей имело постоянную хорду, уменьшения напряжений в лопастях от изгибающего момента при увеличении лобового давления махи соединились с главным валом пружинными шарнирами, допуская отклонение лопастей назад, за нормальную ось вращения ветроколеса на угол до 20°, что предельно необходимо для расположения ветроколеса по направлению ветра за башней. Шарнирное соединение было выполнено по типу, обычно применяемому для лопастей винтов вертолетов. Регулирование ветродвигателя, выполненное по типу гидротурбин Каплана, имело центробежный механизм, который обеспечивает постоянство скорости вращения до 0,01%. Масляная система регулирования питалась двумя насосами, один был с механическим, а другой с электрическим приводом. Скользящая передача, необходимая для работы центробежного регулятора, осуществлялась гидромучной тяговой типа, рассчитанной на 110% номинального крутящего момента генератора. Установка генератора на головке агрегата и отсутствие вертикальной трансмиссии по сравнению с вариантом установки генератора на уровне земли снизило стоимость установленного киловатта агрегата всего на несколько долларов. Верхняя опора головки, кольцевой толкатель и флюгерное управление гидравлическим прижимом поворота головки были выполнены сходными с приборами в СССР на Балаклавской ВЭС в 1931 г.

Согласно опытной характеристике, полный к. п. д. агрегата при номинальной мощности (при скорости ветра $v = 13,4$ м/сек) составил примерно $\eta = 0,31$ *.

Интересно отметить способ регистрации электрических и механических величин, принятый при испытаниях этого агрегата. Замерялось 19 различных величин. Все замеры изводились указывающими измерительными приборами.

Вместо записей применялось непрерывное фотосъемочное устройство с приборами со скоростью 8 кадров в секунду при снятии характеристик и 8 кадров в минуту в остальное время опытной эксплуатации агрегата.

В Великобритании проведено за последние два года проектирование и подготовка к постройке нескольких опытных ветроэлектрических установок с целью выяснения возможности работы мощных ветроагрегатов на Британскую высоковольтную сеть. Подготовительная исследовательская работа была поручена Британской ассоциации электротехнических исследований (ERA).

Опытное строительство начато в Северной Англии и Шотландии, где имеют место среднегодовые скорости ветра порядка 7...8 м/сек. В настоящее время этой же организацией строится первая из опытных ветроустановок с диаметром ветроколеса $D = 18$ м и установленной мощностью 100 квт. Первая установка строится на острове Мэнленд (Оркнейские острова) и будет работать на местную сеть 11 кв параллельно с крупной дизельной электростанцией, от которой острова снабжаются электроэнергией. Проект агрегата разработан с учетом опыта русской и американской установок. Расчетная скорость ветра принята 13,5 м/сек, при которой агрегат будет иметь 4000 час использования установленной мощности. Станция сооружается на холме высотой 140 м с хорошо обтекаемым профилем, который будет вызывать сглаживание пульсаций скорости ветра и увеличение ее в 1,2 раза по отношению к скорости на той же высоте перед холмом. Изготовление электромеханического оборудования установки поручено крупной фирме, имеющей разносторонний строительный опыт, в том числе в авиационном производстве.

Вторую опытную установку будет строить Управление по электроснабжению Великобритании (BEA).

Небольшая мощность — 100 квт первых опытных агрегатов, целью постройки которых является выявление наилучших конструкций и проверка эксплуатационных технических условий работы крупных ветроустановок, объясняется стремлением ускорить ввод опытных установок в эксплуатацию, избежав излишних затруднений, связанных с постройкой больших агрегатов.

Экономические соображения, положенные в основу перспективной схемы ветроиспользования в Англии, следующие. Для оптимальной мощности ветроагрегатов, которая по американским данным составляет при современном уровне техники 1500 ... 2500 квт и общем к. п. д. агрегатов порядка 0,3, число часов использования установленной мощности ветростанций в британских ветровых условиях будет минимум 3500. Стоимость сооружения, исходя из существующих стоимостей малых агрегатов (100 ф. ст/уст. квт), должна составлять не более 50 ф. на установленный киловатт. Годовые эксплуатационные расходы, включая амортизационные отчисления, составляющие для мелких ветро-электрических установок 15% от их стоимости, для крупных агрегатов составит порядка 8%, что даст стоимость электроэнергии на шинах ветростанции 0,24 ... 0,27 пенса/кВтч. При такой стоимости электроэнергии ветроустановки смогут рентабельно работать совместно с тепловыми электростанциями и, кроме того, могут оказать существенную помощь в увеличении использования имеющихся регулируемых гидростанций при параллельной работе с ними.

Литература

1. Electrician, 17/XI 1950.
2. Engineer, № 4886, IX, 1949.
3. Engineer, № 27, I, 1950.
4. Engineering, № 4377, XII, 1949.
5. Zeitschrift für Elektrotechnik, № 3, 1948.
6. Zeitschrift für Elektrotechnik, № 6, 1948.
7. Bulletin S. F. E., № 103, 1950.
8. Strajnsky Obzor, № 8, 9, 1947.
9. Putnam, Power from the wind, Nostrand Co, Toronto, 1948.

Кандидат техн. наук В. Р. СЕКТОРОВ

* Соответственно коэффициент использования энергии ветра мы считаем около 0,35 (В. С.).

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Проблема передачи электроэнергии на переменном токе сверхвысокого напряжения включает целый ряд вопросов, подлежащих подробному изучению. Одним из таких вопросов являются потери на корону. Проводившиеся на опытной линии 500 кВ исследования показали, что величина потерь на корону получается различной при испытаниях, проводившихся при одинаковых атмосферных условиях (давление, температура, влажность, дождь, снег, град, туман). Одним из возможных факторов, влияющих на корону, является электрическое поле земли. С целью исследования этого влияния был построен прибор, предназначенный для измерения напряженности электрического поля на поверхности земли в непосредственной близости от опытной линии 500 кВ.

Методы определения напряженности в отдельных точках поля можно разделить на две основные группы: а) методы, основанные на том, что какая-либо деталь прибора принимает потенциал точки поля, в которой она расположена, и затем этот потенциал измеряется, например, с помощью электрометра; б) методы, основанные на том, что заземленная деталь прибора поочередно подвергается действию поля и экранируется от него; тогда изменение ее заряда является мерилем напряженности электрического поля.

Описываемый прибор относится ко второй группе. К такому прибору должны быть предъявлены следующие требования: 1) пригодность для использования как в качестве прибора с непосредственным отсчетом, так и в качестве регистрирующего прибора; 2) он должен указывать направление поля; 3) широкий предел измерений на одной шкале; 4) наличие нескольких пределов измерения для возможности исследования напряженностей поля в широком диапазоне; 5) прибор не должен реагировать на знакопеременное электрическое поле, создаваемое самой линией электропередачи, если даже его напряженность в несколько раз превышает напряженность постоянного поля; 6) прибор должен работать при любой погоде; 7) он не должен требовать повторных градуировок; 8) колебания вспомогательного напряжения в пределах примерно $\pm 10\%$ не должны влиять на работу прибора. Желательно также, чтобы конструкция прибора не вызвала чрезмерно высоких изоляционных требований, чтобы вблизи измерительного элемента электрическое поле подвергалось минимальному искажению и чтобы механическая конструкция прибора была простой.

Основными элементами прибора, призванного удовлетворить этим требованиям, являются две пластины статора, расположенные в центре металлической плиты, и ротор, который поочередно экранирует и открывает статор действию электрического поля земли. Эти элементы расположены над водо- и пыленепроницаемым ящиком, в котором помещены усилитель, электродвигатель, синхронный переключатель и электронизмерительные приборы (рис. 1 и 2).

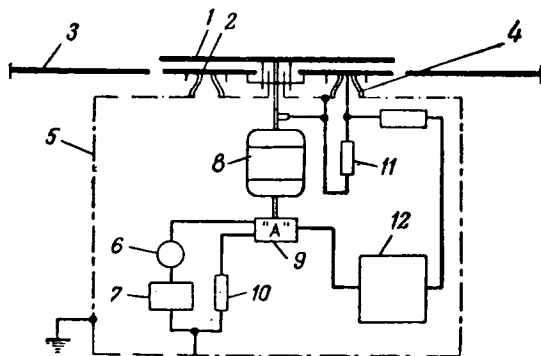


Рис. 1.

1 — ротор; 2 — статор; 3 — металлическая пластина; 4 — изолятор; 5 — ящик; 6 — прибор с непосредственным отсчетом; 7 — регистрирующий прибор; 8 — синхронный двигатель 900 об/мин; 9 — синхронный переключатель; 10 — сопротивление; 11 — сопротивление 4,7 мОм; 12 — усилитель.

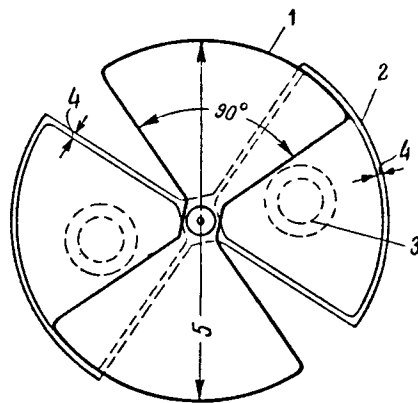


Рис. 2.

1 — ротор; 2 — пластины статора; 3 — изолятор; 4 — зазор между статором и металлической пластиной 9,5 мм; 5 — диаметр 305 мм.

Если статор заземлен и ротор в данный момент полностью его экранирует, то напряженность поля на поверхности статора, а также его заряд равны нулю. По мере того, как ротор открывает все большую часть статора через заземляющий провод последнего будет протекать ток. Ток будет такой, чтобы распределение зарядов в статоре соответствовало напряженности электрического поля на его поверхности. К моменту, когда статор полностью открыт, количество электричества, протекшего через заземляющий провод, создаст заряд на пластине статора соответствующий напряженности поля на поверхности земли. Связь между напряженностью поля и зарядом в

единицу поверхности дается уравнением $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$, где

E — напряженность электрического поля, в/см; σ — поверхностная плотность заряда, к/см²; $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14}$ а.сек/в.с.

Площадь пластин равна 364,9 см²; ротор вращается со скоростью 900 об/мин, так что пластины статора открываются за 0,01667 сек. Если принять, например, $E = 100$ в/м, то ток в заземляющем проводе статора будет равен 1936 па.

Этот ток слишком мал для непосредственного измерения. Поэтому статор заземляется через сопротивление в 4,7 мОм, и падение напряжения на этом сопротивлении возникающее при протекании через него тока, усиливается с помощью специального электронного усилителя. Наличие заземляющего сопротивления не влияет на работу прибора. За исключением того, что потенциал статора остается равным нулю. Так, при напряженности поля в 100 в/м, т. е. при токе в 1936 па, напряжение статора относительно земли будет 9,1 мв.

На выходе усилителя установлен механический переключатель. В течение полупериода, когда ротор закрывает статор, усилитель соединяется с электронизмерительными приборами, а в течение полупериода, когда ротор открывает пластины статора, усилитель заземляется через сопротивление, равное сопротивлению приборов.

Скорость синхронного двигателя в 900 об/мин выбрана с таким расчетом, чтобы сделать прибор нечувствительным к 60-периодным переменным электрическим полям. Пластины статора и ротора представляют собой 90-градусные секторы, поэтому на каждую статорную пластину 60-периодное поле действует в течение полного периода, когда она закрыта, а также когда она открыта, так что это электрическое поле не оказывает на показания прибора никакого влияния. Измерения подтвердили что показания прибора не меняются даже при наличии переменного электрического поля с напряженностью в 100 раз большей, чем напряженность постоянного поля.

Путем переключения в усилителе могут быть установлены следующие пределы измерения: 40 000, 400 и 40 в/м. Усилитель выполнен таким образом, что шкала регистрирующего прибора растянута в начале и сжата к концу. Благодаря этому напряженность поля вызывающая полное отклонение подвижной системы из

тельного прибора, в 10 раз больше напряженности, вызывающей отклонение подвижной системы на 30% полного. Это дает возможность производить точные измерения при изменениях напряженности в широких пределах без переключения диапазонов, что особенно важно, когда прибор оставляется в работе на длительные отрезки времени.

Прибор был проверен в течение нескольких месяцев работы на опытной установке линии 500 кв.

(Transactions A. I.E.E., т. 69, ч. I, стр. 633, 1950. R. L. Tremain, R. C. Cheek)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ТЕРМОЭЛЕМЕНТ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Термоэлемент представляет собой простейшее устройство для преобразования тепловой энергии в электрическую. Он отличается отсутствием подвижных частей и малым износом, почти не требует ухода. Источниками тепла могут служить не только горячие вещества или отраженные газы теплоэлектростанций, но и солнечная энергия или горячие источники. Несмотря на большое количество патентов по изготовлению термопреобразователей, ни один из них до настоящего времени не приобрел практического значения. Причина заключается в низком к. п. д., свойственном всем термопреобразователям.

Точный расчет к. п. д. затруднителен вследствие температурной зависимости характеристик материалов. Попробуем для упрощения расчета приходится делать ряд допущений и полагать постоянство сечения проводов, независимость тепло- и электропроводности от температуры, установившийся режим и др.

Термопреобразователь может иметь пластинчатую, трубчатую или сферическую форму в зависимости от источника тепла и охлаждающей среды. В качестве при-

Рассчет показывает, что теоретический к. п. д. термопреобразователя

$$\eta = \frac{1 - \frac{T_2}{T_1}}{\frac{8T_0}{\omega T_1} + \frac{2u_1}{u} - \frac{1}{2} + \frac{T_2}{2T_1}},$$

где T_1 и T_2 — абсолютные температуры горячих и холодных спаев;

T_0 — абсолютная температура, к которой приведены тепло и электропроводность проводников;

u_1 и u — термо-э. д. с.;

ω — постоянная, зависящая от термо-э. д. с., электро- и теплопроводности металлов.

Если $T_2 = 0$ и $T_1 \gg 8T_0$, то к. п. д. стремится к своему

абсолютному теоретическому максимуму, равному $\frac{2}{3}$ (сб. $\frac{2}{3} \%$). Практически это значение недостижимо.

Если в вышеуказанную формулу подставить $T_2 = 0$ и $T_1 = T_s$ (T_s — меньшая из двух температур плавления металлов, входящих в термопреобразователь), то практическое предельное значение к. п. д. получается следующим:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{\frac{2}{3} + \frac{8T_0}{\omega T_s}}.$$

Подсчеты η_{\max} для различных пар металлов и сплавов показывают, что его значение колеблется в пределах от нескольких сотых процента до 6%. Расход материалов на термопреобразователь получается значительным — свыше 1000 кг на 1 квт отдаваемой мощности.

При таких условиях совершенно очевидно, что термопреобразователь вряд ли может приобрести техническое значение. Он может быть использован лишь в тех случаях, когда в больших количествах имеется дешевая тепловая энергия или когда единственным источником энергии может служить солнечное излучение. Возможно также использование термопреобразователя для целей охлаждения, если через него пропускать электрический ток.

(Bulletin A. S. E., № 14, 1950. L. Geilling.)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

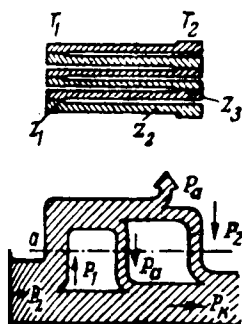


Схема термоэлемента.

a — область электрической энергии; $в$ — область тепловой энергии; P_z — входящая теплота (за единицу времени); P_k — теплота, отдаваемая в охлаждающую среду (за единицу времени); P_1 и P_2 — термоэлектрическая теплота (за единицу времени); P_3 — отдаваемая полезная мощность.

на рисунке показан преобразователь пластинчатой формы и его энергетическая схема. Преобразователь можно разбить на три зоны: зона горячих спаев Z_1 , зона проводов Z_2 и зона холодных спаев Z_3 . Слева в зону Z_1 входит теплота P_z . В зоне Z_1 генерируется (отрицательная) термоэлектрическая теплота P_1 ; следовательно, в зону Z_2 переходит $P_z - P_1$. В зоне Z_2 генерируется ток, выделяемое током и принимаемое равным отдаваемой полезной мощности P_a . В зону Z_3 поступает $P_z - P_1 + P_a$; в этой зоне генерируется (положительная) термоэлектрическая теплота P_2 , и следовательно, в охлаждающую среду отдается тепло: $P_k = P_z - P_1 + P_2 + P_a$. Сколько, кроме P_k , энергии в виде тепла не отдается, разность между входящей P_z и отводимой P_k тепловой энергией должна быть равна отдаваемой полезной мощности $P_a = P_z - P_k$. Ввиду того, что $P_z - P_k = P_1 - P_2 - P_a$, то получается, что полезная мощность равна половине разности между термоэлектрической теплотой в зонах Z_1 и Z_3 :

$$P_a = \frac{P_1 - P_2}{2}.$$

ИОННО-ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В современной промышленности известное распространение получил регулируемый электропривод с применением управляемых выпрямителей и электронной техники. Зарубежная литература, посвященная данному вопросу, имеет преимущественно описательный характер и преследует цель лишь поверхностного ознакомления читателя с предметом. Однако отдельные черты данной отрасли зарубежной техники представляют интерес. Наиболее широко привод с выпрямителями применяется в установках, мощность двигателей которых не превышает нескольких десятков киловатт.

Сегодня управление ртутным выпрямителем осуществляется при помощи пик-трансформаторов с подмагничиванием постоянным током. Эта схема обладает значительным быстродействием: изменение режима сеток выпрямителя, которое соответствует переходу к полному рабочему напряжению из состояния, где выпрямленное напряжение равно нулю, занимает 0,3 сек. Мощность, потребляемая схемой сеточного управления, составляет около 200 вт. Выпрямленное напряжение следует за изменением угла зажигания практически безинерционно. Ртутный выпрямитель, как и вентиль с холодным катодом, может при-

нять нагрузку немедленно после включения, не требуя времени на прогревание.

Регулировочные качества и механические характеристики привода с управляемым выпрямителем близки к соответствующим показателям системы генератор—двигатель. Регулирование вплоть до основной скорости обычно производится изменением выпрямленного напряжения. Скорости выше основной получаются путем ослабления поля двигателя. Иногда регулирование скорости производится путем одновременного изменения напряжения питания и ослабления поля двигателя, что позволяет использовать двигатель уменьшенного габарита. Механические характеристики двигателя, питаемого от управляемого выпрямителя, могут обладать большей или меньшей жесткостью в зависимости от применяемой схемы регулирования скорости. В равной мере это относится и к величине диапазона скоростей. Ряд металлообрабатывающих станков, таких, как токарные, фрезерные, шлифовальные и строгальные, не требует особо точного поддержания скорости при работе, допуская колебания порядка 2—3% от основной скорости. Диапазон скоростей привода шлифовального станка и стола строгального станка равен, приблизительно, 10:1. Движение же шпинделей токарного и сверлильного станков, а также стола карусельного станка требует диапазона порядка 100:1. Однако в ряде таких случаев применяется привод с диапазоном 10:1 в комбинации с коробкой скоростей. Подобные регулировочные качества присущи наиболее простым системам приводов. Для повышения устойчивости работы двигателя на заданной скорости и увеличения диапазона регулирования в схему вводятся устройства, увеличивающие жесткость механических характеристик. С этой целью углу зажигания выпрямителя сообщается некоторый фазный сдвиг, обеспечивающий компенсацию падения напряжения в цепях якоря двигателя и выпрямителя. Напряжение, управляющее дополнительным фазным сдвигом и пропорциональное величине выпрямленного тока, вводится в цепь обмотки подмагничивания сеточного пик-трансформатора. Эта система компандирования улучшает механические характеристики двигателя и увеличивает диапазон скоростей до 48:1 (около 12:1 за счет изменения напряжения выпрямителя и около 4:1 за счет ослабления поля двигателя). Дальнейшее повышение регулировочных качеств электропривода требует введения в схему электронно-усилительных элементов. Так, например, электропривод балансировочных станков должен обеспечить требуемую скорость вращения с точностью до 1—2 об/мин. Характер работы этого станка требует неоднократных остановок и пусков с достижением одной и той же, точно фиксированной скорости. Применение электроники позволяет точно поддерживать заданную скорость при колебаниях напряжения и частоты сети, а также производить автоматический повторный пуск на заданную скорость. Управление при этих повторных операциях производится простым нажатием кнопки. В схеме предусмотрено автоматическое ограничение тока якоря двигателя, что обеспечивает желательную плавность разбега и торможения. Узел ограничения тока якоря, широко применяемый в схемах автоматизированного привода, может состоять из сопротивлений, которое вводится в сеточную цепь выпрямителя и периодически шунтируется контактами вибрационного реле; другой метод ограничения тока использует дроссель насыщения, включенный в цепь сеточных пик-трансформаторов. При увеличении тока якоря свыше допустимой величины резко изменяется угол зажигания выпрямителя, и его напряжение снижается (режим отсечки); значение тока, при котором начинается отсечка, выбирается обычно в два или более раза выше величины номинального тока. Автоматическое регулирование скорости и простота управления значительно сокращают время операций на данном станке. С той же целью в металлорежущих станках применяются специальные регуляторы, поддерживающие величину скорости резания неизменной. Это позволяет значительно сократить машинное время обработки изделия. Обычно при обработке детали переменного радиуса скорость резания непрерывно меняется и принимает оптимальное значение лишь при одном определенном радиусе. Указанный регулятор получает сигнал от движения поперечной подачи станка и воздействует на систему управления двигателем так, что скорость резания, независимо от радиуса, поддерживается постоянной, близкой к оптимальному значению. Это позво-

ляет значительно сократить машинное время обработки изделия, как показывает таблица:

Отношение максимального радиуса к минимальному радиусу изделия	Сокращение машинного времени, %
1	—
2	25
3	33
5	40
Бесконечность	50

Некоторый интерес представляет электронный латор электропривода подачи строгального станка. Желание подачи осуществляется в виде поперечного перемещения реза в конце каждого обратного хода с станка. Расстояние, на которое может перемещаться реза, изменяется в диапазоне 75:1 и должно легко регулироваться. Минимальное перемещение реза при подаче может быть меньше 0,4 мм. Один из простых, но не очень точных методов регулирования заключается в том, что двигатель электропривода подачи на определенное время получает питание и затем тормозится; при этом используются двигатели как постоянные, так и переменного тока. Такой способ дает значительную ошибку в перемещении реза за счет погрешностей реле времени управляющего работой двигателя, а также благодаря колебаниям напряжения и частоты сети, непостоянству трения и т. д. Лучшие результаты может обеспечить схема, которая непосредственно реагирует на движение реза и соответственно этому управляет двигателем. Механические устройства подобного рода достаточно сложны, в то время как весьма простая электронная схема позволяет получить требуемую характеристику. В последнем случае двигатель подачи получает питание от генератора, причем напряжение последнего пропорционально скорости двигателя. Это напряжение интегрируется с помощью электронной схемы и, таким образом, создается новое напряжение, пропорциональное полному числу оборотов двигателя. Когда это напряжение достигает определенной величины, двигатель тормозится. Величина подачи регулируется при помощи потенциометра в цепи интегрирующего элемента схемы; этот потенциометр может быть смонтирован в любом, удобном для оператора, месте.

Питание двигателей от управляемых выпрямителей применяется также в системах многодвигательных приводов. Все двигатели такого привода получают питание от одного выпрямителя, так что управление напряжением последнего обеспечивает регулирование скорости каждого двигателя; необходимое в ряде случаев соотношение скоростей устанавливается путем воздействия на поле возбуждения соответствующего двигателя. Обеспечение согласованности работы двигателей с системой привода в целом, с расхождением в скоростях не более 4%, в пределах всего диапазона регулирования; при необходимости более точного согласования скоростей используется особый регулятор «уравнитель скоростей». Примером подобного многодвигательного привода является привод бумагоделательной машины; в этом случае скорость главного привода и скорость намотки регулируются одновременно, путем изменения напряжения выпрямителя. Специальное устройство регулирует ток в обмотке возбуждения двигателя, позволяя осуществить привод намотки бумаги с достаточно широким диапазоном скоростей 4:1; при этом мощность двигателя, развиваемая им при намотке, поддерживается постоянной.

Привод с применением управляемых выпрямителей получается сравнительно дешевым. Наряду с достоинствами существуют и свойственные ему недостатки, характерные для ионно-электронной техники — низкий коэффициент мощности, ограниченный срок службы лампы, наличие дрейфа. Современные системы привода типа генератор-двигатель с электромашиными усилителями свободны от ряда недостатков, свойственных ионно-электронной схеме, и близки к последней по своим характеристикам. Использование в схемах генератор—двигатель электронной техники позволяет получить весьма хорошее качество

рования. Поэтому ионно-электронная схема привода не выделяется такими исключительно высокими показателями, как это утверждают некоторые иностранные авторы.

Это подтверждается количественными показателями, приведенными в ряде статей на данную тему.

[El. Eng., т. 69, № 5, 1950; El. Times, т. 118, № 3081, Metro-Vickers Gaz., № 380, 1950.]

Инж. Р. М. СЛАВИН

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ДОМКРАТЫ

Домкраты устроены следующим образом (рис. 1). В нижний корпус аппарата — цилиндр 1 — вставлен также пустотелый цилиндр 2, внутренняя полость которого и пространство между цилиндрами сообщаются с другим. Внизу размещен центробежный насос 4, приводимый в движение короткозамкнутым двигателем 5 действием вала 6. Создаваемое насосом избыточное давление жидкости действует на поршень 3 и заставляет его двигаться совместно с поперечиной 7. В статье описаны типы таких домкратов — на усилия 65, 125 и кг при ходах 75, 100 и 150 мм соответственно. Сила, развиваемая домкратом, пропорциональна площади поршня и вязкости жидкости. Она постоянна во все время хода. Давление на поршень обычно принимается $0,5 \text{ кг/см}^2$. Большие величины давления вызывают всасывание жидкости в верхней части цилиндра при нагнетании. Подъемная сила, пропорциональная давлению жидкости (а следовательно, квадрату числа оборотов насоса), пропорциональна квадрату частоты сети при ее коле-

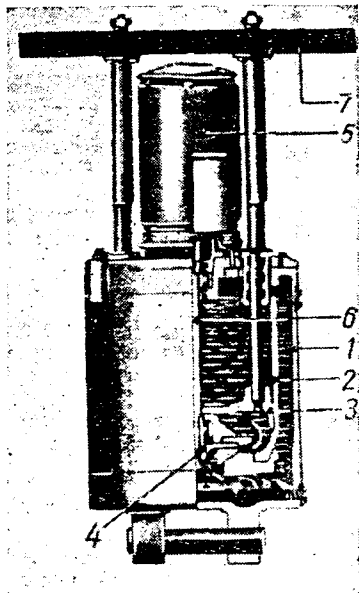


Рис. 1.

ях. Время подъема поршня (рис. 2) и связанной с ним траверсы зависит от нагрузки и величины хода. В течение времени подъема может колебаться от 0,9 до 7 сек, а опускания после выключения двигателя — от 0,3 до 0,5 сек. Мертвое время — от подачи напряжения на двигатель до начала подъема поршня — зависит от нагрузки и может изменяться от 0,1 до 0,15 сек. Для уменьшения времени предусмотрено снижение момента инерции

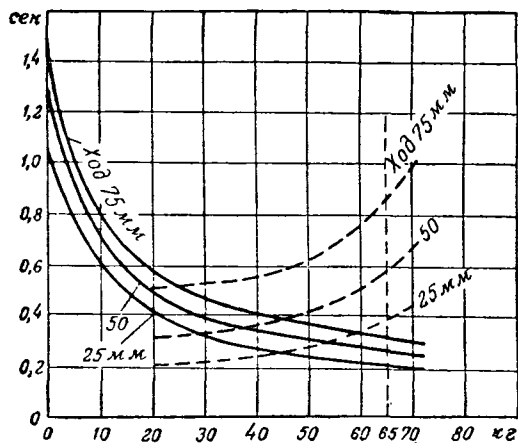


Рис. 2.

вращающихся частей — двигатель выполнен удлиненной формы и крыльчатка насоса изготовлена из алюминия. Мощность двигателя колеблется от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{2}$ л. с. Двигатель допускает до 500 пусков в час при полном использовании рабочего хода. Он допускает также режим поддержания поднятого груза после достижения конца хода неопределенно долгое время.

В описываемых домкратах применена специальная жидкость с низкой температурой застывания, так как она должна сохранять малую вязкость при всех температурах, могущих встретиться в работе.

Сравнительно с тяговыми электромагнитами большое преимущество описываемых домкратов — их малый вес (при одной и той же работе за полный ход в 1,250 кгсм электромагнит весит 115 кг, а домкрат — 54 кг) и значительно меньшие токи, потребляемые из питающей сети.

Область применения этих домкратов очень широка. Они применяются во всех случаях, когда могут быть применены тяговые электромагниты. В статье описано их использование для разных целей: нажатие контактов машин для точечной сварки, открывание дверей гаража, включение муфт фрикционных прессов, управление задвижками в пылепроводе котельной, включение масляных выключателей и разъединителей, подъем дверей печей, тормоза и многое другое.

Интересно их применение для регулирования скорости асинхронных двигателей. В этом случае двигатель насоса присоединяется к кольцам ротора регулируемого (главного) двигателя. Скорость его вращения (а следовательно, и сила тяги всего устройства) зависит от частоты тока в роторе и роторного напряжения. При включении главного двигателя частота тока в роторе равна частоте тока в сети, насос развивает максимальное давление и тормоз отпускает. Главный двигатель разбегается. При этом частота тока в роторе падает, падает усилие домкрата и пружины тормоза заставляют его нажимать снова. Возможно так отрегулировать оттормаживающее действие насоса и подтормаживающее действие пружин, что результирующее усилие торможения будет соответствовать заданной скорости двигателя. Если скорость привода (например, подъемной лебедки) стремится превзойти эту заданную величину, то частота и напряжение роторной цепи падают и тормозящее усилие возрастает. При снижении скорости процесс происходит в обратном порядке. В описываемой схеме применено комбинированное регулирование, на малых скоростях регулирование происходит описанным образом, на больших — реостатом в цепи ротора.

(Revue d'Electricité et de Mécanique, № 84, 1951. M. Saurel et Chalançon)

Инж. Ю. И. АНОСОВ



В комиссии по истории физико-математических наук

12 января 1951 г. Комиссия по истории физико-математических наук ОФМН Академии наук СССР посвятила свое заседание чествованию члена комиссии профессора **Михаила Андреевича Шателена** по случаю его 85-летия со дня рождения и 60-летия научной, педагогической и общественной деятельности¹.

Заседание началось с доклада юбиляра «О подготовке к изданию трудов Б. С. Якоби по электрическим измерениям» в серии «Классики науки»². Большинство известных работ Б. С. Якоби связано с его исследованиями в области электромагнитных машин, гальванопластики, телеграфа и т. д. Менее известны его работы, касающиеся электрических измерений, и если известны, то главным образом по его трудам по международной метрологии. Между тем работы Якоби по электрическим измерениям представляют большой исторический интерес, как характеризующие современный ему круг научных интересов, в частности и самого А. С. Якоби в области измерений электрических величин. Б. С. Якоби была проведена в этой области чрезвычайно интересная работа. Он первый пытался найти связь между отклонениями гальванометров и током, определяемым помощью вольтметра, с целью соответственно проградуировать гальванометр. Этому вопросу посвящена большая его работа, представляющая безусловный интерес; она показывает эволюцию мысли тогдашних физиков в области измерения тока. Вторая группа работ Б. С. Якоби вытекла из первой. Для того чтобы можно было пользоваться вольтметром не как измерителем количества электричества, а как измерителем тока, нужно было поддерживать ток постоянным, для чего требовалась специальная аппаратура, и Б. С. Якоби предложил свой знаменитый эометр, применявшийся им также для измерения сопротивлений. Отдельная группа работ относится к приборам, связанным с магнитными измерениями, которые Б. С. Якоби выполнял и самостоятельно, и совместно с Э. Х. Ленцем.

В заключение М. А. Шателен сообщил о завершении переводов всех работ Б. С. Якоби по электроизмерениям, о готовности части комментариев, справочного материала и биографического очерка.

Заместитель председателя комиссии член-корр. Академии наук СССР Т. П. Кравец обратился к М. А. Шателену с приветственным словом, в котором осветил весьма ценное участие М. А. Шателена в работе комиссии за последние несколько лет. Михаил Андреевич сделал два доклада по истории науки на сессии Академии наук СССР и затем — два превосходных доклада на заседании комиссии, а сейчас он выступил с докладом о подготовке новой книги. М. А. Шателен написал замечательную книгу по истории электротехники, за которую был удостоен Сталинской премии.

— Позвольте пожелать Михаилу Андреевичу, — сказал в заключение Т. П. Кравец, — чтобы через пять лет, в новый юбилей Михаила Андреевича, мы увидели бы его в такой же прекрасной форме, с такой же работоспособностью, здоровьем и активностью, как и сегодня.

Затем слово для приветствия было предоставлено А. Ф. Иоффе, В. И. Смирнову, Н. И. Идельсону и А. А. Гершу.

Акад. А. Ф. Иоффе указал, что Михаил Андреевич Шателен приложил в течение более чем полувека исклю-

чительные усилия для развития в России одной из новейших областей техники — электротехники. Из всех наук, с которыми мне приходилось иметь дело, — от А. Ф. Иоффе, — особенно глубокое и постоянное уважение я чувствовал к Михаилу Андреевичу как к человеку, который на протяжении всех лет последовательно вел жизнь прогрессивного ученого, патриота своего отечества. Михаил Андреевич прожил богатую жизнь, история нашей страны претерпевала за эти годы величайшие преобразования, и всегда М. А. Шателен был на передовых позициях, ни при каких условиях не отступая от принципиальной линии передового русского ученого. Создание отечественной электротехники как научно-технического направления неразрывно связано с именем Михаила Андреевича с его научной и организационной работой — следует напомнить только о его деятельности, связанной с высшей электротехнической школой — об электрических измерениях в электротехнике, но и об области высоких напряжений. Я знаю, как Михаил Андреевич, воюя с отсталыми взглядами, создал много лет назад опытную высоковольтную лабораторию, повысил ее напряжение с 30 000 до 100 000 в; в содействии в Ленинградском политехническом институте была создана экспериментальная установка на напряжение 600 000 в. Я хорошо помню, когда мы приступили в свое время к первым опытам воздействия на атомное ядро, нам потребовалось напряжение порядка полмиллион вольт и такая энергетическая база была создана при непосредственном и ближайшем участии Михаила Андреевича Шателена.

Акад. В. И. Смирнов в теплых выражениях приветствовал юбиляра, который «в своем лице продемонстрировал победу над временем, сохранив хорошее здоровье и энергию, которую Михаил Андреевич использует с такой пользой для науки и техники».

Проф. Н. И. Идельсон подчеркнул, что М. А. Шателен уже в юные годы посвятил себя науке. Еще в детстве он участвовал в наблюдениях полного солнечного затмения вместе с А. С. Поповым в Красноярске. Эта эдисония была организована Русским астрономическим обществом под руководством Н. Г. Егорова и решала тонкие вопросы одной из самых молодых тогда астрофизики.

Проф. А. А. Гершун приветствовал Михаила Андреевича от имени советских светотехников, старейших и одним из руководителей которых является М. А. Шателен. Россия во многом обязана ему в постановке этой дисциплины о технике освещения, в создании своих эталонов, в установлении световых единиц, в расстановке приоритета и мощи русской светотехники. Достоянием М. А. Шателена широко развернулась в эти годы после Великой Октябрьской социалистической революции. «Светотехника — дитя оптики и электротехники, которому Михаил Андреевич посвятил много своих сил и забот», — заключил А. А. Гершун.

С ответным словом выступил М. А. Шателен: «Я знаю, что сказать... Конечно, я чувствую себя неким именинником, хотя и пытался избежать какого-либо жеманства. Но все, что здесь говорилось будто обо мне, это обо мне. Я прожил 85 лет, а за 85 лет, будь ты кем угодно, а все-таки кое что сделаешь, вот сделал. Хорошо или плохо — скажет будущее!»

В заключение М. А. Шателен выразил свою признательность всем присутствующим за их сердечное внимание.

На этом же заседании комиссии были заслушаны доклады члена-корр. Академии наук СССР Я. И. Ф.

¹ Статью о юбиляре см. *Электричество*, № 2, 1951.

² Статья М. А. Шателена «Работы Б. С. Якоби в области электрических измерений» опубликована в журнале *Электричество*, № 9, 1950.

«Работа М. В. Ломоносова об атмосферном электричестве и развитие этой теории новейшее время» и кандидата техн. наук И. Лурье «Работы Б. С. Якоби в области электрических взрывов».

Работа М. В. Ломоносова «Слово о явлениях воздушных, от электрических сил происходящих» содержит очень важных соображений о вертикальном перемещении воздушных слоев, устанавливая (впервые) причины циклонного равновесия воздуха, а также ряд высказываний по динамической метеорологии и по климатологии (в частности, о континентальном и морском климате). Являемая Ломоносовым концепция является передовой его времени. В заключение Я. И. Френкель изложил ценную схему возникновения и поддержания электрического тока в атмосфере.

Остановившись коротко на предложенном П. Л. Шиллером в 1812 г. способе воспламенения пороха электрическим и на первых этапах практического использования этого способа в лейб-гвардии саперном батальоне (с 1832—1837 г.), А. И. Лурье отметил, что из отчета генерала Шиллера о практических занятиях лейб-гвардии саперного батальона видно, что параллельное использование электрических законов Кирхгофа. К разработке практических электрических проблем электрического взрыва в 1838 г. был привлечен акад. Б. С. Якоби, перед которым был поставлен ряд проблем и, в частности: создание более совершенного источника тока, разработка ценных изолированных проводников, создание под-

водных гальванических мин, разработка наставления и подготовка кадров гальванеров. Работая над разрешением этих задач, Б. С. Якоби создал большую платиновозинковую батарею и магнитоэлектрическую взрывную машину, а также изобрел «платиновый» запал — прообраз современных запалов. С 1840 по 1847 г. Б. С. Якоби работал над созданием подводных и сухопутных гальванических мин, как управляемых по проводам, так и самовоспламеняющихся, причем, анализируя неудачу одного из опытов воспламенения пороха в Кронштадте, произведенном на расстоянии (из Ораниенбаума, 1842 г.), пришел к выводу о том, что вода может служить обратным проводом при электрическом воспламенении мин, что в дальнейшем им было широко использовано. С 1849—1850 г. Б. С. Якоби работал над усовершенствованием подводных мин; в результате этой работы им было устранено ложное срабатывание мин от волн и были усовершенствованы корпуса мин, что позволило создать надежные мины, пригодные для практического использования при устройстве минных заграждений у Кронштадта в 1853—1854 гг. Б. С. Якоби внедрил в практику взрывных работ магнитоэлектрические взрывные машинки и электроизмерительные приборы, позволившие проверять исправность жил и изоляции проводов, а также первый использовал воду и землю вместо обратного провода на больших расстояниях.

М. И. РАДОВСКИЙ

Ученый секретарь Комиссии по истории физ.-матем. наук ОФМН



Совещание по использованию ветроэнергии

В июне 1951 г. Азербайджанское отделение ВНИТОЭ совместно с Энергетическим институтом им. Есманя Акад. наук Азербайджанской ССР провело республиканское совещание по использованию ветроэнергии в Азербайджане.

Апшеронский полуостров и вся прибрежная часть Азербайджанской ССР богаты ветрами большой силы и скорости, что создает особенно благоприятные условия для рационального использования энергии ветра в одном хозяйстве республики (водоподъем, водоснабжение, орошение, добыча нефти тартажем из скважин, катальный дренаж, радиофикация сел и колхозов, защита подземных трубопроводов и кабелей от вив и др.).

На совещании были заслушаны доклады: канд. техн. Л. М. Логова о современном состоянии ветроиспользования и возможном его развитии в Азербайджане; председателя колхоза им. Багирова Маштагинского района Б. Мамедова о результатах эксплуатации ветродвигателя ВД-4 местного заводского изготовления; инж. Сафарова об использовании ветродвигателей в качестве механических приводов; руководителя сектора по развитию ВСХВ при Совете Министров Азербайджанской ССР агронома С. С. Самедова о роли ветродвигателей в ирригационно-хозяйственном освоении земель Апшеронского полуострова с использованием вод Самур-Исфиджарского канала им. Сталина; инж. В. И. Есманя о ветроулавливающих ветронасосных установках.

Председатель колхоза им. Багирова Б. Мамедов в своем выше докладе сообщил участникам совещания, что ветродвигатель ВД-4, изготовленный заводом № 3

ММП Азербайджанской ССР, работая в течение суток 12—15 час с производительностью 1—2 л/сек, обеспечивает колхоз питьевой и хозяйственной водой. Опыт эксплуатации ВД-4 показал, что его можно рекомендовать колхозам и совхозам Апшерона для широкого применения.

Республиканское совещание наметило ряд мероприятий, в частности: организацию серийного выпуска ветродвигателей и организацию при Академии наук АЗССР ветроэнергетической лаборатории для разрешения ряда вопросов. В их числе предусмотрено: изучение метеорологических особенностей и основных энергетических параметров ветра, разработка рабочих схем ветроэнергетических машин; экспериментально-опытная проверка в природных условиях и на испытательных стендах новых типов машин и усовершенствований старых машин; использование быстроходных ветродвигателей, уже освоенных отечественной промышленностью и проверенных в эксплуатации при радиофикации сел и колхозов Апшеронского полуострова, Прикаспийской зоны и ветряных горных районов республики; использование быстроходных ветроэлектроагрегатов при катодной защите от коррозии подземных металлических сооружений (трубопровода и кабелей), обычно имеющих большую протяженность, на открытых для ветра участках. Совещание признало важным широко популяризировать вопросы практического ветроиспользования в Азербайджане.

Инж. И. М. ПЕТРОВ

Зампредседателя Азгитоз



Л. Р. НЕЙМАН. РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ. 191 стр., ц. 7 руб.
Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для высших учебных заведений. Госэнергоиздат, 1950.

Книга состоит из введения, описаний 20 лабораторных работ и приложения, содержащего таблицы цилиндрических функций и эллиптических интегралов.

Во введении рассмотрены некоторые измерительные методы, а именно баллистическое измерение электрического заряда и магнитного потока, измерение компенсатором малых э. д. с. и сопротивлений и измерение намагничивающей (магнитодвижущей) силы. Здесь же дано подробное изложение теории компенсатора, спроектированного автором.

Лабораторные работы посвящены разнообразным темам. Большую группу (шесть названий) составляют работы, связанные с исследованием потенциальных полей; в описании этих работ дано изложение элементов теории моделирования. В трех работах изучаются механические взаимодействия контуров тока, равно как и заряженных тел. Две работы знакомят студентов с поверхностным эффектом. По одной работе отведено таким темам, как исследование магнитного поля цилиндрической катушки, намагничивание однородным полем тел формы эллипсоидов вращения, магнитные экраны, волны в волноводе, излучающий диполь. Остальные четыре работы — двухпроводная линия, разветвленная магнитная цепь, взаимная индуктивность двух катушек, определение потенциальных коэффициентов — изучаются в книге методами теории цепей, а не теорией поля. Однако не так уж важно, в какой именно лаборатории находится данная работа.

Описания работ придана единообразная форма. Каждое описание состоит из трех частей: 1) описание установки; 2) задача и метод исследования; 3) обработка результатов экспериментального исследования.

Описания даны применительно к установкам, имеющимся в лаборатории Ленинградского политехнического института им. Калинина. Составлены они весьма подробно и содержат даже численные характеристики установок и объектов исследования. Большое количество чертежей (всего их в книге 79) делает изложение вполне наглядным.

Изложение задач и методов исследования содержит обширный теоретический материал, данный частично в виде ссылок на известный учебник П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана «Теоретические основы электротехники»¹, частично в виде извлечений из этой же книги, частично в виде расчетных формул, относящихся к данной работе. Кроме того, здесь же даются подробные наставления о

порядке и приемах измерения, об устранении мешающих влияний, градуировке приборов и т. п.

Наконец, указания по обработке результатов показывают, как надо пересчитывать полученные из опытных, какие именно диаграммы должны быть построены, как их надлежит строить.

Книга предназначена для студентов и ставит целью оказать им помощь в их лабораторных занятиях. Невольно возникает вопрос, не является ли эта по-прежнему и не выполнил ли автор ту работу, которую в значительной части следовало бы возложить на студентов. В нашей педагогической работе мы часто грешим, что, сталкиваясь с неумением студента решить задачу, решаем ее вместо него; такая помощь обращается во вред.

Применительно к задачкам педагогическая литература нашла правильный путь, состоящий в том, что большая часть задач снабжается решениями, а для большинства задач даются лишь текст условия, схема и даводящие пояснения. Думается, что обучение решению лабораторных задач следовало бы производить же способом. Для половины задач надо давать описание типа тех, что содержатся в разбираемой книге, но все с одним изменением: из лабораторных описаний допустить полностью удален материал, имеющийся в учебнике. Другая половина описаний должна быть составлена так, чтобы студент испытывал определенные затруднения, ему приходилось искать ответ на возникающие вопросы, а не получать его в готовом виде. Совсем неплохо, в учебниках он не найдет прямых указаний и будет вынужден получать самостоятельно кое-какие из нужных результатов. Дело педагога — найти разумный путь этих трудностей.

Книга представляет немалый интерес не только студентам, но и для работников кафедр теоретической электротехники. Для многих периферийных институтов она будет служить ценным пособием при организации соответствующих лабораторий и постановке новых лабораторных работ. Ни про одну из описанных работ не скажешь, что она является лишней или устаревшей, и давая из них имеет право на существование. Вполне точным является и число работ: из имеющихся 20 отобрать десяток непохожих друг на друга задач, уже больше того, что позволяют дать учебные планы.

Внешность книги вполне удовлетворительна. Опечатки почти нет. Чертежи отчетливы. Язык правилен и

Доктор техн. наук, проф. В. Ю. ЛОМОНОСОВ
Московский энергетический институт им. М. В. Ломоносова

¹ Рецензия на этот учебник была помещена в журнале *Электричество*, № 5, 1950 стр. 88—93.



ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

К рецензии на книгу К. Г. Марквардта (*Электричество*, № 7, 1950)

Рассматривая книгу К. Г. Марквардта «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог», необходимо прежде всего отметить, что это первая книга по данной отрасли техники. Каким бы опытом ни обладал автор, сколько бы труда ни вложил в свою работу, трудно ожидать, чтобы он исчерпал все вопросы и не допустил бы никаких погрешностей. Поэтому исключительно важна роль критики, которая способствует устранению недостатков и определяет направление дальнейшей работы.

В печати появились две рецензии на эту книгу: написана акад. Г. М. Кржижановским (газета «Гудок» 7 июня 1950 г.), вторая — канд. техн. наук, доц. Е. Ботаревым (*Электричество*, № 7, 1950).

Эти рецензии дают различные оценки большому количеству положений, содержащихся в книге. В то время как первая дает в основном весьма положительную оценку, вторая — почти не находит в ней достоинств. Рассматривая эту книгу, впервые освещающую молодую отрасль

необходимо дать общую оценку позиций книги. Мы же, что этот труд ценен уже тем, что, используя советских электрифицированных дорог, автор воспротивил отживших теорий и представлений, намечает пути развития науки об электрической тяге, отбрасывает лучшее, что создали отечественные специалисты. Чеботарев ограничивается в основном рассмотрением недостатков и, как покажем ниже, вследствие неправильно приходится к общей отрицательной оценке книги.

Имея возможности в рамках настоящей статьи рассмотреть все замечания Е. В. Чеботарева, мы ниже остаемся на важнейших из них.

Первое замечание Е. В. Чеботарева относится к объему книги, якобы содержащей материал, «излишний для журнала». Так как книга является учебным пособием, то это замечание неправильно. Второе замечание относится к описательной части устройств энергоснабжения. Рецензент считает это описание лишним (излагаемым в других курсах), написанным крайне поверхностно, введенные сведения — случайными. Мы с этим не согласны. Автор поступил правильно, предпослав основному материалу книги раздел описательного характера, ценный всем устройствам системы энергоснабжения. Иные ее поэтому вполне возможно без экскурсий выйти по смежным вопросам.

Далее Е. В. Чеботарев обвиняет автора в нечетком изложении книги, так как изложение вопросов защиты от коротких замыканий якобы неправильно помещено в разных местах книги. Изложение связанных вопросов, конечно, желательно иметь в одном разделе книги. Но в этом случае рецензент упустил из виду, что секционные контактные сети, а следовательно, неразрывно связанные с ними принципы защиты от коротких замыканий можно рассматривать под изучением методов расчета энергоснабжения. Вслед за этим возможно изложение расчета защиты, так как ему должны предшествовать выбор сечения проводов, размещение и установление тяговых подстанций и нагрузок питательных проводов. Именно так построена и программа дисциплины «Энергоснабжение электрических железных дорог», утвержденная для транспортных вузов.

Е. В. Чеботарев считает, что в книге не следовало давать описание конструкций действующих выключателей. С этим замечанием следует согласиться — можно было ограничиться лишь их характеристиками, необходимыми для изложения вопросов защиты от коротких замыканий. Что касается вывода уравнения нарастания в цепи с R и L , то он занимает всего $1/2$ строки, дан мелким шрифтом и полезен для напоминания в вопросе.

Е. В. Чеботарев усматривает недостаточную систематизацию материала, освещающего принципы и схемы защиты. Это замечание несправедливо, так как именно в книге существующие и предлагаемые вновь схемы защиты систематизированы по принципу действия, рассмотрена физическая сущность и установлена взаимосвязь различных систем (§ 24—31).

Третье Е. В. Чеботарева в якобы поверхностном рассмотрении вопросов защиты кабелей постоянного тока (книги) не имеет оснований, так как автор изложил то, имелось в технике ко времени выхода его книги (гл. 1).

Наиболее резко обрушивается Е. В. Чеботарев на гл. III раздела, считая ее изложение поверхностным. Но гл. I отдела III книги определяет величины, которые должны быть найдены в результате расчетов энергоснабжения. Здесь дается описание назначения, содержащая особенности расчетов энергоснабжения, определяющая спецификой тяговых нагрузок и взаимной связью тяговой системы с ее потребителем — подвижным составом, характерной только для электрической тяги, т. е. являются физические процессы с точки зрения их учета в проектировании. Надо отметить, что многие из этих вопросов до сих пор нигде не излагались, но практика требует необходимости их постановки. Далее в этой главе намечаются величины, определение которых ставит задачи расчетов энергоснабжения, после чего (гл. 2) дается изложение методов расчета этих величин.

Утверждение Е. В. Чеботарева, что в гл. I «не подана разницы в подходе к расчету величин, опреде-

ляющих экономические и технические параметры», не соответствует действительности. Этому вопросу посвящен § 42 (пункт «г») с дальнейшей конкретизацией в § 56, 57 и 59 гл. 2. В § 42 (пункт «г») определена разница в подходе к выбору величин по экономическим принципам и к проверке их соответствия техническим нормам и условиям надежности работы.

В указанных выше параграфах гл. 2 новый подход к проектированию находит практическое применение в изложенной технике расчетов. Характеристики методов расчета, приведенные в § 45, 64 и 68 гл. 2, по-новому классифицируют методы, рассматривая их по тем исходным условиям, которые кладутся в основу метода (определенный график движения, средние размеры движения, действительные условия движения, допускающие в некоторых пределах изменение их размеров). Это дает возможность правильного выбора метода при решении практических задач, определяет границы применимости каждого метода и является одним из новшеств, которые вводит автор, положительно отмеченных в упомянутой рецензии Г. М. Кржижановского.

Вместе с тем, надо признать, что в этом разделе книги автором неудачно помещены характеристики каждого метода перед изложением его. Было бы лучше дать сравнительные характеристики методов в § 45 при общей их классификации.

Удивляет замечание о том, что в книге «чрезвычайно поверхностно затронут вопрос о допустимых толчках и колебаниях напряжения»... Можно было ожидать, что Е. В. Чеботареву известно, что этот вопрос не исследован до сих пор и еще невозможно вводить этот параметр в число расчетных величин. Е. В. Чеботарев отмечает далее то, что «не подчеркнута роль режима напряжений в сети, определяющего качество энергии, подводимой к подвижному составу». Это не что иное, как завуалированное сожаление об опровержении в книге старой точки зрения в этой области, приведшей к жесткому нормированию потерь напряжения (10%), заимствованной из практики зарубежных железных дорог. В книге уделено внимание вопросу режима напряжений в сети (§ 41, 42, 43, 72, 123), но лишь с позиций, принципиально иных, чем те, которых очевидно, продолжает придерживаться Е. В. Чеботарев.

Замечание о малом объеме материала по нагреванию проводов должно относиться к гл. 2 (§ 60). Об этом замечании следует сказать, что бессмысленно требовать от автора помещения материала, которого нет. В § 60 сказано, но четко изложены существующие нормы и даны указания на новейшие источники их обоснования, вышедшие уже в процессе издания книги (работа А. В. Воронича по исследованию нагревания проводов контактной сети).

Относительно заголовка гл. 2 отдела III мы согласны с замечанием Е. В. Чеботарева. Следовало бы автору книги под указанным заголовком объединить гл. 2, 3 и 4 отдела III. Возражения же против разделения методов, основанных на анализе графика движения, данного в книге, по меньшей мере непонятны. По этому вопросу Г. М. Кржижановский пишет: «Показав его несовершенство (метода равномерного сечения графика движения—М. К.), автор предлагает новые методы анализа графика движения, обеспечивающие значительно более точные результаты. Это — методы непрерывного исследования графика и характерных сечений. Почему же Е. В. Чеботарев стремится защитить явно порочный, заимствованный на заре развития в СССР электрификации железных дорог из зарубежной техники метод, когда ему на смену пришел более совершенный, созданный советским специалистом? Мы не видим смысла и необходимости подчинять эти методы отжившему методу. Попытка Е. В. Чеботарева заимствовать метод непрерывного исследования графика движения напрасна, так как этот метод успешно применяется в дипломном проектировании, в практике проектирования метрополитена и заслуженно считается наиболее удобным и точным.

Замечания Е. В. Чеботарева, относящиеся к гл. 3 и 4 отдела III, заслуживают подробного анализа. Нам кажется естественным, что изложение методов, неоднократно опубликованных, и метода, публикуемого впервые, должно занимать резко различный объем. Автор книги показывает приоритет отечественных ученых в создании методики расчетов энергоснабжения в их исторической связи, естественно заменяя более совершенным предшествовавшие.

В этом ничего противозаконного нет. Было бы по меньшей мере странно, если бы автор более совершенного метода не настаивал бы на его внедрении. Полезно отметить, что при издании книги Трансжелдориздт созывал совещание, в котором приняли участие представители Главного управления электрификации, Транстехпроект и ВНИИ МПС, по вопросу о включении в книгу метода, разработанного автором. По решению этого совещания метод и был включен. Другое дело, что Е. В. Чеботарев не согласен с тем, что предлагаемый автором метод более совершенен (более того, Е. В. Чеботарев отвергает метод автора книги, называя его неудачной попыткой уточнения влияния случайных колебаний числа поездов).

Автор расширил применение теории вероятности. Благодаря этому проектирование системы энергоснабжения значительно приближается к практике. Основанный на теории вероятности новый метод является крупным шагом вперед в создании научно обоснованной методологии расчета системы энергоснабжения. Ценность этого метода еще и в том, что он может быть использован для решения и других научных задач в данной области. Можно уверенно сказать, что этот раздел — центральная и наиболее интересная часть книги.

Принципиальное отличие нового метода от предыдущих заключается в отказе от исходной величины — среднего числа поездов и любого их размещения на участке. Среднее число поездов как расчетный параметр неизбежно приводил к единственному нереальному графику движения — параллельному, с равными интервалами между поездами. Допущение же любого размещения поездов на участке (вплоть до нахождения их в одной точке) противоречит первому положению. Естественно, что проектировщики, пользовавшиеся такими методами, не имели необходимости интересоваться действительными условиями движения (влияющими на работу системы энергоснабжения) и по мнению многих из них не могли представить себе, в какой мере получаемые результаты соответствуют действительности. Метод автора книги принципиально нов и правильно назван методом, основанным на учете действительных размеров и организации движения, так как исходными величинами являются параметры, определение которых невозможно без анализа действительных или намечаемых условий движения. Для расчетов по этому методу необходимо знать, какие графики возможны на данном участке дороги; какова пропускная способность, связанная с расположением раздельных пунктов, данными сигнализации и блокировки, техническими скоростями поездов, их типами, характером движения каждого типа поезда, пропускной способностью станции и т. д. Каждая исходная величина оказывает влияние на параметры энергоснабжения и имеет определенную связь с действительностью, а следовательно, и смысл. Е. В. Чеботарев приписывает этому методу ориентацию на стихийность движения. Однако последняя была сущностью старых методов и как раз заслугой автора нового метода является устранение стихийности, ориентация на действительные (возможные) графики движения. Число возможных нитей графика определяется действительной пропускной способностью или заданным графиком движения. Действительное же размещение поездов по этим нитям зависит от заданных размеров движения и регуляторных мероприятий диспетчера, имеющего право в нужном случае перемещать поезда в нитях. В новом методе соответственно действительным условиям поезда могут располагаться только согласно правилам движения (а не как угодно), следовать только по нитям графика. Способы учета организации движения в этом методе подвергались обсуждению специального совещания работников движения в НТС МПС и получили положительную оценку. Следует указать, что расчеты по этому методу успешно применялись Транстехпроект и Лентрансстроем МПС, ЦЭ МПС, ВНИИ МПС и в ряде транспортных вузов (например, МЭМИИТ, ДИИТ) и использованы в инструкции по проектированию контактной сети, принятой Союзтрансстроем к внедрению в практику проектирования. Следовательно, Е. В. Чеботарев неправ.

Замечание о том, что «в рецензируемой книге не затронут вопрос об аналитическом расчете максимальных нагрузок», неверно, так как в § 76 книги этот вопрос освещен в такой мере, в какой это оказалось возможным.

при современном его состоянии. Учет влияния на напряжения на нагрузки тяговой сети качественно на стр. 210, а в приближенных формулах (стр. 40) выраженных через расход энергии, возможна и истинная оценка и здесь упрек Е. В. Чеботарева неведлив, так как относится к материалу еще не ботанному или, во всяком случае, не опубликованному. Уже после выхода книги под руководством ее разработана методика такого учета, данная в уже вышедшей инструкции.

Совершенно бездоказательно, без ссылок, Е. В. тарев заявляет о том, что формулы § 111 приня Ю. Е. Рывкину. Чтобы доказать, что это обвинение имствовании необосновано, приведем справки из самого Ю. Е. Рывкина («Электрическая тяга поездов» редакцией В. Е. Розенфельда, 1940 г., гл. XXI). На с. 10 Ю. Е. Рывкин пишет: «Приводимые ниже выражения для токов и потенциалов рельсовой сети разработаны инж. К. Г. Марквардом», и на стр. 750: «На основании выводов инж. К. Г. Маркварда» — далее следуют части формул, помещенных в разделе V рассматриваемой книги. Далее на стр. 755 Ю. Е. Рывкин отмечает: «Наиболее общего случая питания равномерно распределенной нагрузки от одной подстанции инж. К. Г. Марквардом предложена следующая схема расчета» — далее следуют выводы формул, опубликованных теперь в § V книги. Наконец, на стр. 761 Ю. Е. Рывкин, цитируя выражения (589) и (595) (т. е. выражения, выведенные К. Г. Марквардом), получает для частного случая в формулах коэффициенты, что права авторства не дает.

Перейдем к возражениям Е. В. Чеботарева по гл. I. Автор книги пользовался экономическими методами, существовавшими к моменту выхода книги. До сих пор нечего нового в этом вопросе нет, что хорошо известно Е. В. Чеботареву. С замечанием о том, что в книге исторической справки, необходимо согласиться и это не так серьезный недостаток книги. Однако роль исторических сведений в создании данной отрасли науки и техники в значительной мере показана в книге соответствующими ссылками и указаниями.

Е. В. Чеботарев искажает смысл изложенного в вопросе о системах тока и напряжения, умалчивая о том, что упоминание о работах зарубежных железных дорог сделано с целью показать, что буржуазная наука, и в частности у капиталистических фирм, «доказывает» преимущества той системы, которая угодна фирме. Отсутствие ссылки на работу, проводившуюся по вопросам систем тока и напряжения в Академии наук СССР, вызвано обстоятельством, что результаты указанной работы опубликованы и теперь в Академии наук СССР ведется новая работа этой темы. Неправильно также обвинение, что большая часть справки о системах тока и напряжения посвящена иностранным дорогам. В действительности в книге иллюстрации из иностранных источников относятся лишь к системам переменного тока, которая не применяется в нашей стране.

Отмечая, что «Вообще в книге крайне скудно отражены опыт электрических железных дорог СССР», Е. В. Чеботарев заблуждается. Книга составлена с учетом более 20-летнего опыта работы электрических железных дорог в СССР. В книге действительно мало уделено внимания вопросам эксплуатации системы энергоснабжения (отмечено Г. М. Кржижановским), что бесспорно является недостатком книги, но не дает основания для обвинений в отношении Е. В. Чеботарева. Из 132 параграфов 68 посвящено расчетам, созданным на базе изучения наших дорог. Из остальных 64 параграфов 60 посвящены (за исключением нескольких страниц в § 17 и 38) опыту наших дорог, и только в четырех параграфах, посвященных описаниям систем, не принятым в нашей стране, используются зарубежные источники.

Наконец, Е. В. Чеботарев переходит к «ошибкам» автора книги. Мы не будем останавливаться на той горсти «ошибок», которые явились результатом небрежности при издании книги. Эти небрежности и опечатки действительно имеющие место в книге, снижают ее качество и должны быть устранены в дальнейшем. Ол обвинять автора книги в незнании элементарных вещей нет никаких оснований. Остановимся на принципиальных вопросах, которые Е. В. Чеботарев считает ошибочными.

Обвиняя автора книги в неправильном признании най-дей характеристик тягового двигателя связь $F \cdot v = \text{const}$, Е. В. Чеботарев исходит из ошибочного положения, что такая характеристика невыгодна в отношении скоростей движения поезда (см. стр. 160 «Электрика тяга поездов» под редакцией В. Е. Розенфельда). В действительности же характеристика $F \cdot v = \text{const}$ является наивыгоднейшей и ошибается не автор книги, а Чеботарев, так как сравнивать тяговые двигатели характеристикам можно только при равной мощности того расчетного режима (часового или режима работы на руководящем подъеме), а при этом станет ясно, в отношении скорости выгоднее характеристика, приближающаяся к $F \cdot v = \text{const}$, так как режимы с мощностью более указанной расчетной используются лишь кратковременно, а при всех других рабочих режимах характеристика $F \cdot v = \text{const}$ по скорости лежит выше всякой.

Е. В. Чеботарев относит указание об отсутствии индукции в сети постоянного тока к элементарной физике. Так как здесь предполагаются равновесные процессы, то в книге все верно и упрек вызывает удивление. Е. В. Чеботарев утверждает, что мысль автора, изложенная на стр. 209, о том, что изменение напряжения вызывает меньшее относительное изменение скорости поезда, ошибочно и даже приводит

ду $v = \frac{U - IR}{C\Phi}$, которая якобы это доказывает.

з стр. 209 книги показано, что изменения скорости изительно пропорциональны изменению напряжения в период движения при установившейся скорости, как средняя скорость (о которой идет речь) определяется режимом движения по автоматической характеристике, пусковым периодом, периодами выбега и торможения, из которых три последние или вовсе не зависят изменения напряжения, или зависят в малой степени, влияя скорость, несомненно, падает в меньшей степени напряжение. Формула, приводимая рецензентом, утверждает его обвинение. Она относится к движению непригодна в данном случае, так как рассматривается изменение напряжения под влиянием падений на-

пряжения в сети, и величина напряжения зависит от токов поездов и их расположения.

Значит ли, однако, что, отрицая справедливость рецензии Е. В. Чеботарева, мы отрицаем и наличие недостатков в рассматриваемой книге? Нет, не значит. Отмечая наличие недостатков книги, как то: отсутствие исторической справки, систематически и полно иллюстрирующей приоритет нашей науки; наличие большого количества досадных опечаток и небрежностей, отсутствие материала об эксплуатационных системах энергоснабжения; недостаточное количество справочных материалов; неудачная редакция изложения в ряде мест книги — нельзя считать, что эти недостатки умаляют ее основные достоинства. Недостатки должны быть устранены, а достоинства — развиты.

Нам кажется, что при переиздании книги надо иметь в виду, кроме отмеченного выше, еще следующее:

1. При изложении метода расчета системы энергоснабжения, учитывающего действительные размеры и организацию движения, не приводить всех сложных выводов, ограничившись лишь принципиальной их стороной.

2. Формулы указанного метода свести в таблицы, давая их для всех основных расчетных схем, что создаст значительные удобства для пользования.

3. Дать конкретные указания о том, в каких случаях следует использовать формулы той или другой степени точности.

4. Подобные же изменения следует сделать и при изложении вопросов теории блуждающих токов, дополнив этот раздел практическими данными по расчетным схемам и величинам.

5. Сократить объем гл. 3 за счет описаний конструкций, несколько развив вопросы эксплуатации.

6. Исключить полемическую часть гл. 7, так как нормирование потери напряжения уже изъят из практики проектирования.

7. Выделить отдельный раздел о системах тока и напряжения электрических железных дорог, дополнив его описанием принципа построения и условий расчета системы постоянного тока с распределенным питанием.

Кандидат техн. наук М. Е. КРЕСТЬЯНОВ
Московский электротехнический институт
инженеров транспорта им. Дзержинского

ОТ РЕДАКЦИИ

Как уже отмечалось при опубликовании рецензии Е. В. Чеботарева (Электричество, № 7, 1950, стр. 96), обсуждение ее на совещании электротехнических кафедр Энергетического факультета Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта им. Образцова закончилось одобрением содержащейся в рецензии Е. В. Чеботарева оценки книги К. Г. Марквардта. Помещая отзыв М. Е. Крестьянова, редакция считает целесообразным, чтобы обстоятельное рассмотрение всех поднятых вопросов, на основе дальнейшего свободного обмена мнений представителей различных точек зрения, было проведено на кафедрах соответствующих вузов и на объединенном совещании при Главном управлении учебных заведений МПС с привлечением представителей вузов, не находящихся в системе МПС.



В. НИКУЛИН. ПРОИЗВОДСТВО ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ. 148 стр., + вклейка, ц. 5 руб. 90 коп.
Госэнергоиздат, 1951.

фарфоровые изоляторы, являясь существенным и одним элементом электрической системы, требуют юго и квалифицированного надзора за их эксплуатацией. Знакомство с основными свойствами фарфоровых изоляторов и технологий их производства позволяет структурам и эксплуатационникам более правильно решать вопросы, связанные с применением высококачественных фарфоровых изоляторов.

В книге, посвященной производству фарфоровых изоляторов, главным образом для технологических высших учебных заведений, подробно освещаются специальные вопросы керами-

ческого сырья, физико-химические образования фарфорового черепка и процессы технологии производства фарфоровых изделий вообще. Эти труды мало доступны для специалистов-электриков. Вместе с тем имеющаяся литература сравнительно мало освещает такие специальные вопросы, как свойства изоляторов, технологии армирования и методы испытания готовых изоляторов.

Входящая в серию книг по электрической изоляции, изданных по инициативе Всесоюзного бюро электрической изоляции, книга канд. техн. наук, доц. Н. В. Никулина «Производство фарфоровых изоляторов» предназначена для широких кругов электриков, обычно хорошо знакомых

с техникой эксплуатации изоляторов, но мало сведущих в вопросах технологии их изготовления и электромеханических свойств фарфора и готовых изоляторов. В соответствии с указанным назначением книги в ней в общей форме излагаются основные вопросы, связанные с технологией производства фарфоровых изоляторов.

Книга разделена на десять глав, в которых последовательно излагается весь технологический процесс изготовления фарфоровых высоковольтных изоляторов, начиная с описания употребляемых сырых материалов и кончая армированием и испытанием готовых изоляторов. Приводятся данные о применяемом типовом оборудовании, сушильных и печных установках (устройство, основные характеристики, режимы работы), а также данные по основным технологическим режимам. Автор описывает и некоторые новые, применяемые в промышленности, методы изготовления изоляторов, каковы прессформовка, многорезцовая оправка изоляторов и др. В конце книги приложен достаточно полный перечень имеющейся литературы по производству высоковольтных изоляторов.

Однако книга не лишена и некоторых недостатков. В отдельных местах несколько упрощенно и не совсем точно объясняются некоторые процессы. Так, например, на стр. 108 говорится, что при температуре 300—400°С изделия, теряя влагу, сокращают свой объем, т. е. происходит «усадка». Фактически же при указанной температуре обжига изделия еще не претерпевают почти никаких усадочных изменений; последние начинаются при гораздо более высокой температуре обжига и полностью заканчиваются при спекании черепка. Физико-химические процессы, создающие структуру материала, начинаются

значительно ниже температуры спекания фарфора (1350°С), как об этом сказано в книге. На стр. 95 точно объяснено явление «зскипа» глазури и сказано о необходимости строго выдерживать восстановительный газовый режим в интервале температур 950—1100°С с целью предупреждения образования «вырв».

Следует отметить встречающиеся в книге ошибки. Так, на стр. 47 сказано, что «для шликера требуется большая степень помола», а на стр. 48 — что крупность помола для литейного шликера должна быть на 3% больше (по остатку на сите № 100) для формовочных масс. Таким образом, получается, что помола литейного шликера не больше, а меньше, чем для формовочных масс. На стр. 50 указывается влажность изоляторов, прошедших цикл сушки, быть в пределах 1—3%, а на стр. 96, что она не превышать 1%. На стр. 52 говорится, что против фарфоровой тестообразной массы достигается с поршневых прессов, а на рис. 28 показан винтовой пресс.

Неудачны некоторые выражения, например, «растворение в воде глины и каолинов» (стр. 34) и др. Уместнее было бы сказать «распускание» или «размывание» в воде. Отдельные места книги нуждаются в тщательном редактировании.

Сделанные замечания не снижают общей ценности книги, выпуск которой является вполне своевременным и актуальным.

Кандидат техн. наук В. Г. АВЕЕВ



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике (Издания 1951 г.)

АШКЕНАЗИ Г. П. ЗАДАЧНИК ПО СВЕТОТЕХНИКЕ (для энергетических и электротехнических вузов и факультетов). 80 стр. + 5 л. графиков, ц. 5 руб. 40 коп.

БЕЛЯКОВ А. И. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ВОКРУГ НАС (Естественно-научная библиотечка школьника). 88 стр., ц. 1 руб. 20 коп. Детгиз.

ВОРОВЬЕВ А. И., КАЦЕНЬСОН О. Г. ТЕРМОБИМЕТАЛЛ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И АВТОМАТИКЕ, 127 стр., ц. 4 руб. 55 коп. Госэнергоиздат.

МИХАЙЛОВ В. В. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЫ. 224 стр., ц. 9 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ ПОСТАВКИ ПРОДУКЦИИ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ, 36 стр., цена не указана. МЭП.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещать рецензии.

ПОГОСЯН И. Н. ПОДЗЕМНЫЕ ЛИНИИ РАДИОФИКАЦИИ. Строительство и эксплуатации. 48 стр. 22 л. илл., ц. 2 руб. 50 коп. Связьиздат.

РИВКИН Г. А. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ. 256 стр., ц. 10 руб. Госэнергоиздат.

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕМОНТУ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ МЭС. 32 стр., ц. 1 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

СЕНА Л. А. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. 3-е изд. 184 стр., ц. 5 руб. Гостехиздат.

СВЭН Ш. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ. Перевод. 64 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Издательство иностранной литературы.

ТЕОРИЯ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ. Сост. группой авт. под ред. Х. Джеймса и др. Перевод с англ. М. С. Либманда и др. под ред. Я. З. Цыпкина. 484 стр., ц. 25 руб. 50 коп. Издательство иностранной литературы.



ПОПРАВКА

В статье В. В. Андреева «К расчету переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях в цепях с последовательно включенной емкостью», Электричество, № 5, 1951 г., на стр. 65, правая колонка, 16-я строка сверху, следует читать $(-\hat{A})$ и формула (8) должна иметь вид:

$$\ddot{i}_b = \ddot{i}_0 + a^2 \ddot{i}(+) + a \ddot{i}(-)$$