

1934

„Коммунизм есть советская власть
плюс электрификация всей страны“.
ЛЕНИН

17 - СЕН 1934

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

№ 8

М А Й

ВЫПУСК 2



МОСКВА
ЛЕНИНГРАД

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

О Н Т И**ЭНЕРГОИЗДАТ****ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1934 ГОД**

НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ОРГАН ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
Ф. ДЗЕРЖИНСКОГО

ИЗВЕСТИЯ ВТИ**10** номеров в годГод издания **10-й**

Журнал рассчитан на инженеров, работников теплосилового хозяйства, работников исследовательских институтов, лабораторий и учащихся вузов.

Дает статьи по технико-экономическим вопросам и вопросам теоретической теплотехники.

Дает научно-исследовательские работы лабораторий ВТИ и родственных организаций.

Имеет отдел критики и библиографии (по союзной и иностранной литературе).

Отрывает новый отдел консультации и ответов на запросы читателей по вопросам, связанным с программой журнала и работами ВТИ.

Дает хронику научной жизни ВТИ, родственных организаций и иностранной теплотехники.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на 1 год . . . 20 руб.

„ 6 мес. . . 10 руб.

В 1934 г. обращено особое внимание
на аккуратную рассылку журнала подписчикам.

Подписку на журнал и деньги направляйте по адресу:

Москва, 19. Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“.

Подписку также принимают почтовые отделения, письмоноscopy, магазины ОНТИ и КОГИЗ'а.

О Н Т И**Энергоиздат****ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1934 г. НА ЖУРНАЛ****„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“****Год издания 55-й**

Орган Главэнергопрома и Главэнерго НКТП, Энергетического ин-та академии наук СССР и Всесоюзного энергетического комитета рабочей, научной и инженерно-технической общественности (ВЭН-РНИТЭ)

20 номеров в год**Подписная цена:**

на 12 мес. . . 25 р. —

на 6 мес. . . 12 р. 50 к.

на 3 мес. . . 6 р. 25 к.

Отдельн. номер 1 р. 25 к.

В группе энергетических журналов СССР „Электричество“ является основным руководящим научно-техническим органом, рассчитанным на квалифицированных работников электропромышленности и электрохозяйства.

Программа журнала: Современные научно-исследовательские, теоретические и практические проблемы электротехники и, в частности, вопросы электро-машино- и аппаратостроения и техники высоких напряжений. Наиболее важные технические и технико-экономические вопросы проектирования, строительства и эксплуатации электростанций и вопросы электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Освещение работы электротехнических научно-исследовательских институтов и крупнейших лабораторий. Освещение работы важнейших энергетических съездов, конференций и ВЭНИТО. Основные вопросы подготовки кадров, рационализации и стандартизации в электропромышленности и электрохозяйстве. Критическая библиография о вновь выходящей электротехнической литературе. Обзоры электрификации СССР и капиталистических стран. Рефераты на статьи в иностранной электротехнической печати.

Подписку на журналы и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“.

Подписка принимается отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗ'а, всеми почтовыми отделениями и письмоноscopyми.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8

1934

М А Й

Орган ГЛАВЭНЕРГОПРОМА и ГЛАВЭНЕРГО НКТП, Энергетического института Академии наук СССР и Всесоюзного энергетического комитета рабочей, научной и инженерно-технической общественности (ВЭК—РНТО)
 Адрес редакции: Москва, Неглинная, 6/2, тел. 65-84.

СОДЕРЖАНИЕ

| ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ | Стр. | ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ | Стр. |
|---|------|---|------|
| <i>Инж. В. А. Трапезников</i> — Принципы проектирования серий электрических машин | 1 | <i>Инж. Е. Г. Марквардт</i> — Вихревые токи в ферромагнитных телах | 35 |
| <i>Проф. Л. В. Дрейер</i> — Метод нахождения новых возможных типов электромашин, основанных на электромагнитной индукции | 5 | К РАСЧЕТУ НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ | |
| <i>Инж. И. И. Славцев</i> — Влияние тепловых явлений на закон возрастающих мощностей Видмара для электрических машин | 6 | <i>Инж. С. Н. Никогосов, инж. Б. Л. Айзенберг, инж. М. Н. Карасик</i> — Еще о спорных вопросах проектирования низковольтных сетей | 43 |
| <i>Инж. Г. И. Штурман</i> — Количественный учет эффекта Gögges'a в асинхронных машинах | 9 | НОРМЫ И СТАНДАРТЫ | |
| ИЗ РАБОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ | | <i>Инж. В. В. Додев</i> — К вопросу об изменении классификации и норм испытания крановых электродвигателей | 49 |
| <i>Инж. В. А. Карасев</i> — Градиенты перенапряжения в обмотке трансформатора. Координирование уровня изоляции витков и катушек | 14 | ХРОНИКА | 53 |
| <i>Проф. А. Г. Белявский</i> — Теоретические основания работы механического вибрационного выпрямителя и возможность упрощения его конструкции | 22 | БИБЛИОГРАФИЯ | 55 |
| <i>Инж. Н. Н. Соколов</i> — Пробивное напряжение оксида алюминия | 31 | ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ | 57 |
| | | РАЗНОЕ | 62 |

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ

Принципы проектирования серий электрических машин

Инж. Трапезников В. А.
 Москва, Оргэнерго

Развитие техники последних десятилетий характеризуется озрастанием роли электродвигателя, ставшего неотъемлемой частью почти каждого механизма. По мере его внедрения в промышленность идет все большая дифференциация, двигатели начинают выполняться в различных модификациях, приспособленных к специальным условиям работы, и одновременно с этим расширяется диапазон скоростей вращения. Если десяток лет назад машина какой-либо мощности строилась на весьма ограниченный диапазон скоростей и для изменения скорости применялась ременная передача, то теперь в связи с требованиями повышенной надежности широко развилось непосредственное сцепление электродвигателя орудием, и диапазон скоростей электромашин резко возрос. В качестве примера можно указать на машины мощностью 1 000 kW при 3 000 об/мин для турбокомпрессоров и машины 1 000 kW при 107 об/мин для компрессоров поршневого типа.

Огромное расширение области работы электромашин и увеличение числа выпускаемых разновидностей поставило перед производством задачу максимальной стандартизации выпускаемых изделий.

Параллельно с усложнением производства растет значение правильного проектирования машин. Теперь расчет и

проектирование какой-либо машины не мыслятся обособленно, и машина проектируется не как индивидуальная единица, а как часть общего производственного целого. Индивидуально проектируются лишь весьма крупные единицы, но, несомненно, в дальнейшем и они будут подчинены общему плану.

Правильная увязка между отдельными типами, правильная планировка серий в значительной степени решают вопрос об упрощении производства и снижении стоимости выпускаемых изделий. Особенно значение эти вопросы приобретают в нашем хозяйстве, где планирование может быть проведено не только в масштабе одного завода но и в гораздо более широких пределах. Однако до сих пор вопросам проектирования серий электрических машин в литературе было уделено весьма незначительное место, и поэтому не безынтересно осветить эту область.

Итак, нашей задачей будет являться рассмотрение вопросов, связанных с правильной планировкой серий электрических машин.

Мы рассмотрим этот вопрос в первую очередь для машин переменного тока, поскольку они выполняются в значительно более широких диапазонах мощности и скорости вращения. Серией мы называем гармонически построенный ряд машин возрастающей мощности, связанных между собой об-

щностью конструкции. Серия может включать несколько модификаций отличающихся:

- 1) по роду вентиляции (открытое исполнение, продуваемое исполнение, с замкнутой циркуляцией воздуха и др.);
- 2) по роду соединения с приводом (с горизонтальным валом, с вертикальным валом, фланцевое исполнение и др.).

В целях упрощения производства все эти модификации имеют большинство общих конструктивных деталей и вполне одинаковые размеры активных частей и станины. Наибольшим распространением пользуются открытые машины с горизонтальным валом, поэтому обычно серия проектируется применительно к ним. Остальные модификации являются производными от основной.

Как же спроектировать серию машин, сделав ее наиболее экономичной?

Очевидно, нужно удовлетворить условиям минимума стоимости материалов и минимума стоимости производства. Легко видеть, что эти два условия противоречат одно другому и не могут быть выполнены одновременно. Действительно, пусть мы хотим дать N машин различной мощности. Для каждой из этих машин можно найти размеры, обеспечивающие наименьшую ее стоимость¹⁾, но подобное решение дало бы нам N независимых по размерам машин и повело бы к недопустимому усложнению производства благодаря необходимости иметь N комплектов отливок, приспособлений, мерительного инструмента и пр.

Необходимость упростить производство вынуждает нас отступить от наивыгоднейших соотношений, объединяя часть деталей смежных типов. В первую очередь приходится объединять основные размеры активного железа, изменяя соотношения между диаметром и длиной.

Что же выгоднее: объединять у смежных типов диаметры или длины? Очевидно, большее значение имеет диаметр, поскольку он определяет такие существенные детали, как штамп, щит и ряд приспособлений (оправки, планшайбы и др.). Поэтому отступать от наших N независимых решений следует, объединяя диаметры. Получение требуемой мощности достигается изменением длины железа при сохранении диаметра с тем, чтобы обеспечить необходимое D^2L при неизменном D .

Однако чрезмерное сокращение числа диаметров приводит к отрицательному результату: облегчая производство, мы вынуждены отступать от наивыгоднейших соотношений, в результате чего общая стоимость возрастает. Наиболее общий принцип следующий: чем больше количественный выпуск машин данной мощности, тем меньше следует делать отклонения от наивыгоднейших размеров, т. е. тем большее разнообразие диаметров допустимо.

Центр тяжести выпуска лежит в области мелких машин порядка 5 kW. По мере увеличения мощности выпуск уменьшается. Поэтому целесообразно в области мелких машин иметь большее разнообразие диаметров и меньшее количество длин при каждом диаметре. Обычно мелкие машины имеют 2, максимум 3 длины для каждого из диаметров (фирма AEG выполнила серию DA с одной длиной для каждого диаметра). Средние и крупные машины могут иметь большее число длин (3—5 длин для каждого из диаметров).

Хорошо развитая серия должна включать машины на всевозможные скорости вращения. Легко видеть, что при полном использовании материала каждая скорость вращения требует различного соотношения между внешним и внутренним диаметрами. Это ясно из следующего:

Обозначив Φ — магнитный поток на полюс, B_{cp} — среднюю индукцию в воздухе, B_j — индукцию в ярме, τ — полюсное деление (см), L — длину железа (см), h_j — высоту ярма (см), k_2 — коэффициент заполнения железа, можем написать:

$$\Phi = B_{cp} \tau L;$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2L \cdot h_j \cdot k_2},$$

тогда

$$h_j = \frac{B_{cp} \cdot \tau}{2 \cdot B_j \cdot k_2}.$$

Отсюда видно, что с увеличением числа полюсов и уменьшением полюсного деления высота ярма уменьшается, т. е. соотношение между внешним и внутренним диаметрами меняется при изменении числа полюсов.

Выше мы пришли к необходимости объединения диаметров смежных типов. При этом, однако, возникает вопрос, какие диаметры нужно объединять — внешние или внутренние? Прежде было принято объединять внутренний диаметр статора, однако рост выпуска машин и необходимость упрощения производства показали неправильность такого приема. Причины этого следующие: наружный диаметр железа определяет собой размер станины и щита, т. е. наиболее громоздких и дорогих неактивных частей машины, тогда как внутренний диаметр железа определяет лишь незначительное число

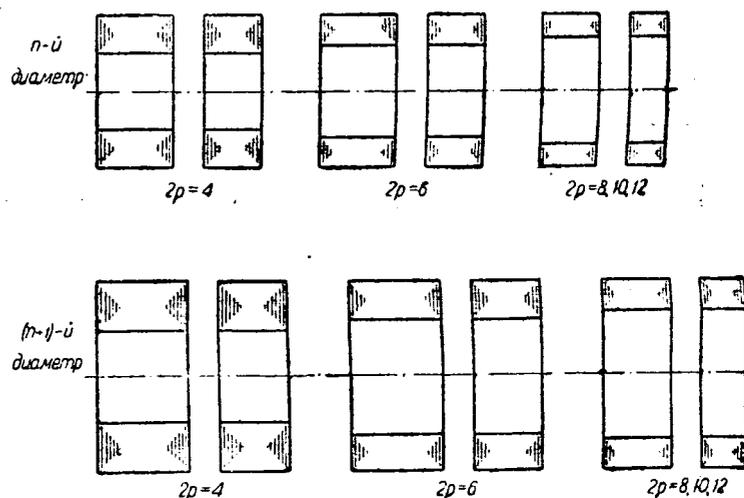


Рис. 1

вспомогательных приспособлений и мерительного инструмента. Отсюда следует, что серию следует осуществлять с наименьшим количеством внешних диаметров.

Мы видели, что каждое число полюсов требует различного соотношения между внешним и внутренним диаметрами, а потому, объединив внешние диаметры, мы вынуждены менять внутренний в зависимости от числа полюсов машины. Очевидно, для каждого числа полюсов можно найти значение внутреннего диаметра статора, дающее наилучшее использование материала, но выполнение отдельного диаметра для каждого числа полюсов привело бы к чрезмерному усложнению производства. Поэтому мирятся с некоторым перерасходом материала и ограничиваются тремя, максимум четырьмя внутренними диаметрами при одном внешнем, выполняя машины на несколько чисел полюсов при том же диаметре. Например, при сохранении внешнего диаметра:

| | |
|---|---------------------------------|
| Наименьший внутренний диаметр соответствует | $2p = 4$ |
| Средний | " " " $2p = 6$ |
| Наибольший | " " " $2p = 8, 10, 12$ полюсам. |

Необходимо еще рассмотреть вопрос о напряжении машины. Разнообразие условий эксплуатации требует выполнения одного и того же типа машины на различные напряжения. Это осуществляется путем подбора соответствующих обмоточных данных статора при сохранении штампа железа. Обмотка ротора как синхронной, так и асинхронной машин при выполнении статора на различные напряжения остается без изменения. Мощность машины при переходе на более высокое напряжение снижается благодаря утолщению изоляции и ухудшению заполнения паза. Отметим, что размер паза выбирается по наибольшему напряжению, на которое может быть выполнена машина.

¹⁾ Обычно с этой точки зрения в руководствах и подходят к рас-

Таблица 1

Мощность асинхронных двигателей серии АТ (в kW)

| № диаметра | Число пакетов (длин на железе) | Число полюсов | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 2p=4 | | 2p=6 | | 2p=8 | | 2p=10 | | 2p=12 | | 2p=14 | | 2p=16 | | 2p=18 | | 2p=20 | | |
| 13 | 4 | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | | | | | | | | | |
| | 5 | 250 | 250 | 190 | 190 | 100 | 140 | 80 | 90 | 75 | 75 | | | | | | | | | |
| | 6 | 300 | 300 | 225 | 225 | 140 | 150 | 100 | 115 | 95 | 95 | | | | | | | | | |
| | 7 | 350 | 350 | 260 | 260 | 170 | 180 | 125 | 140 | 115 | 115 | | | | | | | | | |
| 14 | 4 | 6 000 V | 3 000 V | 6 000 V | 4 000 V | 3 000 V | 5 000 V | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | | | | | | | |
| | 5 | 350 | 350 | 250 | 250 | 195 | 210 | 150 | 170 | 130 | 140 | 3 000 V | 500 V | | | | | | | |
| | 6 | 410 | 410 | 300 | 300 | 235 | 255 | 185 | 205 | 155 | 170 | | 80 | | | | | | | |
| | 7 | 480 | 480 | 350 | 350 | 275 | 300 | 210 | 240 | 200 | 200 | | 105 | | | | | | | |
| 15 | 4 | | | 6 000 V | 3 000 V | 3 000 V | 500 V | 3 000 V | 500 V | | | |
| | 5 | | | 350 | 375 | 275 | 300 | 200 | 235 | 180 | 180 | 225 | 190 | 125 | 135 | 100 | 120 | | | |
| | 6 | | | 440 | 460 | 340 | 370 | 245 | 280 | 220 | 225 | 270 | 155 | 165 | 125 | 150 | 150 | | | |
| | 7 | | | 520 | 550 | 400 | 430 | 290 | 330 | | | | 235 | 200 | 150 | 210 | | | | |
| 16 | 4 | | | 6 000 V | 3 000 V | 6 000 V |
| | 5 | | | 550 | 625 | 435 | 475 | 340 | 390 | 270 | 310 | 230 | 270 | 190 | 200 | 200 | 235 | 130 | 130 | 130 |
| | 6 | | | 675 | 750 | 525 | 560 | 415 | 470 | 325 | 375 | 275 | 320 | 235 | 250 | 250 | 220 | 175 | 175 | 175 |
| | 7 | | | 800 | 875 | 610 | 650 | 485 | 550 | 330 | 440 | 320 | 375 | 275 | 290 | 290 | 235 | 220 | 220 | 220 |
| | 8 | | | 900 | 1 000 | 700 | 750 | 550 | 625 | 435 | 500 | 370 | 430 | 300 | 330 | 330 | 235 | 250 | 250 | 250 |
| | 10 | | | 1 150 | 1 250 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | 1 350 | 1 500 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Таким образом мы пришли к планировке серии, схематически изображенной на рис. 1. Серия состоит из ряда машин с возрастающими внешними диаметрами, из которых показаны *n*-й и (*n* + 1)-й. Каждому внешнему диаметру (габариту) соответствует несколько длин железа и несколько внутренних диаметров соответственно различному числу полюсов. Кроме того, все типы могут выполняться на несколько напряжений при сохранении размеров активного железа.

Из теории машин известно, что окружная скорость

$$v_{(m/sec)} = \tau_{(cm)} \frac{f}{50}$$

Нормальные открытые моторы строятся до окружных скоростей порядка 40 м/сек. При дальнейшем разрастании скорости вентиляционный шум делается чрезмерным, и для его заглушения машину приходится выполнять закрытой со специальным подводом воздуха.

Итак, при *f* = 50 Hz окружной скоростью определяется верхний предел полюсного деления $\tau_{max} = 40$ см. Нижний предел полюсного деления определяется его механическими размерами.

Для получения удовлетворительных характеристик машины выполняют с числом пазов на полюс и фазу $q \geq 2$. При трехфазной машине с пазом шириной около 10 мм, при ширине зубца около 10 мм и $q = 2$ получаем $\tau_{min} = 12$ см. Обычно минимальное полюсное деление делают $\tau = 15$ см. Мелкие машины с полузакрытым пазом могут иметь $\tau = 7$ см.

Из сказанного следует, что границы серии определяются величиной полюсного деления.

Поскольку мощность на полюс тесно связана с величиной полюсного деления³⁾, можно дать пределы выполнимости серии в несколько иной форме. Мощность нормальных машин переменного тока, приходящихся на один полюс при полузакрытых пазах, составляет примерно

$$\frac{kW_1}{2p} = 0,4 - 12,$$

при открытых пазах

$$\frac{kW_1}{2p} = 6 - 300.$$

Этими пределами определяется граница серии нормальных машин.

Ознакомившись с общей планировкой серии, рассмотрим ее проектирование. Здесь может быть два подхода:

- 1) задаваясь рядом мощностей, выбираем на основании их размеры машин;
- 2) задаваясь процентом прироста мощности, подбираем ряд диаметров и длин и по ним подбираем те мощности, которые можно вмести в данный габарит.

Пакет железа

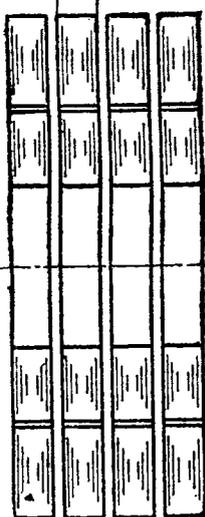


Рис. 2

Для упрощения производства объединяются не только размеры одной и той же, но и различных серий. Так, например, всегда объединяются основные размеры железа станин и щитов синхронных и асинхронных машин. Построение гармонически развитой серии легко проследить на примере серии асинхронных моторов АТ²⁾. Серия АТ выполнена с радиальной системой вентиляции, для чего активное железо разделено вентиляционными каналами на ряд „пакетов“ (рис. 2). В табл. 1 приведены мощности открытых машин в пределах от 13-го до 16-го внешних диаметров при различных длинах железа (число пакетов), числа полюсов и напряжениях. Жирными линиями отделен переход от одного внутреннего диаметра к другому. Из данных, приведенных в этой таблице, хорошо видна общая планировка серии, включающей значительное число разновидностей.

Посмотрим теперь, чем ограничивается серия. Из табл. 1 видно, что машины по мощности располагаются в виде лестницы, идущей из левого верхнего в правый нижний угол; иначе говоря, с возрастанием диаметра и мощности машины могут быть построены лишь все более и более тиходными. С другой стороны, тиходные машины могут быть построены, начиная лишь с некоторой минимальной мощности.

Можно показать, что пределами, ограничивающими серию, являются величина полюсного деления и окружная скорость.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

³⁾ Основные размеры серии асинхронных машин АТ

Второй принцип ⁴⁾, который можно назвать „принципом постоянства габаритов“, следует признать более правильным. Он основан на двух предпосылках:

1) характер производства и наличие вспомогательных приспособлений определяется не мощностью машины, а ее геометрическими размерами;

2) при ряде машин, геометрически правильно построенном, расходы материалов будут минимальными.

Задаваясь рядом связанных между собой механических размеров, например, диаметров, длин, мы получим ряд плавно нарастающих мощностей. Если интервалы между соседними габаритами были выбраны достаточно мелкими, то мы практически всегда можем получить нужную нам мощность, воспользовавшись одной из имеющихся моделей. С другой стороны, в случае какого-либо улучшения в изготовлении материалов (улучшение качества изоляции, железа) мы от одной и той же модели, не меняя ее основных размеров, можем получить большую мощность. Отсюда ясно, что проектируя серию, мы должны отдать предпочтение геометрическим размерам перед мощностью и развивать серию с геометрически правильными соотношениями.

Итак, мы подошли к разбивке серии.

Первым вопросом является выбор ряда внешних диаметров. Интересно отметить, что абсолютная величина диаметра не имеет значения. Важны лишь число диаметров и процент прироста их, определяющий как процент прироста мощности, так и пределы соотношения между длиной машины и ее диаметром. Как мы уже отмечали, процент прироста диаметра возрастает по мере возрастания величины диаметра. В малых машинах прирост диаметра может быть порядка 15—20%, в крупных машинах — порядка 30%.

При выборе диаметра следует руководствоваться следующими соображениями:

а) выбирать диаметр таким образом, чтобы нормальный лист железа (у нас нормальный лист 1000×2000 мм) давал наименьшее количество отходов (например, диаметры 330, 495, 995 дадут мало отходов);

б) выбирать диаметры, ранее применявшиеся на заводе, с целью использования имеющихся приспособлений измерительного инструмента.

Отметим, что руководствоваться этими соображениями нужно постольку, поскольку это не ведет к значительному искажению планомерности серии.

Следующим этапом является наметка внутренних диаметров. Обычно одному внешнему соответствуют три внутренних. Эта наметка ведется, исходя из „глубины сегмента“ (рис. 3), которая для ходовых полюсных делений колеблется в сравнительно узких пределах.

Наконец, намечаются числа полюсов, выполняемые соответственно каждому из внутренних диаметров.

Для машин больших диаметров глубина сегмента может быть намечена заранее; для мелких машин глубину сегмента (внутренний диаметр) в процессе расчета приходится уточнять.

Мы имеем теперь диаметры и полюсные деления.

Исходя из наивыгоднейших пределов отношения $\frac{L}{\tau}$, мо-

⁴⁾ Этот принцип был положен в основу проектирования серий электрических машин, производившегося под руководством инж. Шредера.

жно наметить пределы длин железа для каждого из диаметров ⁵⁾.

Наконец, мы намечаем величины воздушных зазоров, а для синхронных машин — примерные величины полюсных башмаков, причем в целях упрощения производства полюса машин с близкими полюсными делениями, но разных диаметров, следует объединять ⁶⁾. Таким образом мы получаем ряд основных габаритов серии.

Далее, в намеченных основных габаритах распределяются пазы, и приводится уточнение диаметров и окончательный расчет машины.

Для машин постоянного тока разбивка серии несколько упрощается. Как правило, машины постоянного тока выполняются на меньшие диапазоны скоростей сравнительно с машинами переменного тока. Другое существенное отличие машин постоянного тока состоит в том, что скорость вращения машины не связана жестко с числом полюсов. Последнее позволяет сохранить механические размеры машины при выполнении ее на различные скорости, изменяя при этом лишь обмоточные данные (сопровождаемые иногда изменением числа пазов).

Особенностью машин постоянного тока является наличие коллектора, что, естественно, кладет отпечаток и на планировку серии. Коллекторы также должны быть объединены в ряд, согласованный с рядом диаметров якоря. Каждому диаметру коллектора соответствует несколько его длин (2—3) применительно к машинам на несколько напряжений и к машинам того же диаметра, но различной мощности (длина железа).

Теперь можно привести сравнение серий машин постоянного и переменного токов.

Машины переменного тока объединены в ряд внешних диаметров статора, причем каждому внешнему диаметру соответствует несколько внутренних, в то время как в серии машин постоянного тока каждому внешнему диаметру якоря соответствует лишь один внутренний (один диаметр станины и один штамп полюса). Штамп железа машины переменного тока при том же диаметре и числе полюсов обычно сохраняется независимо от длины и напряжения, а в серии машин постоянного тока число пазов и конфигурация паза могут меняться с изменением длины железа и напряжения. Это связано с наличием коллектора, ограничивающего выбор числа пазов.

Наконец, серия машин постоянного тока помимо ряда размеров железа включает также ряд коллекторов.

Однако независимо от типа машин общая идея серии должна быть сохранена: серия представляет собой геометрически правильный ряд машин, причем каждая машина рассматривается лишь как часть единого производственного целого.

Мы дали краткую обрисовку вопроса проектирования серий, без рассмотрения которого в настоящее время немалым проектирование машины вообще. Между тем, за весьма малыми исключениями (например, Hobart) имеющиеся литературные источники этого вопроса не затрагивают. Это особенно недопустимо у нас в связи с необходимостью подготовки инженеров, стоящих на современном уровне мировой техники и способных вести максимальную рационализацию в производство, а потому необходимо, чтобы пособия по расчету машин, выпускаемые для наших вузов, затрагивали этот вопрос, рассматривали каждую машину не индивидуально, а как часть единого производственного целого, находящуюся с ним в неразрывной связи.

27/3—34 г.

⁵⁾ Вопросы правильного выбора процента прироста диаметров соотношения $\frac{L}{\tau}$ и др. являются основными при проектировании серий, и мы их рассмотрим в отдельной работе.

⁶⁾ Такое объединение удастся провести, начиная примерно от внутренних диаметров статора около 1500 мм и выше.

Метод нахождения новых возможных типов электро-машин, основанных на электромагнитной индукции.

Проф. Л. В. Дрейер
Москва

Ниже изложен окончательный результат работы о нахождении метода, который дал бы возможность ответить на вопрос: возможно ли еще изобрести новые электрические машины, основанные на электромагнитной индукции, и если возможно, то какие они должны быть?

Этот вопрос можно поставить и так: исчерпываются ли существующими электрическими машинами указанного рода все возможные типы машин, основанные на электромагнитной индукции?

Таким образом поставленный вопрос соприкасается с плановым изобретательством в данной области. Основы метода в следующем. Принцип электромагнитной индукции

и все существующие и могущие быть электрические машины в самом основном принципиально необходимом можно свести к двум элементам — двум виткам проводника. Назначение одного витка — создавать магнитное поле, назначение другого витка — воспринимать энергию этого магнитного поля и переводить ее или в электрическую или в механическую энергию. Эти витки могут быть неподвижные или подвижные (оба или любой из них). Виток будет подвижным, если мы его механически вращаем или он сам вращается под действием протекающего в нем тока от постороннего источника.

Затем в проводнике витков может возникнуть или виток может питаться постоянным или переменным током.

| II | | I Неподвижная | | | | | | Подвижная | | | | | | |
|-------------|----------------|----------------|---|---------|---|--------|---------|----------------------------------|--------|---------|----------------|--------|---------|-----|
| | | Постоянный ток | | | Переменный ток | | | Постоянный ток | | | Переменный ток | | | |
| | | непоср | кольца | коллект | непоср | кольца | коллект | непоср | кольца | коллект | непоср | кольца | коллект | |
| Неподвижная | Постоянный ток | непоср | | | IV-1 | | | VIII-1 | IX-1 | | XI-1 | XII-1 | I | |
| | | кольца | | | | | | | | | | | II | |
| | | коллект | | | | | | | | | | | | III |
| | Переменный ток | непоср | Генератор индукционный | | Трансформатор | | | VIII-4 | IX-4 | X-4 | XI-4 | XII-4 | IV | |
| | | кольца | | | | | | | | | | | V | |
| | | коллект | | | | | | | | | | | VI | |
| Подвижная | Постоянный ток | непоср | | | | | | | | | | | VII | |
| | | кольца | Универсальная машина | | ? | | | ? | IX-8 | | XI-8 | XII-8 | VIII | |
| | | коллект | Генератор и двигатель пост. тока | | ? | | | Генератор и двигатель пост. тока | ? | | XI-9 | XII-9 | IX | |
| | Переменный ток | непоср | | | Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором | | | | | | | | X | |
| | | кольца | Генератор и синхронный двигатель переменного тока | | Асинхронный трехфазный двигатель с фазным ротором | | | ? | ? | | ? | XII-11 | XI | |
| | | коллект | ? | | Коллект двигателя Сервис репульсионный коллекторный двигатель | | | ? | ? | | ? | ? | XII | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |

И наконец, эти витки могут соединяться с внешней цепью для получения или отдачи тока тремя способами: с помощью колец, через коллектор или непосредственно, т. е. подводиться прямо и соединяться с началом и концом проводника витка или накоротко замыкаться. Вот три основных характерных элемента.

Значит, каждый из двух витков может быть или подвижным или неподвижным, питаться постоянным или переменным током и быть связанным с внешней цепью непосредственно через кольца или через коллектор.

Можно составить таблицу: сверху по горизонтали будут помещены все комбинации первого витка, а сбоку вертикально — все комбинации второго витка. Таких комбинаций каждого витка 12. Любая комбинация первого витка может сочетаться с любой комбинацией второго витка и таким образом получается 144 сочетания. На таблице получится 144 квадрата. Часть этих сочетаний отпадает как невозможные, например, обе обмотки неподвижные и питаются постоянным током, или подвижная обмотка, а способ соединения непосредственный с сетью и т. п. Затем надо отбросить симметричные сочетания, например, первая обмотка (виток) подвижная — постоянный ток — коллектор, а вторая обмотка неподвижная — постоянный ток — непосредственное соединение; это одно сочетание, а симметричное ему будет: первая обмотка неподвижная — постоянный ток — непосредственное соединение, а вторая подвижная — постоянный ток — коллектор. Первое и второе сочетания равноценны.

Отбрасывая все указанные невозможные и симметричные сочетания, остается из 144 только 20 сочетаний-квадратов таблицы. Из них 9 уже заняты существующими типами машин (генераторы, двигатели, трансформаторы).

Сюда относятся следующие основные типы:

- 1) клетка IV-1 — генератор индукционного типа, где изменение величины магнитного поля достигается изменением сопротивления магнитной цепи;
- 2) „ VIII-1 — униполярная динамомашинка;
- 3) „ IX-1 — динамомашинка и двигатель постоянного тока;
- 4) „ XI-1 — генератор переменного (и трехфазного) тока и синхронный двигатель;
- 5) „ IV-4 — трансформатор;
- 6) „ X-4 — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;

- 7) „ XI-4 — асинхронный двигатель с фазовым ротором и кольцами;
- 8) „ XII-4 — коллекторный двигатель переменного тока типа репульсионного и сериес;
- 9) „ IX-8 — генератор и двигатель постоянного тока.

Если мы в этих типах сделаем неподвижную часть подвижной, а подвижную неподвижной, то придем к машинам хотя конструктивно другим, но тип машины и ее характеристики останутся те же, что мною выше и названы симметричными и исключены как по существу не новые. Так, например, если в динамомашине сделать якорь с коллектором неподвижным, а вращать индуктор со щетками, то придем к клетке I-9, аналогичной (симметричной) IX-1. Такая конструкция и предлагалась и испытывалась, но не нашла себе применения как нерациональная в эксплуатации и более сложная. Не раз предлагалась и была построена и испытана динамомашинка, у которой вращался и индуктор и якорь в противоположные стороны. Такая машина относится к клетке IX-8 или к симметричной VIII-9. Эти машины также не нашли себе применения, будучи сложными и не дающими преимуществ перед типом IX-1.

Возможно, что среди предлагаемых в свое время машин и соответствующих патентов найдутся такие типы машин, которые мною не отмечены и которых я не знаю, поэтому может быть, и осталась в таблице какая-либо незаполненная клетка. Очень интересно было бы ее заполнить. Я лишь полагаю, что не может быть такой машины, которая не нашла бы себе места в соответствующей клетке моей таблицы.

Затем надо указать, что в таблице находят себе место основные типы машин, а не комбинации двух типов машин, как, например, умформер. Эти комбинации или сочетания основных типов охватывают не одну, а две клетки и могут быть обозначены так: IX-I-XI. Эти сочетания второго порядка являются материалом для другой таблицы (здесь не указанной).

В схему таблицы не вошел также способ соединения обмоток с цепью с помощью ионных коммутаторов, так как в конечном счете их роль та же, что коллектора.

Остаются незанятыми 11 сочетаний (квадратов таблицы). Вот эти-то сочетания и должны быть продуманы изобретателями, — нет ли среди них основ для новых машин с новыми свойствами или более технически рациональными, чем существующие.

19/3 — 34 г.

Влияние тепловых явлений на закон возрастающих мощностей Видмара для электрических машин

Инж. И. И. Славцев
Москва

Закон возрастающих мощностей

Видмаром установлен закон возрастающих мощностей электрических машин ¹⁾. Если не исключать элемент времени и электромагнитные параметры, которые определяются физическими свойствами проводников электрического тока и магнитного потока, системой охлаждения, свойствами изоляционных материалов (главным образом их теплостойкостью) и электромагнитными свойствами машин, зависящими от их типа, то закон возрастающих мощностей имеет вид

$$P_{[kVA]} \equiv fsB_1Q_{el}Q_k \equiv fsBL^4. \quad (1)$$

Машину так называемого постоянного тока в ее обычной форме можно рассматривать как комбинацию „синхронной“ машины с выступающими полюсами и механического выпрямителя — коллектор плюс щетки.

В этой общей форме закон Видмара приводит к двум положениям относительно возрастания мощностей при неизменной плотности тока s и индукции B :

- 1) мощности увеличиваются пропорционально частоте ($P_{[kVA]} \equiv f_{[Hz]}$),
- 2) пропорционально четвертой степени линейных размеров ($P_{[kVA]} \equiv L^4$).

Оба эти положения ограничиваются максимально допустимыми линейными скоростями на поверхности вращающихся частей, а в машинах с коллекторами — условиями коммутации, вызывая необходимость изменения геометрических форм при увеличении линейных размеров.

Кроме того, первое положение ограничивается свойствами железа, подвергаемого перемагничиванию, так как с возрастанием частоты увеличиваются потери в нем и уменьшается использование сечения железного листа при данной толщине его. Поэтому при возрастающих частотах приходится переходить к другим сортам железа (с увеличением ρ), снижать величину индукции B и уменьшать толщину железных листов Δ .

¹⁾ Видмар, Экономические законы проектирования электрических машин.

Второе же положение ($P_{[кВА]} \equiv L^4$) в машинах вращательного движения ограничивается, главным образом, условиями охлаждения обмоток, расположенных в замкнутых пазах.

На то, что с увеличением (линейных) размеров машины условия охлаждения их ухудшаются, указано уже Видмаром как следствие геометрического закона возрастающих мощностей. С увеличением линейных размеров объемы веса и потери возрастают пропорционально третьей степени их, а поверхности охлаждения только пропорционально второй степени. С увеличением поверхностных нагревов увеличиваются и внутренние теплопадения за счет удлинения путей теплового потока.

Цель настоящей статьи рассмотреть, в чем эти тепловые явления, заставляют отступать от электромагнитного геометрического закона подобия при возрастании мощностей. Другие причины ограничений, обусловленные электромагнитными свойствами машин, различными для различных машин, здесь не рассматриваются.

Машинная постоянная и закон Видмара

Если бы закон возрастающих мощностей в его чисто геометрической форме ($P_{[кВА]} \equiv L^4$) был применим для машин вращательного движения без ограничений, то мы должны были бы иметь для машинной постоянной Рихтера

$$\theta_s = \frac{P_{[кВА]}}{\pi^2 n^2 D^2 l_i} \equiv \frac{L^4}{L^3} = L. \quad (2)$$

В действительности же, кривая $\sigma_s = f(D)$, т. е., в сущности, $\sigma_s = f(L)$ имеет вид не прямой, а кривой, напоминающей кривую намагничивания железа, и в пределах машин больших размеров (мощностей) $\sigma_s \approx \text{const}$. Причину этого надо искать в другом уравнении для σ_s . Это есть известное уравнение Рихтера:

$$\sigma_s = f_E f_w f_w \cdot AS \cdot B \cdot 10^{-5} \equiv AS \cdot B_p, \quad (3)$$

где $B = \alpha B_l$ — средняя индукция для всего воздушного зазора.

Оба множителя AS и B_p , входящие в величину машинной постоянной Рихтера, выраженные в зависимости от L ,

$$B_l = \Psi_1(D) = \chi(L)$$

$$AS = \Psi_2(D) = \chi(L)$$

сами изображаются кривыми, напоминающими кривые намагничивания.

Индукция B_l и линейная нагрузка AS

В малых машинах B_l невелико. Это обуславливается относительно большими размерами воздушного зазора, а для вращающихся внутренних якорей еще и максимальной индукцией в зубах, которые при углублении паза сильно сужаются книзу. По мере роста линейных размеров машины воздушный зазор относительно уменьшается, глубина пазов растет медленнее главных линейных размеров, и индукция в зубах становится более равномерной. Это дает возможность увеличивать индукцию в воздушном зазоре.

Но при достижении $B_l = 10\,000$, что приводит приблизительно к $B_s = 20\,000$, можно дальше уже принять $B_l = \text{const}$. Рассматривая закон возрастающих мощностей в чисто геометрической форме, мы могли бы и без этого рассмотреть просто положить $B_l = \text{const}$.

С линейной нагрузкой AS на первый взгляд дело обстоит несколько иначе. Величину AS можно выразить в виде

$$AS = \frac{m \cdot 2wI}{\pi D} = \frac{m \cdot 2wsq \cdot 10^2}{\pi D} = \frac{sQ_k \cdot 10^2}{\pi D} = s\Delta_k \cdot 10^2, \quad (4)$$

где Δ_k — толщина (в см, как и все остальные геометрические величины) медной обкладки машины — слоя голы меди, равномерно распределенной по поверхности машины, прилегающей к воздушному зазору; s — плотность тока (A/mm^2); Q_k — полное сечение меди (cm^2).

Плотность тока по мере роста размеров машин вначале несколько уменьшается, приближаясь к некоторой постоянной величине. Но это и удобно, когда закон возрастающих мощностей рассматривается в геометрической форме.

Полагая $s = \text{const}$, имеем $AS \equiv L$. В действительности же этого не наблюдается.

Для больших машин определенного типа $AS \approx \text{const}$. Следовательно, толщина медной обкладки при увеличении линейных размеров не изменяется. Причина этого — условия теплоотдачи с поверхности. Линейная нагрузка $AS = \frac{s \cdot AS}{s}$,

где $s \cdot AS$ — тепловой параметр машины, определяемый системой охлаждения, окружной скоростью, в особенности, если рассматривается вращающаяся часть, и классом изоляции. При $s = \text{const}$ имеем $AS \equiv s \cdot AS$.

Теплоотдача с единицы поверхности

Потери в меди при $t = 15 \div 20^\circ C$, преобразуемые в тепло, равны

$$W_k = I^2 r = I^2 \frac{l_m}{57q} = s^2 \frac{l_m q}{57} = 17,5 s^2 V_k \cdot 10^{-3} W, \quad (5)$$

где s — плотность тока (A/mm^2), V_k — объем меди (cm^3), l_m и q — длина провода и сечение обмотки (m и mm^2).

Отдача тепла от горячей обмотки, расположенной в пазах, с поверхности машины равна

$$\begin{aligned} Q' &= \frac{W_k}{O} = \frac{17,5(1 + \alpha\theta) s^2 l_i Q_k \cdot 10^{-3}}{\pi D l_i} = \\ &= 17,5(1 + \alpha\theta) \cdot 10^{-5} s \frac{s \cdot 10^2 \cdot Q_k}{\pi D} = \\ &= 17,5(1 + \alpha\theta) \cdot 10^{-5} s \cdot AS \cdot ASW/cm^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где линейные размеры якоря l_i и D и полное сечение меди Q_k — b см и cm^2 $a(1 + \alpha\theta) = 1,2 \div 1,4$ при температурах меди соответственно в 70 и $115^\circ C$.

В правую часть уравнения (6) отдачи тепла с поверхности машины надо внести еще различные поправочные коэффициенты (см. приложение 1). Объединяя их в один, уравнение (6) принимает вид

$$Q' = 17,5(1 + \alpha\theta) C_w \cdot 10^{-5} \cdot s \cdot AS, \quad (7)$$

где $C_w > 1$. Это уравнение связывает теплоотдачу с единицы поверхности якоря с температурой перегрева его медной обмотки над охлаждающей средой. Величина Q' , определяемая предельно допускаемой температурой перегрева меди θ (с поправкой на теплопадение в толще изоляции) и системой охлаждения, ставит границу для величины sAS , и при $s = \text{const}$

$$AS \approx Q'.$$

При этом предполагается также, что и поправочный коэффициент C_w , который учитывает добавочные потери в меди и потери в железе, в особенности в зубах, остается неизменным.

Глубина паза

Толщина медной обкладки определяет и глубину паза. Линейную нагрузку AS можно выразить еще в виде

$$\begin{aligned} AS &= \frac{sQ_k \cdot 10^2}{\pi D} = \frac{sZf_n a h_z \cdot 10^2}{\pi D} = \\ &= s f_n \frac{Za}{\pi D} h_z \cdot 10^2 = s f_n \frac{a}{t} h_z \cdot 10^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где Z — число пазов, a и h_z — ширина и глубина паза (см), f_n — коэффициент использования паза. Здесь полагаем

$$f_n = \frac{\text{сечение меди в пазу}}{ah_z},$$

т. е. рассматриваем всегда прямоугольный паз как открытый с высотой от основания его до поверхности машины. Он определяется размерами паза, меди, изоляции проводов и пазов, размерами клиньев в открытых пазах или закруглениями в полуоткрытых и закрытых пазах. Если напряжение машины при увеличении размеров ее не повышается, то благодаря увеличению сечения проводов и пазов f_n должно увеличиваться, но увеличение числа пазов на полюс и фазу должно опять приводить к условию $f \approx \text{const}$. В том же направлении действует и необходимость увеличения числа параллельных ветвей и транспозиция проводов.

$\frac{Za}{\pi D} = \frac{a}{t}$ — коэффициент использования поверхности якоря

прорезами пазов. При данной форме паза (открытый, полуоткрытый, закрытый) и определенных основаниях, принятых при проектировании серии, его можно принять постоянным.

Из уравнений (4) и (8) получаем:

$$\Delta_k = \frac{sAS}{s^2 \cdot 10^2} \equiv Q' \quad (\text{при } s = \text{const}) \quad (9)$$

и

$$h_a = \frac{sAS}{s^2 f_n \frac{a}{t} \cdot 10^2} = \frac{\Delta_k}{f_n \frac{a}{t}} \equiv Q' \quad (\text{при } s = \text{const}). \quad (10)$$

Здесь Δ_k и h_a — в см.

Эти уравнения, особенно (10), наглядно показывают, почему из-за тепловых явлений закон возрастающих мощностей Видмара не применим для больших машин вращательного движения, хотя условия $B_l = \text{const}$ и $s = \text{const}$ выполняются, как он того требует. При увеличении линейных размеров машин мы не можем увеличивать пропорционально толщину медной обкладки, а следовательно, и глубину паза из-за условий охлаждения. Только допуская более повышенный нагрев обмоток переходом к классу изоляции В или еще более стойкому, увеличивая отдачу тепла с единицы поверхности машины при той же разности температур между этой поверхностью и охлаждающей средой, можно приближаться к геометрическому закону возрастающих мощностей.

Трансформаторы

К трансформаторам закон возрастающих мощностей Видмара применим почти без ограничений. В трансформаторе с концентрической обмоткой изоляционный промежуток между первичной и вторичной обмотками можно уподобить воздушному зазору машин вращательного движения, а радиальный размер обмоток — глубине паза. Но в них охлаждающей среде (воздух или масло) открыт путь из зазора в глубину паза.

По этому пути и стремятся идти при постройке турбогенераторов, где воздушные каналы проходят под пазами или с еще большим эффектом рядом с ними в самых зубцах.

Правда, здесь путь несколько иной в смысле геометрической формы: охлаждающая среда идет вдоль пазов, а не в глубину их. Здесь сказывается отчасти влияние центробежных сил, действующих на охлаждающую среду и механические части.

Приложение 1

Для меди, расположенной в пазах, выражению отдачи с единицы поверхности якоря (ротора, статора) с учетом

влияния лобовых частей на средний нагрев всей меди можно придать несколько более полный вид, например:

$$Q' = 17,5 (1 + \alpha \delta) C_w \cdot 10^{-5} sAS = \\ = 17,5 (1 + \alpha \delta) C_k C_{ei} C_s \cdot 10^{-5} sAS. \quad (7)$$

$C_k = 1,05 \div 1,40$ учитывает добавочные потери в меди, обусловленные неравномерным распределением тока по сечению провода. Применением транспозиционных проводов можно снизить этот коэффициент почти до единицы.

$$C_{ei} = \frac{\frac{l_1}{l_m} W_k + W_a + \beta W_a}{\frac{l_1}{l_m} W_k}, \quad 0 < \beta < 1,$$

где l_1 и l_m — длина якоря и длина провода. Этот коэффициент учитывает влияние на нагрев поверхности якоря потерь в зубцах, которые налагаются на потери пазовой меди и отдаются вместе с ними как одно целое, а также и потерь в железе самого якоря (без зубцов). Множитель β зависит в сильной степени от системы охлаждения, так как потери в теле якоря лучше всего отводятся осевыми каналами.

Кроме того, на долю обмотки, расположенной в пазах, приходится не вся, а часто меньшая часть меди, а следовательно, и потерь в ней. Между тем, самая медь является хорошим проводником тепла. Конечно, трудно судить о том, помогают ли лобовые части охлаждению меди пазов, или, наоборот, от них идет тепло в пазы. Можно быть уверенным только в том, что при малых потерях в железе и хорошо работающих каналах якоря тепло должно притекать внутрь пазов, а при больших потерях в железе и отсутствии каналов (радиальных или осевых) лобовые части помогают охлаждению меди пазов. Но при длинном якоре в средней части его влияние лобовых частей не должно заметно сказываться.

Влияние лобовых частей можно учесть коэффициентом $C_s \geq 1$, который при длинном якоре в отличие от других коэффициентов имеет смысл только в том случае, если рассматривается средний нагрев меди, определяемый по увеличению сопротивления всей обмотки.

Если же рассматривать максимальный перегрев меди в середине якоря, в особенности при большой длине его, то вводить коэффициент C_s не следует.

Действие осевых и радиальных каналов основано на том, что тепло начинает отбираться не с одной только поверхности, прилегающей к воздушному зазору, но и от других поверхностей, не связанных с медной обкладкой. Они кажутся образом увеличивают эффективность теплоотдачи с единицы поверхности якоря (ротора, статора). Повышение же окружной скорости ротора увеличивает действительным образом теплоотдачу с единицы поверхности его и прилегающей к тому же зазору поверхности статора, хотя и в меньшей мере. С помощью радиальных каналов происходит, конечно, при этом и кажущееся увеличение теплоотдачи. Повышение скоростей охлаждающего воздуха, обусловленное разностью давлений в месте входа и выхода его, увеличивает теплоотдачу как на поверхностях, прилегающих к воздушному зазору, так и на поверхностях охлаждающих каналов. Все это приводит к повышению предельно допустимой величины Q' , отнесенной условно к единице поверхности якоря (ротора, статора).

Количественный учет эффекта Görges'a в асинхронных машинах

Инж. Г. И. Штурман
ХЭМЗШ

1. Введение

Качественно электротехнике давно уже известен процесс при так называемом одноосном включении асинхронных машин. Под таким включением понимают случай, когда по обмотке ротора обычного трехфазного двигателя протекает однофазный ток. Чтобы осуществить это включение, достаточно приподнять одну из трех щеток на кольцах фазного ротора. Если это сделать перед пуском двигателя в ход, то может случиться, что двигатель начнет устойчиво работать при половине (приблизительно) своей синхронной скорости. Это явление было впервые замечено и описано Görges'ом в 1896 г. (ETZ, стр. 517) и потому часто называется явлением или эффектом Görges'a.

Практика дальнейших лет показала, что схема, при которой впервые было отмечено застревание на полусинхронной скорости, является по существу частным случаем целого ряда возможных включений асинхронных машин, когда имеют место аналогичные явления. Провал в кривой моментов в функции скольжения вблизи полусинхронной скорости имеет место всегда при наличии электрической и магнитной несимметрии вторичных цепей асинхронной машины. Под электрической несимметрией в данном случае понимается наличие на роторе симметрично расположенной многофазной обмотки с неодинаковыми сопротивлениями в цепи отдельных ее фаз. Под магнитной несимметрией понимается наличие неодинакового по окружности воздушного зазора.

Из представляющих в настоящее время практический интерес случаев несимметричных включений можно отметить два: один — с чисто электрической несимметрией при работе асинхронного двигателя с неравными сопротивлениями фаз реостата в цепи ротора и другой — с одновременным наличием обоих вышеуказанных видов несимметрии. Последний имеет место при асинхронном запуске синхронных машин.

Анализ относительно сложных процессов в этих примерах наличия несимметрии приводит, однако, к простым практическим решениям. Последние показывают возможность свести с достаточной точностью практические расчеты к таковым, какие обычно имеют место при симметричных системах. Но справедливо это обычно для всех зон скоростей за исключением близкой к полусинхронной. Вопрос о простом методе количественной ориентировки в провале кривой момента в этой зоне остается открытым. Соотношение же между минимальным моментом машины и моментом сопротивления на ее валу решает вопрос о том, произойдет ли застревание при синхронной скорости или машинами сможет развернуться до полной скорости. А это обстоятельство и должно служить, по существу, критерием приемлемости того или иного варианта несимметрии в каждом конкретном случае.

Точные расчеты в этих условиях приводят к исключительно кропотливой и трудоемкой расчетной работе. Это обстоятельство делает их неприемлемыми для практического пользования. Речь, следовательно, может идти о приближенном расчете, пренебрегающем рядом факторов, но дающем вместе с тем надежную ориентировку в интересующих величинах. Методика таких расчетов и составляет задачу настоящей работы. Касаться она будет обоих вышеуказанных режимов в работе асинхронной и синхронной машины. Так как практический метод базируется на упрощении результатов точного анализа, то он, естественно, должен быть рассмотрен предварительно.

2. Работа асинхронного двигателя с несимметричной системой сопротивлений в цепи ротора¹⁾

Наличие неодинаковых по сопротивлениям реостатов в роторе обусловит появление в фазах его обмотки двух систем

токов — прямой и обратной последовательности чередования. Последнее определяет собой наличие двух систем м. д. с., вращающихся относительно ротора в противоположные стороны со скоростями, соответствующими частоте скольжения.

Пусть n_1 — синхронное число оборотов в минуту двигателя, $n_2 = (1 - s)n_1$ — действительное число оборотов в минуту, тогда м. д. с. ротора вращаются относительно него со скоростью $+sn_1$ и $-sn_1$. Число оборотов в минуту прямой м. д. с. в пространстве (т. е. относительно статора) равно $-n_1$ и обратной $n_3 = (1 - s)n_1 - sn_1 = (1 - 2s)n_1$. Пренебрегая высшими гармоническими, полагаем распределение м. д. с. по зазору машины синусоидальным. При ненагруженном железе такую же форму имеет распределение прямого и инверсного потоков $\vec{\Phi}$ и $\vec{\Phi}$. Инверсный поток $\vec{\Phi}$, вращаясь относительно обмотки статора со скоростью $(1 - 2s)n_1$, индуцирует в ней э. д. с. частоты

$$c_3 = -c_1(1 - 2s), \quad (1)$$

где c_1 — частота сети и $c_2 = sc_1$ — частота вторичной цепи ротора.

Наличие э. д. с. частоты c_3 вызовет в обмотке статора той же частоты токи $-\vec{I}_s$. Токи эти замыкаются через сеть и обмотки питающих ее источников (обмотки трансформаторов, генераторов и всех включенных на сеть приемников). Сопротивлением всей сети по сравнению с сопротивлением статора мотора в большинстве случаев можно пренебречь и полагать статор для третичных токов \vec{I}_s замкнутым накоротко.

Таким образом асинхронный двигатель с неравными сопротивлениями в фазах ротора может быть рассматриваем как совокупность двух асинхронных машин — одной, питаемой со статора с частотой сети, и другой, как бы питаемой с ротора с частотой, равной частоте скольжения первой.

Что же касается энергетической связи между этими двумя машинами, то она обуславливается самым фактом наличия в цепи ротора несимметричной системы сопротивлений. Таким образом обмотка ротора оказывается связанной с двумя потоками $\vec{\Phi}$ и $\vec{\Phi}$, индуцирующими в ней две системы э. д. с. прямой и инверсной последовательности. Так, э. д. с., индуцированная прямым потоком $\vec{\Phi}$,

$$E_r = -jm\vec{\Phi}_s, \quad (2)$$

где m — коэффициент, связывающий поток и индуцируемую им при частоте сети э. д. с. Электродвижущая сила, индуцированная в обмотке ротора инверсным потоком $\vec{\Phi}$,

$$E_r = -jm\vec{\Phi}_s. \quad (3)$$

Каждая из этих э. д. с. обусловит в свою очередь две системы токов:

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_r' &= \frac{\vec{E}_r}{Z_{rs}} \quad \text{и} \quad \vec{I}_r'' = \gamma_1 \vec{I}_r', \\ \vec{I}_r' &= \frac{\vec{E}}{Z_{rs}} \quad \text{и} \quad \vec{I}_r'' = \gamma_2 \vec{I}_r'. \end{aligned} \right\} \quad (4)^2$$

2) Коэффициенты инверсии γ_1 и γ_2 дают в данном случае ориентировку во времени совпадения с осью фазы a амплитудных значений прямых инверсных волн м. д. с. ротора. Количественный учет их для фазы a при наличии неодинаковых импедансов z_a, z_b и z_c может быть произведен следующими соотношениями:

$$\vec{I}_1 = -\frac{Z_a + aZ_b + a^2Z_c}{Z_a + Z_b + Z_c} \quad \text{и} \quad \vec{I}_2 = -\frac{Z_a + a^2Z_b + aZ_c}{Z_a + Z_b + Z_c},$$

где $a = \frac{1 + j\sqrt{3}}{2}$.

1) Из материала технического доклада № 42, выпущенного в мае 1932 г. Бюро исследований ХЭМЗШ. Доложено на заседании НИТО электромашиностроения ХЭМЗШ им. Сталина 28 августа 1933 г.

Общее число симметричных систем токов в машине оказывается, таким образом, равным шести — две в статоре и четыре в роторе.

Обозначив для ненасыщенной магнитной цепи мотора через k — коэффициент пропорциональности между токами и потоками, устанавливаем связь между шестью системами токов и двумя потоками машины $\vec{\Phi}$ и $\vec{\Phi}'$:

$$\vec{\Phi} = k(\vec{I}_s + \vec{I}'_r + \vec{I}''_r), \quad (5)$$

$$\vec{\Phi}' = k(\vec{I}_s + \vec{I}'_r + \vec{I}''_r). \quad (6)$$

Здесь \vec{I}_s — ток статора частоты сети, \vec{I}'_r , \vec{I}''_r и т. д. — токи ротора, приведенные к статору.

Уравнение Кирхгофа для напряжений и э. д. с. частоты сети в цепи статора

$$\vec{U}_1 - \vec{I}_s Z_1 + \vec{E}_s = 0, \quad (7)$$

где Z_1 — импеданс обмотки статора, равный $r_1 + jx_1$ и

$$\vec{E}_s = -jm\vec{\Phi}. \quad (8)$$

Выражения (23), (24) и (25) дают связи для роторной цепи:

$$\vec{E}_r = \vec{I}'_r Z_{rs} = -jm\vec{\Phi}_s, \quad (9)$$

$$\vec{E}_r = \vec{I}'_r Z_{rs} = -jm\vec{\Phi}'_s, \quad (10)$$

$$\vec{I}'_r = \gamma_1 \vec{I}'_r, \quad (11)$$

$$\vec{I}''_r = \gamma_2 \vec{I}''_r. \quad (12)$$

Переходя к токам и э. д. с. частоты s_3 в обмотке статора, установим соотношение между величинами скольжений обеих вышеупомянутых асинхронных машин

$$s_3 = \frac{sn_1 - n_2}{sn_1} = -\frac{1 - 2s}{s}. \quad (13)$$

При значениях $s < 0,5$ поле и вал второй машины имеют в пространстве одинаковое направление вращения. Для машины, получающей питание со стороны ротора, такое положение означает генераторный режим работы и, следовательно, отрицательное по абсолютной величине скольжение. Обратное положение имеет место при $s > 0,5$.

Таким образом уравнение Кирхгофа для частоты в статорном контуре

$$\vec{E}_s = jm\vec{\Phi}(1 - 2s) = \vec{I}_s [n - jx_1(1 - 2s)]. \quad (14)$$

Приняв обозначение

$$Z_3 = -\left(\frac{n}{1 - 2s} - jx_1\right) \quad (15)$$

и введя его в уравнение (14), получим

$$-jm\vec{\Phi} = \vec{I}_s Z_3. \quad (16)$$

Сопоставляя уравнение (16) с (10) получим

$$\vec{I}_s = \vec{I}'_r \frac{Z_{rs}}{sZ_3}. \quad (17)$$

Выражая далее поток $\vec{\Phi}$ по уравнению (10),

$$\vec{\Phi} = \frac{j}{m} \vec{I}'_r \frac{Z_{rs}}{s}. \quad (18)$$

Уравнения (9), (8) и (7) дают значение для тока \vec{I}'_r :

$$\vec{I}'_r = \frac{\vec{I}_s Z_1 - \vec{U}_1}{\frac{Z_{rs}}{s}}. \quad (19)$$

Отсюда, воспользовавшись соотношением (11),

$$\vec{I}_r = \gamma_1 \frac{\vec{I}'_r Z_1 - U_1}{\frac{Z_{rs}}{s}}. \quad (20)$$

Подстановка выражений (17), (18) и (20) в уравнение (6) дает

$$\frac{j}{km} \vec{I}_r \frac{Z_{rs}}{s} = \vec{I}'_r \frac{Z_{rs}}{sZ_3} + \vec{I}'_r + \gamma_1 \frac{\vec{I}'_r Z_1 - U_1}{\frac{Z_{rs}}{s}}. \quad (21)$$

Рассматриваем выражения (7) и (8) при холостом ходе двигателя

$$\vec{U}_1 - \vec{I}_{0s} Z_1 = jm\vec{\Phi}_0, \quad (22)$$

но

$$\vec{\Phi}_0 = k\vec{I}_{0s} \text{ и } U_1 - \vec{I}_{0s} = \vec{E}_{0s}, \quad (23)$$

$$\vec{E}_{0s} = jmk\vec{I}_{0s}. \quad (24)$$

Следовательно, jmk представляет собой импеданс холостого хода машины, т. е.

$$jmk = \frac{\vec{E}_{0s}}{\vec{I}_{0s}} = Z_0. \quad (25)$$

Подставляя выражение (25) в уравнение (21), решаем последнее относительно \vec{I}'_r :

$$\vec{I}'_r = \gamma_1 \frac{\vec{U}_1 - \vec{I}'_r Z_1}{\frac{Z_{rs}}{s} \left(\frac{Z_{rs}}{sZ_3} + \frac{Z_{rs}}{sZ_0} + 1 \right)}. \quad (26)$$

Тогда согласно соотношению (12)

$$\vec{I}''_r = \gamma_1 \gamma_2 \frac{\vec{U}_1 - \vec{I}'_r Z_1}{\frac{Z_{rs}}{s} \left(\frac{Z_{rs}}{sZ_3} + \frac{Z_{rs}}{sZ_0} + 1 \right)}. \quad (27)$$

Подставляя значения (27) и (19) в выражение (5), получаем

$$\frac{\vec{U}_1 - \vec{I}'_r Z_1}{Z_0} = \vec{I}_s + \frac{\vec{I}'_r Z_1 - \vec{U}_1}{\frac{Z_{rs}}{s}} + \gamma_1 \gamma_2 \frac{\vec{U}_1 - \vec{I}'_r Z_1}{\frac{Z_{rs}}{s} \left(\frac{Z_{rs}}{sZ_3} + \frac{Z_{rs}}{sZ_0} + 1 \right)}. \quad (28)$$

Из уравнения (28) нетрудно получить значение для $\frac{\vec{U}_1}{Z_3}$, т. е.

полного импеданса мотора с неравными сопротивлениями в цепи ротора,

$$Z = \frac{\vec{U}_1}{\vec{I}_s} = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{\frac{Z_{rs}}{s}} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\frac{Z_{rs}}{s} \left(\frac{Z_{rs}}{sZ_0} + \frac{Z_{rs}}{sZ_3} + 1 \right)}}. \quad (29)$$

Схема, соответствующая полному импедансу мотора, изображена на рис. 1. Как это следует из уравнения (29), параллельно к цепи ротора $\frac{Z_{rs}}{s}$ включена цепь с импедансом

$$Z_m = -\frac{1}{\gamma_1 \gamma_2} \frac{Z_{rs}}{s} \left(\frac{Z_{rs}}{sZ_0} + \frac{Z_{rs}}{sZ_3} + 1 \right). \quad (30)$$

Z_m обозначим как импеданс третичных токов. Наличие последнего и обуславливает по сути отличие режима работы двигателя с неравными сопротивлениями в роторе от режима того же двигателя с симметричной роторной системой.

Наибольшее отличие должно, очевидно, иметь место при скольжениях, близких к 0,5, так как при этом величина Z_3 согласно уравнению (15) стремится к бесконечности. Цепь

статора для токов частоты ω_3 как бы размыкается. Действительно, при $s=0,5$ скорость вращения инверсного поля в пространстве

$$n_3 = (1 - 2s) n_1 = 0,$$

т. е. поле останавливается и никакой э. д. с. в статоре при этом не индуцирует. Если же Z_1 настолько мал, что величиной его можно пренебречь, то импеданс третичных токов Z_m делается равным бесконечности, т. е. ветвь, включенная

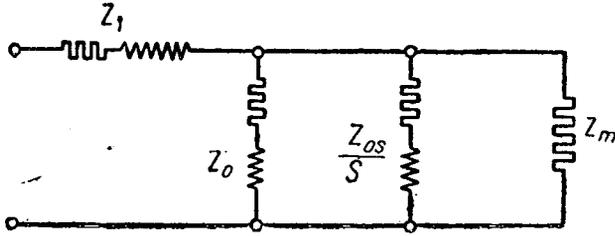


Рис. 1. Эквивалентная схема

в эквивалентной схеме (рис. 1) параллельно цепи ротора, размыкается. Физический процесс при этом можно представить как полное демпфирование инверсного потока токами \vec{I}_s в статоре. Тогда, как это показывает выражение (29) и эквивалентная схема (рис. 1), режим работы двигателя с неравными сопротивлениями подобен режиму при наличии трех одинаковых сопротивлений, соответствующих эквивалентному импедансу Z_{os} . Практически для скольжений, удаленных от $s=0,5$, величина Z_m настолько велика, что влияние ее на режим работы двигателя незначительно.

Приведенные же выше выражения для \vec{I}_s и \vec{I}_r дают возможность расчета характеристик мотора с учетом импеданса статора. Наибольший интерес последнее представляет для зоны скольжений, близких к 0,5, для проверки соответствия момента, развиваемого двигателем, моменту сопротивления нагрузки.

Рассмотрим теперь значение величины Z и других для частного случая несимметрии в роторе — случая, когда сопротивление, введенное в одну из фаз ротора, бесконечно велико, т. е. фаза разомкнута. Для такого так называемого однофазного включения коэффициенты инверсии разомкнутой фазы ротора $\gamma_1 = \gamma_2 = -1$. Следовательно, импеданс третичных токов, включенный в эквивалентной схеме параллельно ветви ротора, приобретает значение

$$Z_{m0} = -\frac{Z_{os}}{s} \left(\frac{Z_{os}}{sZ_0} + \frac{Z_{os}}{sZ_3} + 1 \right). \quad (31)$$

Величину эквивалентного сопротивления Z_{os} нетрудно получить из общего выражения.

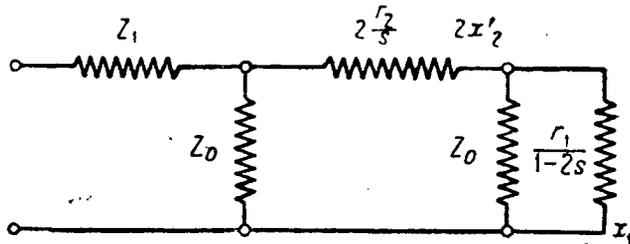


Рис. 2. Эквивалентная схема

Полагая $y_a = y_b = y_2$ и $y_c = 0$, получаем

$$Z_3 = \frac{2y_2}{y_2^2} = \frac{2}{y_2} = 2Z'_2. \quad (32)$$

Нужно отметить, что для разбираемого случая однофазного ротора эквивалентная схема рис. 1 несколько расхожется с имеющимися по этому вопросу указаниями в литературе (рис. 2)³.

Нетрудно показать аналогию между этими двумя схемами. Задача заключается в том, чтобы заменить импеданс третичных токов Z_m , включаемый в схеме рис. 1 параллельно с $\frac{Z_{os}}{s}$,

каким-либо другим импедансом, включаемым с $\frac{Z_{os}}{s}$ последовательно. Обозначим искомый импеданс через Z_x . Тогда условие неизменного по величине и фазе тока, протекавшего ранее по двум параллельным ветвям, а теперь протекающего целиком через $\frac{Z_{os}}{s}$ приводит к следующему значению искомого импеданса:

$$Z_x = \frac{\frac{Z_{os}}{s} Z_m}{\frac{Z_{os}}{s} + Z_m} - \frac{Z_{os}}{s}. \quad (33)$$

Подставляя в выражение (33) значение Z_m из (30), нетрудно получить:

$$Z_x = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_1 \gamma_2 Z_0} + \frac{1}{\gamma_1 \gamma_2 Z_3} + \frac{1}{\frac{Z_{os}}{s}} \frac{1 - \gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 \gamma_2}}. \quad (33')$$

Импеданс Z_x оказывается, таким образом, состоящим из трех параллельных ветвей, и схема рис. 1 может быть изображена так, как это показано на рис. 3.

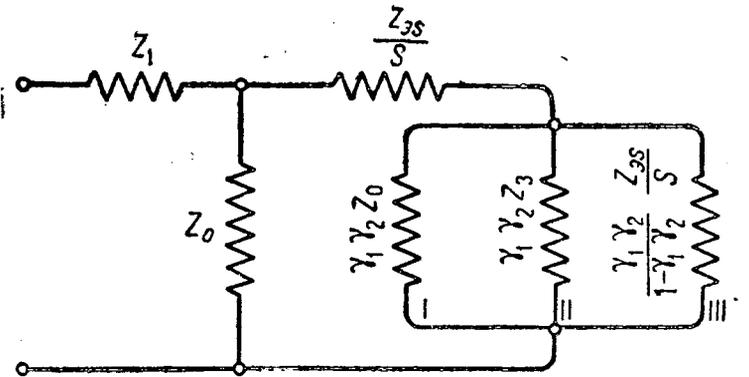


Рис. 3. Эквивалентная схема

Для частного случая однофазного ротора ($\gamma_1 = \gamma_2 = -1$ и $Z_3 = 2Z'_2$) нетрудно заметить, что ветвь III схемы рис. 3 размыкается и самая схема уже ничем не отличается от изображенной на рис. 2.

3. Учет провала в кривой моментов

Выше уже упоминалось о возможности достаточно точно ориентироваться в рабочих свойствах машины помощью обычной круговой диаграммы, построенной для трех одинаковых сопротивлений в цепи ротора, соответствующих импедансу прямой последовательности. Характеристики, устанавливаемые помощью этой диаграммы, дают удовлетворительные результаты для всех зон скоростей за исключением близкой к полусинхронной. Весьма желательно, конечно, и для этой зоны воспользоваться результатами той же круговой диаграммы. Рассмотрение эквивалентной схемы рис. 3 для $s=0,5$ указывает, что при учете намагничивания переносом ветви Z_0 непосредственно на зажимы машины и при $\gamma_1 \gamma_2 Z_0 = \infty$ последовательно с импедансом ротора $\frac{Z_{os}}{s}$ оказывается включенным импеданс $\frac{\gamma_1 \gamma_2}{1 - \gamma_1 \gamma_2} \frac{Z_{os}}{s}$ (ветвь II эквивалентной схемы

при $s=0,5$ размыкается, так как Z_3 оказывается равным бесконечности). Сопоставление кривой моментов из круговой диаграммы, рассчитанной по точным формулам, приведенное

на рис. 4, указывает для этого случая несколько преувеличенное значение первой при $s=0,5$. Причина лежит, конечно, в указанном выше добавочном импедансе эквивалентной схемы рис. 3.

Характер энергетического процесса в машине вблизи полусинхронной скорости достаточно ярко иллюстрируется кривыми рис. 5, построенными на основании соотношения в балансе мощностей машины. Эта формула дает следующее выражение для крутящего момента в синхронных ваттах

$$M = Pr - 6 \left| \vec{I}_s \right|^2 \frac{r_1}{1-2s}, \quad (34)$$

где Pr — может быть представлено для интересующей нас зоны скоростей как прямой момент, и величина $6 \left| \vec{I}_s \right|^2 \frac{r_1}{1-2s}$ — как инверсный.

$$\vec{M} = Pr, \quad \overleftarrow{M} = 6 \left| \vec{I}_s \right|^2 \frac{r_1}{1-2s}, \quad (35)$$

но Pr в свою очередь может быть представлено следующим образом:

$$\vec{M} = Pr = P_1 - 3 \left| \vec{I}_s \right|^2 r_1 + 3 \left| \vec{I}_s \right|^2 \frac{r_1}{1-2s}, \quad (36)$$

где P_1 — мощность, потребляемая из сети. Таким образом прямой момент в зоне провала к кривой результирующего момента претерпевает резкий скачок вверх, препятствуя инверсному моменту \overleftarrow{M} тормозить машину. Результирующий же момент, как это следует из (34), представляет собой разность этих двух моментов:

$$M = \vec{M} - \overleftarrow{M}. \quad (34')$$

Оба слагающие результирующего момента в расчете приходится определять отдельно. Если величину \vec{M} определить из круговой диаграммы для $s=0,5$, то она некоторым образом учитывает фактический рост M при опасной зоне скоростей.

Учет этот, конечно, далеко не полон, но могущая иметь место ошибка должна дать только повышение надежности расчета, так как заранее можно сказать, что фактический

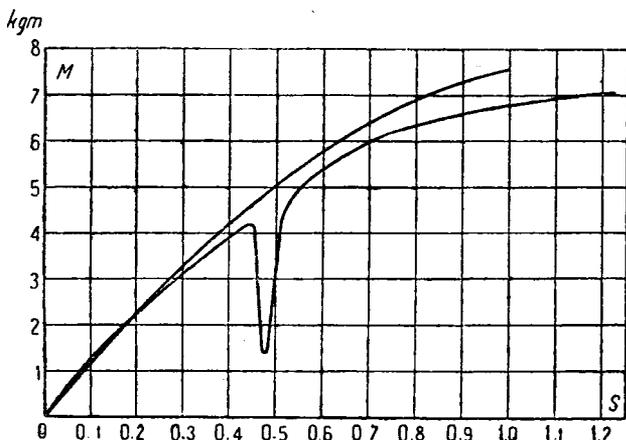


Рис. 4. Сопоставление точного и приближенного метода в расчетах кривых моментов в функции скольжения.

момент машины будет больше расчетного. Особо грубых величин эта ошибка может достичь при наличии примерно одинаковых значений \vec{M} и \overleftarrow{M} . Тогда вообще небольшой процент ошибки в определении каждого из моментов \vec{M} и \overleftarrow{M} в отдельности может дать весьма значительный процент ошибки в результирующем моменте, представляющем собой их разность (34). Но это касается, конечно, только случаев очень глубоких провалов в кривой результирующих моментов, доходящих до нулевых и отрицательных значений. В остальных

случаях принятие величины \vec{M} из круговой диаграммы должно только обеспечить необходимую надежность расчета. Что же касается второй компоненты момента в выражении (31), то упрощение методики ее расчета может быть получено непосредственно из выражения для \vec{I}_s по уравнениям (17) и (26). Если пренебречь учетом намагничивающих токов, т. е.

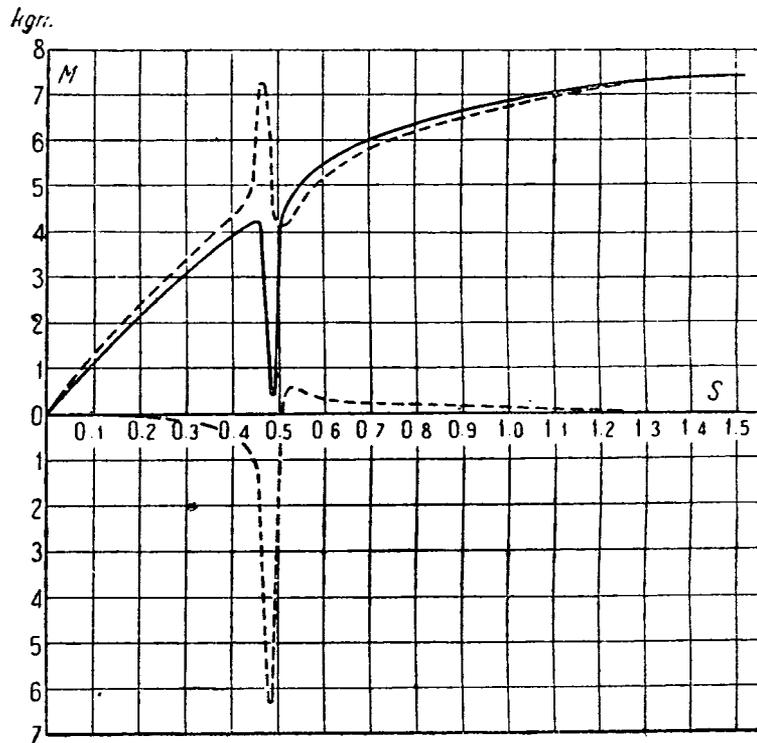


Рис. 5. Кривые моментов в функции скольжения.

положить $Z_0 = \infty$ и пренебречь изменением импеданса Z_{as} на весьма узкой зоне скольжений вблизи полусинхронизма, то выражение (17) приобретает вид:

$$\overleftarrow{I}_s = \gamma_1 \frac{U_1 - \vec{I}_s Z_1}{Z_2 + Z_3}, \quad (17)$$

где $Z_2 = r_2 + jx_2 = \frac{Z_{as}}{s}$ рассматривается как постоянная величина, соответствующая $s=0,5$ для $\frac{Z_{as}}{s}$. Подстановка в (17) этого значения для Z_2 , а также величины Z_3 из (15) дает

$$\overleftarrow{I}_s = \gamma_1 \frac{U_1 - \vec{I}_s Z_1}{\left(r_2 + \frac{r_1}{1-2s} \right) + j(x_1 + x_2)}. \quad (37)$$

Для определения величины $\left| \vec{I}_s \right|^2$, необходимой для расчета инверсного момента \overleftarrow{M} по (32), можно пренебречь падением напряжения в цепи статора от токов прямой последовательности $\vec{I}_s Z_1$ и положить $\vec{E}_s = U_1$. Это упрощение должно повести к некоторому преувеличению при расчете \overleftarrow{M} , а следовательно, и к увеличению надежности при определении M по (34). Подставив $\left| \vec{I}_s \right|^2$ из (34) и (32) нетрудно получить

$$\overleftarrow{M} = 6 \frac{\left| \gamma_1 U_1 \right|^2 r_1 (2s-1)}{\left[r_2 (2s-1) + r_1 \right]^2 + \left[(x_1 + x_2)(2s-1) \right]^2}. \quad (38)$$

Из соотношения (38) путем обычного приема приравнивания нулю производной $\frac{dM}{ds}$ определяются величины «критических» скольжений s_k . Это в свою очередь определяет скорости

вблизи полусинхронной скорости, при которой M обладает максимальными значениями

$$s_k = \frac{1}{2} \left[1 \pm \frac{r_1}{\sqrt{r_s^2 + (x_1 + x_s)^2}} \right]. \quad (39)$$

Практический интерес представляет, конечно, величина s_k со знаком минус в скобках выражения (36). Подстановка этого значения s_k вместо s в (35) приводит к следующему весьма простому выражению для расчета амплитуды инверсного момента в опасной зоне скоростей машины:

$$\underline{M}_{\max} = 6 \left| \underline{I}_s \right|^2 \frac{r_1}{1 - 2s_k} \approx 6 \frac{|\gamma_1 U_1|^2}{4 [\sqrt{r_s^2 + (x_1 + x_s)^2} - r_s]}. \quad (40)$$

Ход расчета по предлагаемому методу помощью соотношений (39) и (40) может быть иллюстрирован следующим примером.

Двигатель типа Т 1500/20,5 со следующими параметрами: $r_1 = 0,0512 \Omega$, $x_1 = x_2' = 0,1985 \Omega$, $r_1 = 0,0587 \Omega$. Сопротивления в фазах обмотки ротора γ_1 : $R_a = 0,0587 \Omega$, $R_c = 0,3833 \Omega$. Коэффициент несимметрии роторной цепи (пренебрегая вначале индуктивным ее сопротивлением)

$$|\gamma_1|^2 = \sqrt{1 - 3 \frac{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c}{(R_a + R_b + R_c)^2}} = 0,404.$$

Эквивалентное омическое сопротивление или сопротивление прямой последовательности

$$R_s = \frac{R_a R_b + R_a R_c + R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} = \frac{R_a + R_b + R_c}{3} (1 - |\gamma_1|^2) = 0,2295.$$

Приведение этой величины к статору путем умножения на величину $\left(\frac{f_{m1} W_1}{f_{w2} W_2} \right)^2 = 1,08$ дает

$$R'_s = 1,08 \cdot 0,2295 = 0,248 \Omega.$$

Импеданс роторной цепи $Z_s = r_s + jx_s$ принимается равным $\frac{0,248}{0,5} + j 0,1985 = 0,496 + j 0,1985 \Omega$.

Вместо построения круговой диаграммы момент M в синхронных ваттах можно установить расчетом по эквивалентной схеме, упрощенной переносом ветви холостого хода — Z_s непосредственно к зажимам сети (диаграмма Гольдшмидта). Тогда импеданс второй ветви составит из сопротивлений статора Z_1 и ротора Z_s :

$$\sqrt{(r_1 + r_s)^2 + (x_1 + x_2')^2} = 0,675 \Omega.$$

Мощность этой ветви при напряжении 110 В.

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \cdot 110 \cdot \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 0,675} \cdot \frac{0,5472}{0,675} &= 14\,500 \text{ W}, \\ 3 \cdot 94^2 \cdot \frac{0,0512}{M} &= 1\,360 \text{ W} \\ \rightarrow M &= 13\,140 \text{ W} \end{aligned}$$

Момент инверсный по (37)

$$\begin{aligned} M &= 6 \frac{0,404^2 \left(\frac{110}{3} \right)^2}{4 (\sqrt{0,496^2 + 0,397^2} - 0,496)} = 7\,080 \text{ W}, \\ M &= \overrightarrow{M} - \overleftarrow{M} = 13\,140 - 7\,080 = 6\,060 \text{ W} \end{aligned}$$

или, учитывая $n_{\text{синхр}} = 1\,500$ об/мин

$$M = \frac{6\,060}{9,81 \cdot 157} = 3,94 \text{ kgm}.$$

Экспериментальная характеристика $M = f(s)$ для двигателя Т 1500/20,5 при 110 В и указанной выше комбинации со-

противлений показала величину минимального момента, равную $3,7 \text{ kgm}^2$. Скольжение при этом моменте равно 46% . Расчет этой же величины по формуле (81) дает

$$0,5 \left(1 - \frac{0,0512}{\sqrt{0,496^2 + 0,397^2}} \right) = 45,95\%.$$

В табл. 1 сопоставлены результаты подсчетов, аналогичных приведенному в примере, с результатами эксперимента.

Таблица 1

| Сопротивление фаз (Ω) | | | R_{Σ} Ω | (γ_1) % | s_k | | M , соответствующий | |
|--------------------------------|---------------------|--------|--------------------------|-------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| R_a | R_b | R_c | | | Расч. % | Опыт. % | Расч. % | Опыт. % |
| 0,0587 | 0,8858 | 0,9067 | 0,49 | 45,3 | 47,4 | 49 | -4,58 | +0,9 |
| 0,0587 | 0,6897 | 0,6897 | 0,386 | 43,8 ⁵ | 47,2 ³ | 47,5 | -1,715 | 1,2 |
| 0,0587 | 0,5037 | 0,5193 | 0,297 | 41,8 | 46,6 | 46,9 | 1,8 | 2,25 |
| 0,0587 | 0,3731 | 0,3833 | 0,2295 | 40,4 | 45,9 ³ | 46 | 3,94 | 3,7 |
| 0,0587 | 0,2324 ⁵ | 0,2416 | 0,1575 | 33,4 | 45,1 | 45 | 6,2 | 5,9 |
| 0,0587 | 0,1709 ⁵ | 0,1628 | 0,121 | 27,6 | 44,6 | 43,5 | 6,67 | 7,00 |

Как нетрудно усмотреть из сопоставления цифр этой таблицы, принятые выше допущения дали, как и следовало ожидать, значительный процент погрешности на кривых с глубоким провалом. Так, для кривой a расчетный момент равен $-4,58$ при фактическом $+0,9 \text{ kgm}$. Но здесь большой точности и не требуется, так как при таком малом моменте, как $0,9 \text{ kgm}$, двигатель все равно не разворачивается и застревает на полусинхронной скорости даже при работе на холостом ходу. Поэтому практически дальнейший ход кривой уже не интересен, находится ли кривая выше оси абсцисс или переходит в зону отрицательных значений. Практически важен расчет момента в тех случаях, когда кривая на провале имеет значение не менее $35 \div 40\%$ от номинальной величины момента.

Для таких условий предложенный выше упрощенный метод расчета должен давать результаты, вполне приемлемые как по затрачиваемой трудоемкости, так и по надежности окончательных величин. Для случаев же, выходящих за пределы, оговоренные выше приведенные соображения дают достаточный материал для общей ориентировки в вопросе о провале в кривой моментов.

Выше при выводе формул (39) и (40) не учитывалось влияние тока холостого хода. Для двигателей с значительным намагничивающим током и, следовательно, относительно малыми x_0 учет последнего не представляет трудностей при использовании выражений (17) и (26).

4. К вопросу о застревании при асинхронном пуске синхронных машин

Количественный учет процесса для этого случая одновременного наличия электрической и магнитной несимметрии может быть построен вполне аналогично приведенному выше. Соответствующие выводы недавно опубликованы автором в статье „Асинхронный пуск синхронных машин“⁶).

Если для двигателя с несимметричной системой сопротивлений оказался возможным приближенный расчет по обычной круговой диаграмме, то анализ асинхронного режима синхронной машины с явно выраженными полюсами привел к приближенным подсчетам по схеме, аналогичной двигателю Бушера. Так же как и в асинхронном двигателе, упрощенный метод расчета применим для всех зон скоростей за исключением близкой к полусинхронной. Но вполне аналогично предыдущей главе можно подойти и здесь к установлению метода приближенной ориентировки в величине провала кривой моментов вблизи полусинхронной скорости. Выражения

⁵ Следует, конечно, иметь в виду степень точности самого эксперимента.

для крутящего момента (34) ÷ (36) остаются в силе и для данного случая. Ряд подсчетов пусковых характеристик по приближенному методу и сопоставление их с опытными данными не показал наблюдавшегося на рис. 4 увеличения расчетного момента при $s=0,5$ над измеренным. В силу этого для ориентировки в провале более целесообразно пользоваться выражением (34') с подстановкой в него значений по (35) и (36). Последнее приводит к известному соотношению

$$M = P_1 - 3|\vec{I}_s|^2 r - 3|\vec{I}_s|^2 \frac{r_1}{1-2s}. \quad (34'')$$

Величина $P_1 - 3|\vec{I}_s|^2 r_1$ может в данном случае быть принята такой, какую дает приближенный подсчет для $s=0,5$. Что же касается затормаживающего (при $s < 0,5$) эффекта

$3|\vec{I}_s|^2 \frac{r_1}{1-2s}$, то его величина может быть оценена после рассмотрения точного выражения инверсного тока статора \vec{I}_s . Из выводов в упоминавшейся статье следует:

$$\vec{I}_s = \frac{(U - \vec{I}_s Z_1) \frac{\beta + \alpha \gamma_1}{Z_{gs}} - \beta \vec{I}_s}{s} \frac{Z_{gs}}{s Z_3}. \quad (41)$$

Если же пренебречь появлением инверсных потоков в результате магнитной несимметрии⁷⁾, т. е. положить $\beta = 0$ и ввести те же упрощения, какие уже выше принимались для асинхронного двигателя, то выражение (41) приобретает вид:

$$\vec{I}_s \approx \frac{(U - I_s Z_1) \alpha \gamma_1}{Z_3 \left(\frac{Z_{gs}}{s Z_0} + \alpha \frac{Z_{gs}}{s Z_3} + \alpha \right)} \approx \frac{U \gamma_1}{Z_0 + Z_3}. \quad (41')$$

Но выражение (41') целиком аналогично уравнению (17').

Отсюда непосредственно следует возможность определения „критического“ скольжения по выражению (39) и максимума затормаживающего эффекта аналогично (40):

$$\left(3|\vec{I}_s|^2 \frac{r_1}{1-2s} \right)_{\max} \approx \frac{3}{4} \frac{|U \gamma_1|^2}{\sqrt{r_s^2 + (x_1 + x_2)^2} - r_s}. \quad (42)$$

Нужно отметить, что если пользование выражением (40) было экспериментально проверено на ряде комбинаций несимметричных сопротивлений, то применение (42) для синхронных машин такой экспериментальной проверке еще не подвергалось. Возможно, что последняя внесет некоторые коррективы. Во всяком случае возможность пользования предлагаемым простым методом ориентировки в провале моментов, каким является выражение (42), весьма заманчива.

13, III 1934 г.

7) См. „Электричество“ № 19, 1933.

ИЗ РАБОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ.

Градиенты перенапряжения в обмотке трансформатора. Координирование уровня изоляции витков и катушек

Инж. В. А. Карасев
Москва, ВЭИ

Темой настоящей статьи является выяснение необходимых уровней изоляции витков и катушек резонирующего трансформатора.

Существует ряд практических, эмпирических по существу правил, которыми пользуются при проектировании. Некоторые из этих правил вошли в соответствующие руководства. Наша задача состоит в том, чтобы подойти к указанному вопросу на основе ряда экспериментальных и теоретических данных. В некоторой своей части вопрос, действительно, может быть обоснован и разрешен также и теоретически. Если говорить о первых катушках, подверженных наибольшему перенапряжению, то возможен метод приближенного расчета градиентов, предлагаемый ниже.

Работа преследует цель дать конкретный материал по вопросу об уровнях изоляции и конкретные методы расчета. За недостатком места ограничиваемся помещением лишь некоторых типичных результатов эксперимента (а также ссылками на напечатанное уже в журнале „Электричество“). Обобщения же делаем на основе всего немало накопившегося материала. Избегая длинных выкладок, приводим расчетные формулы, которыми пользовались, и принцип их получения.

При трактовке следует расчленив вопрос, рассматривая, во-первых, начальные катушки, прилегающие к линейному концу, и, во-вторых, остальные катушки. Начальные катушки подвержены наибольшему перенапряжению. Но к ним может быть применена усиленная изоляция и другие меры. В разрезе нашего вопроса они занимают до некоторой степени особое положение.

1. Экспериментальные данные о величине градиентов в начальных катушках и коэффициенты запаса.

Трудно было бы дать обобщенные цифры градиентов в первых катушках, ибо они зависят от разных частей обмотки.

степенных, конструктивных деталей (соотношение между усиленной и неусиленной изоляциями, сечение витков, наличие и расположение емкостного кольца и др.). Эксперименты же могут быть проделаны над немногими, сравнительно, трансформаторами. Ниже будет проведен метод расчета градиентов в

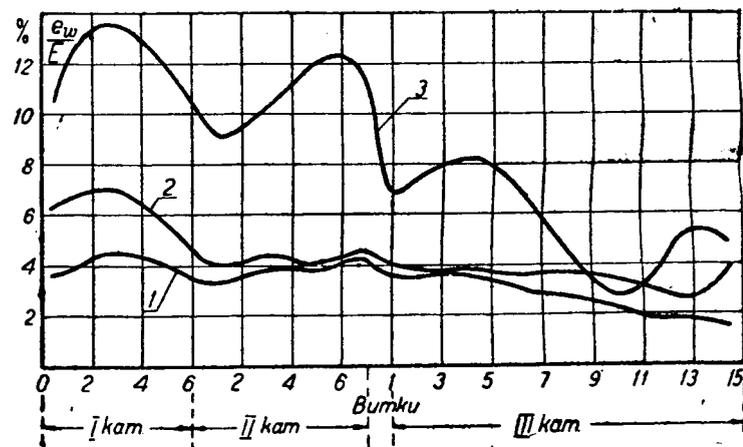


Рис. 1. Напряжения на виток в обмотке 110-киловольтного трансформатора, Кривая 1 — без „среза“, 2 — „срез“ на амплитуде, 3 — „срез“ на половине фронта. Волна 0,1/66.

первых катушках. Здесь же приведем некоторые экспериментальные данные, касающиеся типовой продукции. При измерении градиентов перенапряжения нет нужды подвергать трансформатор ударам волн высокой амплитуды. Исследования, проведенные в ВЭИ, показали, что градиенты приблизительно пропорциональны амплитуде воздействующего импульса в диапазоне от 50—100 кВ и вплоть до напряжений реальных

волн¹⁾. Ниже приводим ряд результатов опыта, полученных при воздействии волн с амплитудой 50—100 кВ.

На рис. 1 даны кривые распределения напряжений, проходящих на виток, для модели обмотки 110-киловольтного трансформатора МОТЭЗ (типа 1932 г.). В разных трансфор-

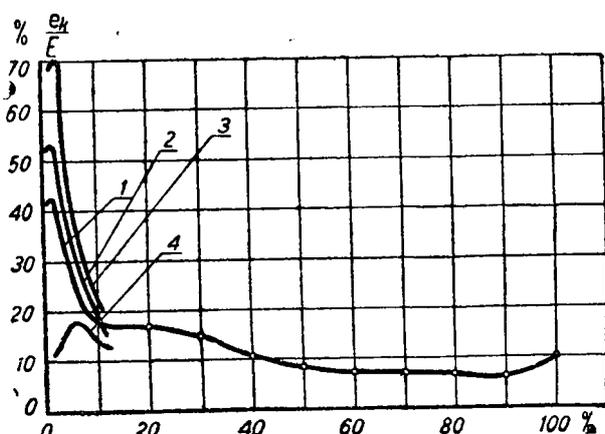


Рис. 2. Напряжения на канал в обмотке 110-киловольтного трансформатора. Кривая 1 — без „среза“, 2 — „срез“ на амплитуде, 3 — „срез“ на половине фронта. Волна 0,1/66. Кривая 4 — без „среза“. Волна 0,8/66.

маторах данного типа варьируются числа витков в катушке и размеры сечения витков, но изоляционные расстояния сохраняются, а высоты витков и радиальные расстояния меняются мало. Поэтому данные кривые до некоторой степени характеризуют трансформаторы указанного напряжения и типа. Конструкция обмотки — без емкостных колец. По оси абсцисс отложены номера витков, считая от линейного конца. Кривые захватывают 3 катушки. По оси ординат отложено напряжение на виток, измеренное разрядником и отнесенное (в процентах) к фактической амплитуде E приложенного импульса.

На рис. 2 дано распределение напряжений, лежащих на катушку (на канал). Обмотка 110 кВ. По оси абсцисс отложены расстояния от линейного конца в процентах к длине обмотки, по оси ординат — напряжения на канал в процентах от E .

На рис. 1 и 2 кривые обозначают: 1 — волна крутого фронта не срезается, 2 — срез на амплитуде волны, 3 — срез на половине фронта.

В последних двух случаях напряжения отнесены к номинальному напряжению освещенного шарового срезающего разрядника. Разрядник присоединялся к клеммам трансформатора²⁾. Падающая волна характеризовалась 0,1/66 и имела амплитуду 60 кВ.

Кроме того, на рис. 2 дана кривая 4, соответствующая несрезанной волне $1/66 \mu \text{sec}$, т. е. волне пологого фронта.

Были также сняты распределения потенциала по виткам начальных катушек, причем эти потенциалы измерялись по отношению к потенциалу линейного конца (измерялись, разумеется, их максимумы по времени). „Кривые потенциалов“ вначале резко, почти прямолинейно, идут вверх, затем к середине катушки подъем их ослабевает. Между первым и пятым витками первой катушки в данном случае было измерено: без среза 11% от E , и при срезе на амплитуде 21% от E и при срезе на половине фронта 50% от E , т. е. в 3—4 раза больше, чем на первый виток (ср. с рис. 1). Эти цифры надо заметить, так как электрическая прочность между витками благодаря участку пути поверхностного разряда, как показывают опыты, возрастает медленней, чем расстояние между витками. Пробивное напряжение между первым и пятым витками лишь в 2—2,5 раза больше пробивного между

соседними витками (при распределении поля, не сильно отличающемся от соответствующего „первоначальному распределению“ в самой катушке).

Кривые, подобные указанным, были сняты и на типичной 35-киловольтной конструкции.

На рис. 3 даны кривые „напряжений на канал“, снятые на трансформаторе 115 кВ, 2500 кВА нормальной конструкции МОТЭЗ (1932 г.). Конструкция без емкостных колец.

Обращает на себя внимание повышение градиентов при срезе на половине фронта, которое почти всегда наблюдается при опытах³⁾. Это происходит благодаря увеличению крутизны обратного фронта среза. Крутизна переднего фронта не оказывает влияния, и дело здесь не в проскочившей амплитуде волны⁴⁾. Детальные исследования показывают, что при срезе на половине фронта мы приближаемся к чисто электростатическому распределению в катушке. Кроме того, в некотором проценте налагаются весьма высокочастотные собственные колебания катушки. Срез на половине фронта может произойти на тупиковых (головных) подстанциях. Сюда нужно также отнести и такие, которые длительно могут работать с присоединением лишь одного из фидеров, а также (например, для систем 35 кВ) такие случаи, когда все фидеры кроме одного включены через реакторы. Эти условия все же очень редки, и мы на них ориентироваться не будем.

Приведя в качестве иллюстрации несколько кривых распределения напряжения, перейдем к выяснению запасов электрической прочности изоляции. Запасы вычислялись на основе импульсных испытаний изоляции⁵⁾ и принятых наибольших амплитуд, воздействующих на трансформатор импульсов. Из условий равнопрочности последние были взяты как пробивные напряжения E_n главной изоляции⁶⁾. Было взято:

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| для 220-киловольтных систем | $E_n = 1810 \text{ кВ}$ |
| „ 160 „ | $E_n = 1320 \text{ „}$ |
| „ 110 „ | $E_n = 950 \text{ „}$ |
| „ 35 „ | $E_n = 310 \text{ „}$ |

В отношении витковых градиентов, как оказалось, результаты получились довольно благоприятные. Рис. 4 и 5 дают значения для коэффициентов запаса первых катушек, причём

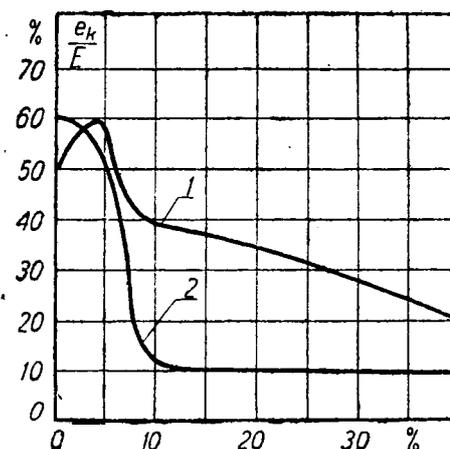


Рис. 3. Напряжения на канал в трансформаторе 110 кВ, 2500 кВА. Кривая 1 — без „среза“, 2 — „срез“ на амплитуде. Волна 0,1/20,

рис. 4 относится к 110-киловольтной конструкции МОТЭЗ 1932 г., а рис. 5 — к 35-киловольтной. Для каждой катушки был определен ее запас прочности, исходя из наибольшего

³⁾ Если только цепь срезающего разрядника не представляет собой большой самоиндукции.

⁴⁾ См. „ТЭЭ“ № 1—2, 1932, стр. 41.

⁵⁾ Для межкатушечной изоляции данные взяты из работ, проведенных под руководством инж. А. В. Панова.

⁶⁾ См. В. А. Карпов и др. Координация внутренней изоляции трансформатора с внешней. Доклад на конференции по перенапряжениям. Ленинград 1934.

¹⁾ Это относится и к случаю „среза“ волны. Материалы будут опубликованы.

²⁾ Изоляция должна выдерживать такой „срез“ (см. К вопросу о стабильности волны. „Электричество“ № 15, 1933).

напряжения на виток в катушке и из импульсной электрической крепости межвитковой изоляции. Однако, учитывая возможность пробоя с первого на пятый виток, желательное некоторое увеличение запасов прочности для 110-киловольтной обмотки (до значения 2).

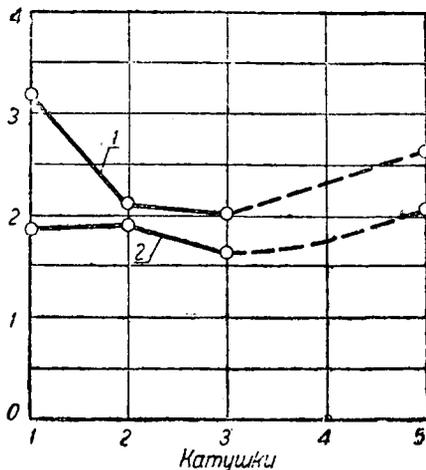


Рис. 4. Коэффициенты запаса витковой изоляции первых 5 катушек обмотки 110 кВ. Кривая 1 — без „среза“ (волна 0,1/60), кривая 2 — „срез“ на амплитуде. Скользящий разряд („с первого на пятый виток,“) не учтен.

Для межкатушечной изоляции получились данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты запаса межкатушечной изоляции

| Конструкция МОТЭЗ | Между какими катушками | Волна 0,1/60 | | Примечание |
|-------------------|------------------------|--------------|-------------------|--------------------------------|
| | | без среза | срез на амплитуде | |
| 110 кВ | I—II | 1,1 | 0,85 | Первая пара нормальных катушек |
| | V—VI | 1,5 | 1,5 | |
| 35 кВ | I—II | 1,45 | 1,3 | Первая пара нормальных катушек |
| | III—IV | 1,6 | 1,4 | |

Коэффициент запаса для изоляции между первыми двумя катушками 110-киловольтной обмотки, получившийся недостаточно высоким (см. первую строку табл. 1) должен был быть повышен усилением изоляции канала (в испытанной конструкции изоляция состояла из слоя в 4,5 мм бумаги на витках, 9 мм кембрика, прессшпановой шайбы толщиной 2 мм и слоя масла в 14 мм).

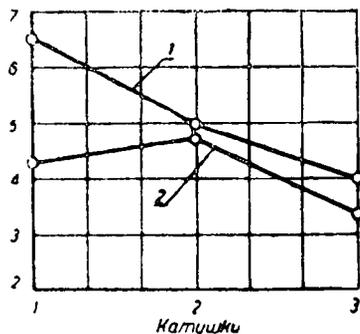


Рис. 5. Коэффициенты запаса витковой изоляции первых трех катушек обмотки 35 кВ. Кривая 1 — без „среза“ (волна 0,1/60), кривая 2 — „срез“ на амплитуде. Скользящий разряд („с первого на пятый виток“) не учтен.

Приведем еще данные, касающиеся однофазного трансформатора на 220 кВ, 20 MVA (свирского). Применена система зигзаг-обмотки, позволяющей при параллельных сердечниках иметь достаточное число последовательных витков. На рис. 6 дана схема намотки. Изображены схематически обмотки обоих сердечников. Идя по ходу намотки, мы все время переходим с одного сердечника на другой и обратно.

Градиенты были подсчитаны по методу „электрической схемы замещения“ (см. ниже) и, кроме того, измерены рядомником на трансформаторе непосредственно. Таким образом удалось получить градиенты в частях, недоступных для непосредственного обмера, а также проверить теоретический метод. Результаты приведены на рис. 7. По оси абсцисс отложены точки, соответственно перенумерованные на рис. 6; по оси ординат — проценты от фактической амплитуды напряжения на всей обмотке. Горизонтальные стрелки относятся к теоретическим данным. Концы каждой стрелки показывают, между какими точками получился тот процент напряжения, который равен расстоянию от стрелки до оси абсцисс. Стрелки, относящиеся к тем данным, которые можно было

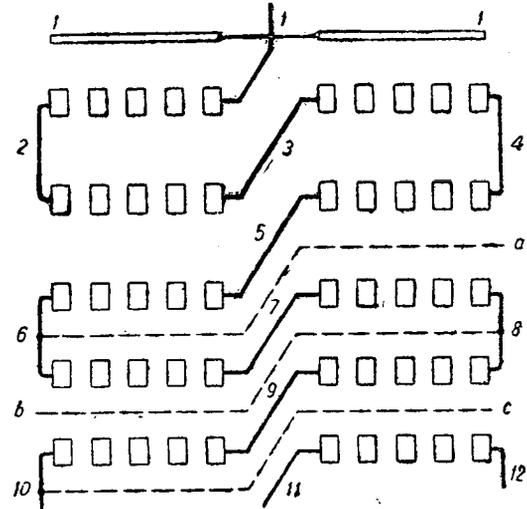


Рис. 6. Схематический разрез через „зигзаг-обмотку“ (свирский трансформатор).

сверить с экспериментальными, помечены зачерненными квадратиками. Точки, обозначенные кружочками и образующие кривую 1, относятся к обмеру при срезе волны, произведенном непосредственно на емкостном кольце (срез — на амплитуде). Как видим, они довольно близко лежат к квадратикам. Расчет велся для случая трансформатора в масле, обмер производился над трансформатором в воздухе. Разница не должна быть большой, ибо масло заполняет частично как

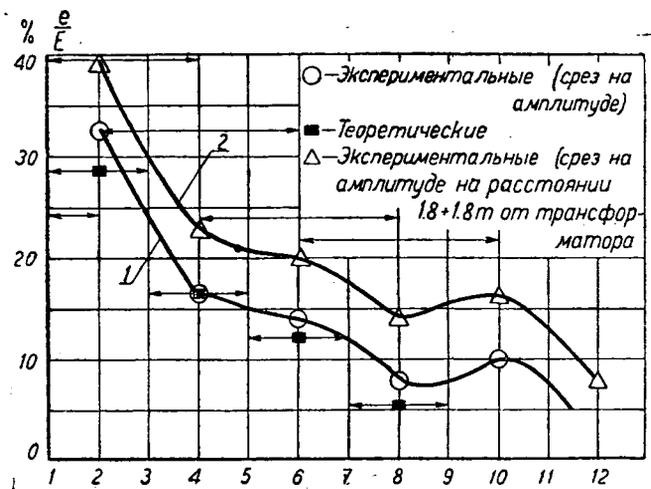


Рис. 7. Градиенты на начальных катушках свирского (220 кВ) трансформатора.

пространство между сердечником и обмоткой, так и между катушками. Как видим, эксперимент хорошо подтверждает теоретический расчет.

Точки, помеченные треугольниками, относятся к такому срезу на амплитуде, когда между емкостным кольцом и точкой среза имелся изогнутый ввод, образовавший петлю 1,8 + 1,8 м длиной. Выявившееся увеличение градиентов при таком уда-

лении точки среза от трансформатора, вообще говоря, встречалось при наших опытах редко. Мы объясняем его тем, что частота колебательного контура среза (входная емкость — самоиндукция этого контура) случайно близко совпала с частотой одной из высших гармоник катушек.

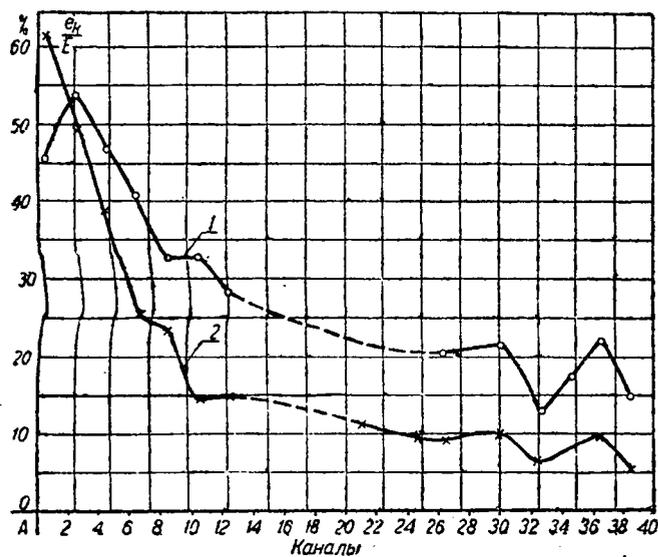


Рис. 8. Градиенты в обмотке днепровского (154 kV) трансформатора (напряжения на канал). Кривая 1 — волна 0,1/60 мкс без среза, 2 — срез на втулке, произведенный на амплитуде волны 0,1/60.

Как показывают приведенные данные, наибольшее напряжение на канал составляет всего лишь 40%. В этом сказывается благоприятное влияние применения емкостного кольца — меры значительно более эффективной, чем простое усиление изоляции начальных катушек, ибо в последнем случае увеличение изоляционных расстояний для первых катушек влечет уменьшение соответственной продольной емкости (емкости U_m , см. ниже), что вызывает возрастание градиентов. Кроме того, с утолщением изоляции электрическая крепость растет все медленней и медленней.

Первые катушки 220-киловольтного трансформатора в результате работ ВЭИ были обмотаны не кембриком, а бумагой, показавшей лучшую электрическую крепость. Достаточный запас прочности можно считать обеспеченным.

Данные для днепровского (резонирующего) трансформатора (154 kV, 10,5 MVA на фазу) приведены на рис. 8. Трансформатор однофазный, обмотка без емкостных колец, 6 усиленных катушек. По оси ординат отложены напряжения на канал. Как видно из кривых, градиенты (в процентах) у этого трансформатора выше, чем у свирского трансформатора (отсутствие емкостного кольца).

2. Нормальные катушки обмотки (неусиленные катушки)

Неусиленные катушки составляют большую часть обмотки, от их изоляции зависит коэффициент заполнения окна и коэффициент использования сечения обмотки активным материалом. Начиная от точки, отступающей от линейного конца приблизительно на 10% длины обмотки, катушки обычно не имеют усиленной изоляции (так называемые нормальные катушки). Действительно градуировать градиентную изоляцию на этом участке не имеет смысла уже потому, что обобщенной, хотя бы приближенной, закономерности для кривой градиентов здесь указать нельзя.

Из данных, приведенных в статье „К вопросу выбора стандартных волн и т. д.“ („Электричество“ № 15, 1933) видно, что нужно принять 20% как максимальный возможный про-

неусиленными катушками, т. е. между катушками, составляющими ту часть обмотки, которая начинается отступа примерно на 10% от линейного конца⁷⁾.

Здесь приведем еще экспериментальные данные, касающиеся 220-киловольтного трансформатора. На рис. 7 даны были кривые градиентов при срезе и доведены лишь до 12-го „перехода с сердечника на сердечник“, ибо дальше градиенты при срезе падают настолько, что не представляют интереса. На рис. 9 представлены кривые градиентов при падении несрезанной волны длиной 40 мкс (всюду длины волн — до половины спада). По оси абсцисс нанесены точки перехода с сердечника, на сердечник (всего таких точек на одной половине сердечника, т. е. между линейным вводом и одним из ярем, было 36). Кривая 1 соответствует длине фронта 0,1 мкс, и эта же кривая может служить для случая длины фронта 0,5 мкс, ибо точки почти совпали. Кривая 2 снята при длине фронта 3 мкс.

Интересно сравнить с рис. 2, где удлинение фронта до 1 мкс уже давало значительное снижение градиента. Объясняется это различие тем, что модель обмотки 110-киловольтного трансформатора была уменьшенного диаметра (300 мм) и имела малый период основной гармоники — порядка 10 мкс. Свирский же трансформатор имеет период основного колебания 55 мкс (экспериментально). Таким образом по мере скругления фронта быстрее дезактивируются высшие гармоники обмотки в первом случае, когда период этих высших гармоник меньше. Из кривой рис. 9 видно, что наибольшее напряжение на неусиленную катушку составляет 18,5%. В то же время импульсная пробивная крепость канала между неусиленными катушками по данным А. В. Панова 290 → 300 kV. Кривая градиентов днепровского трансформатора (рис. 8) указывает, что на канал между неусиленными катушками приходится весьма значительный процент (свыше 30), пробивная же крепость ~ 275 kV.

Что касается витковой изоляции, то выше мы видели, что для первых катушек коэффициенты запаса существующих конструкций в общем достаточны. С углублением в обмотку распределение напряжений внутри катушки (по виткам) несколько выравнивается. На виток ложится в процентах к амплитуде волны

$$e_w = \frac{e_k}{2n} q\%$$

Здесь e_k — процент напряжения на канал, n — число витков в катушке (в одной спирали, заключающейся между наружным

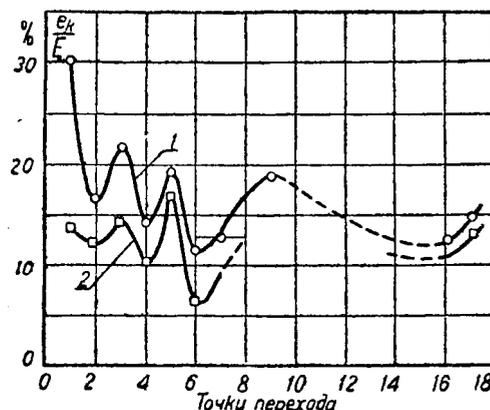


Рис. 9. Градиенты в обмотке свирского (220 kV) трансформатора при несрезанной волне длиной 40 мкс (напряжения на канал). Кривая 1 — длина фронта 0,1 ÷ 0,5 мкс, кривая 2 — длина фронта 3 мкс. По абсциссам — „точки перехода“ с сердечника на сердечник (обмотка типа „зигзаг“). Доведено до середины обмотки.

⁷⁾ В указанной статье не приведено данных о „срезе на половине фронта“, но, часто давая повышение на первых катушках, такой срез в общем не дает увеличения градиентов в рассматриваемой части

и внутренним переходами), q — эмпирический коэффициент неравномерности внутри катушки. Можно принять на основе экспериментальных и теоретических данных, что для неусиленных катушек q лежит в пределах $2 \div 3$.

Приняв $e_p = 20\%$, число витков, в среднем $n = 12$ и (с запасом) $q = 3$, получаем $2,5\%$ на виток. В абсолютных значениях получаем величины, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные напряжения на виток в неусиленных катушках

| Напряжение системы kV | Напряжение на клеммах трансформатора kV | Напряжение на виток kV | Изоляция | | Коэффициент запаса | Примечание |
|-----------------------|---|------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|--|
| | | | толщина на обе стороны mm | пробивное напряжение kV | | |
| 35 | 310 | 7,75 | 0,6 | 30—37 | $3,9 \div 4,8^8)$ | Днепровские трансформаторы ⁹⁾ |
| 110 | 950 | 24 | 1 | 45—60 | $1,9 \div 2,5$ | |
| 160 | 1320 | 33 | 2 | 80—100 | $2,4 \div 3$ | |
| 160 | 1320 | 33 | 1,4 | 65—80 | $2 \div 2,4$ | Рекомендуемое |
| 220 | 1810 | 45,5 | 1,4 | 65—80 | $1,5 \div 1,75$ | Свирские трансформаторы |
| 220 | 1810 | 45,5 | 2 | 80—100 | $1,75 \div 2,2$ | Рекомендуемое |

В четвертой колонке табл. 2 указана изоляция в существующих установках, а также рекомендуемая. Импульсные пробивные напряжения витковой изоляции даны в скругленных цифрах; они сильно колеблются в зависимости от сорта бумаги, степени сушки и других причин.

Обращают на себя внимание большие коэффициенты запаса. Однако было бы поспешным считать тот эмпирический путь, по которому пришли к большим толщинам витковой изоляции, неверным. При ослаблении изоляции становится возможным скользящий разряд „с первого на пятый виток“ (см. выше), и такого рода дефекты могли побудить усилить изоляцию. Как было указано, для „пятого витка“ почти 4-кратное увеличению напряжения соответствует лишь $2 \div 2,5$ -кратное усиление электрической крепости, т. е. при учете скользящего разряда, представленные коэффициенты запаса снижаются примерно вдвое. Можно утверждать, однако, что больших затруднений в отношении изоляции витков вплоть до напряжений 220-kV встретиться не может.

Вопрос о межкатушечной изоляции сложнее. Под руководством А. В. Панова производились испытания импульсной крепости межкатушечной изоляции¹⁰⁾. Эти опыты показали, что, беря обычные масляные каналы ($10 \div 15$ mm) и применяя прессшпановые шайбы (2,5 mm), можно получить пробивные напряжения не выше $250 \div 300$ kV. Лишь применяя для обмотки катушек кембрик, можно довести пробивную крепость до величин порядка 400 kV (4 mm + $6,5$ mm кембрика, 2,5 mm прессшпановой шайбы, 12,5 mm масла дали $400 \div 430$ kV).

Составим табличку абсолютных напряжений, приходящихся на неусиленную катушку, исходя как из вероятных из 20% на катушку (табл. 3).

Напряжение на трансформаторе взято как минимальное импульсное испытательного промежутка для сухого воздуха (когда оно максимально) плюс 5% (учет случая больших запаздываний в $10\text{—}20$ мс, когда еще могут образоваться большие градиенты в глубине обмотки) и плюс 20% запаса.

Таблица 3

| Напряжение системы kV | Напряжение на трансформаторе kV | Напряжение на катушку 20% kV |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 35 | 275 | 55 |
| 110 | 760 | 150 |
| 160 | 1040 | 210 |
| 220 | 1450 | 290 |

Минимальные импульсные — по американским данным (см. указанный доклад „О координации внутренней изоляции трансформатора с внешней“).

Видим, что если мы хотим соблюсти должный запас прочности и обеспечить условия надежной работы, то для систем 220 kV должны установить для каналов неусиленных катушек импульсное пробивное напряжение порядка 300 kV. Увеличение ширины масляных каналов нежелательно из-за экономических условий, и, кроме того, мы здесь связаны с реактанцем. Утолщение шайбы свыше $2,5 \div 5$ mm было бы даже для 220-киловольтного трансформатора затруднительным из-за отсутствия места для краевого выступа шайб. Между тем, обмотка кембриком (или бумагой) всех катушек недопустима не только со стороны стоимости, но и нагрева.

Поэтому в отношении трансформаторов 220 kV желательно а 380 kV необходимо идти по другому пути — по линии снижения градиентов посредством компенсации емкостных токов (нерезонирующие системы¹¹⁾). Что касается трансформатора 160 kV, то, вообще говоря, и при резонирующей системе еще не возникает больших осложнений в отношении межкатушечной изоляции.

При всем том заметим, что при импульсных испытаниях трансформаторов (подобные испытания производились ВЭИ над продукцией МОТЭЗ) часто наблюдаются перекрытия цилиндру между катушками, расположенными довольно далеко друг от друга.

Несомненно, что электрическая крепость возрастает и пропорционально расстоянию между катушками (благодаря участку пути поверхностного разряда). Между тем, напряжения, возникающие между удаленными катушками, в резонирующей системе могут быть весьма высокими. Этот вопрос требует еще дополнительного экспериментального исследования.

Что касается начальных катушек, то вообще говоря, толщину масляных каналов и кембрика здесь можно без особого ущерба увеличить и получить, например, в 220-киловольтном резонирующем трансформаторе достаточные запасы электрической крепости.

3. Расчет градиентов в начальных катушках

Не всегда можно определить градиенты опытным путем. Но для первых катушек возможен и расчет градиентов, дающий достаточную ориентацию. С некоторыми изменениями в деталях описываемый ниже метод применим для разных типов трансформаторов, а также для статоров вращающихся машин.

При расчете исходим из следующего положения: градиент у линейного конца при „первоначальном“ (емкостно-распределении определяет наибольший градиент за весь процесс перенапряжения¹²⁾).

Заметим, что в отношении остальной обмотки такого профиля не существует. Мы можем и для этих точек най

⁸⁾ Столь высокий запас электрической прочности — следствие механических и технологических требований к витковой изоляции.

⁹⁾ Утолщение витковой изоляции мотивируется желанием усилить изоляцию между катушками (16 mm от меди до меди, прессшпан-шайба 2,5 mm).

¹⁰⁾ Некоторые результаты приведены в докладе автора на Конференции по перенапряжениям (Ленинград, январь 1934 г.). Трансформаторы — „ТЭЭ“ № 1—2, 1932. Положение определяется экспериментально.

¹¹⁾ Что касается изоляции относительно сердечника, то нерезонирующий трансформатор не имеет особых преимуществ (см. доклад автора на Конференции по перенапряжениям, Ленинград, 1934 г.). Изоляция изоляции в резонирующем трансформаторе“).

¹²⁾ Обоснование этого положения приведено в статье Карасева и Кузнецова, „ТЭЭ“ № 1—2, 1932. Положение определяется экспериментально.

величину градиента первоначального распределения, но она не будет характеризовать расчетного градиента.

На рис. 10 представлен радиальный разрез через пару катушек, расположенных в середине обмотки. Взята обмотка из меди прямоугольного сечения. Показаны емкости между витками K_w и емкости между витками через канал C_w . Сна-

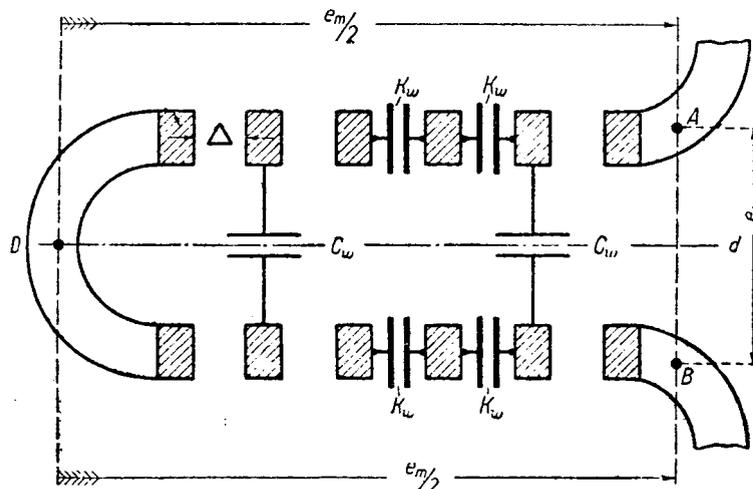


Рис. 10. Схематический разрез через катушки

чала не будем учитывать емкостей относительно земли и представим себе сердечник удаленным. Во время прохождения крутого фронта на данной паре катушек возникнет напряжение e_m . Рассматривая рис. 10, мы видим, что через „точку перехода“ D можно провести линию симметрии Dd . Плоскость, делящая межкатушечное пространство пополам (след ее и есть Dd), будет всюду иметь потенциал $\frac{e_m}{2}$, т. е.

она является эквипотенциальной. Можем представить себе, что эта эквипотенциальная плоскость разделит каждую из емкостей на две последовательно включенные емкости двойной величины. Приходим к схеме рис. 11, причем распространяем ее на всю обмотку. Будем пока считать, что обмотка состоит из одинаковых катушек, т. е. что обмотка „равномерная“. Тогда не только все емкости K между собой равны ($K_m = K_w$, см. рис. 10), но в силу симметрии и все емкости C равны одной и той же величине $2C_w$.

Рассмотрим часть CD , выбрав произвольную катушку. Очевидно, мы можем подсчитать емкость U_{CD} плоскости C относительно плоскости D . Для этого применим формулу „равносторонней цепочки“. При этом учтем, что разрез проведен через точки перехода с катушки на катушку; для разреза в перпендикулярной плоскости соединительные провода $C\zeta$ и $D\delta$ должны на чертеже отсутствовать. Емкость принимаем как полусумму емкостей, соответствующих указанным двум разрезам¹³⁾. Получаем

$$\left. \begin{aligned} U_{CD} = U_{BC} = U_{DE} = \dots = U \approx \left(1 + \frac{1}{p}\right) C_w n, \\ p = 2n \sqrt{\frac{C_w}{K_w}} \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь C_w и K_w — соответственные емкости между витками, n — число витков в катушке, p — „коэффициент неравномерности распределения напряжения по виткам“. В силовых

¹³⁾ При бесконечно большой частоте независимо от плоскости разреза нужно считать, что соединительные провода „разомкнуты“. Но при снижении частоты можно считать, что самоиндукция переходного провода не задерживает тока. Базируясь лишь на схеме с разомкнутыми соединительными проводами, приходим к логическому противоречию, ибо самоиндукция витка распределена по его окружности, и, например, у внутреннего витка имеются точки, не соединенные с внутренним витком соседней катушки иначе, как через самоиндукцию витка. Разница между емкостями U_{CD} , соответствующими двум „разрезам“, обычно оказывается небольшой, да, и того, величина U войдет под корень. Проще всего взять

трансформаторах он обычно больше чем $3 \div 4$; при этом можно применять указанное приближенно равенство (1).

Мы рассматривали до сих пор катушки, расположенные в середине обмотки. Чтобы вся обмотка, включая и начальные катушки, была в нашем смысле „равномерной“, над первой катушкой должно стоять емкостное кольцо, относительно которого каждый виток должен иметь емкость $2C_w$. Тогда это кольцо можно принять за ту симметричную эквипотенциальную плоскость, которую можно было бы провести, если бы обмотка не оканчивалась на первой катушке.

Ниже разбирается случай, когда указанное условие и не соблюдено.

Итак, вся равномерная обмотка распадается на равные последовательно включенные емкости U . Учтем теперь влияние сердечника. Если приключить емкости W катушек относительно земли, то получим известную емкостную „одностороннюю“ цепочку (рис. 12, $U_I = U_{II} = \dots = U$).

Если N — число всех катушек, то при счете от левой ного конца на m -ю катушку ляжет напряжение

$$e_m = E \sqrt{\frac{W}{U}} \frac{\operatorname{ch}(N-m) \sqrt{\frac{W}{U}}}{\operatorname{sh} N \sqrt{\frac{W}{U}}} \quad (2)$$

Напоминаем, что формулы имеют практический смысл для катушек, лежащих недалеко от ввода.

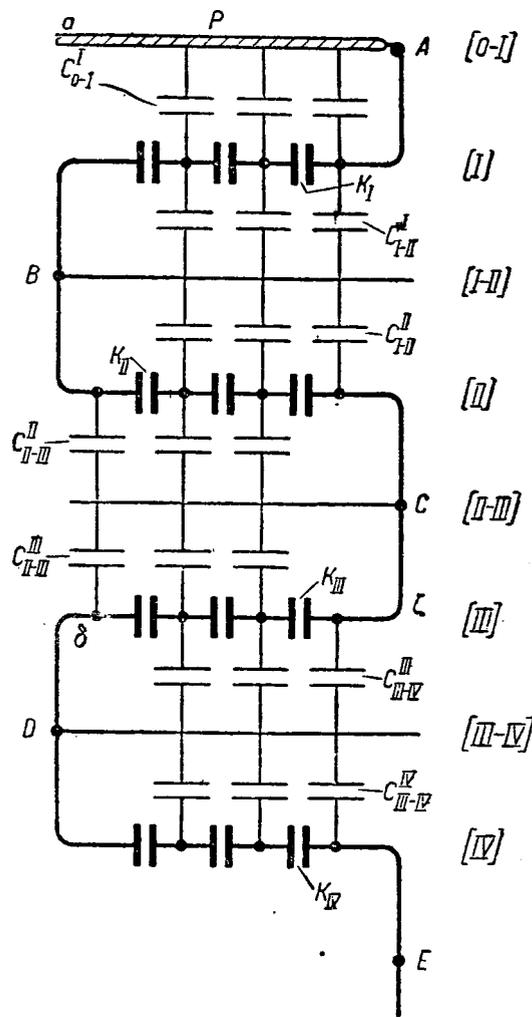


Рис. 11. Емкостная схема замещения

Что касается витковых напряжений, то наибольшие значения получаются для концевых витков каждой катушки и выражаются

$$(e.) \approx e \sqrt{\frac{C_w}{U} + E \frac{W}{U}} \quad (3)$$

(справедливо для $p > 3 \div 4$). Член $E \frac{W}{K_w}$ имеет малый удельный вес и выражает приближенный учет радиального поля не землю, которое налагается на поле, порожденное напряжением e_m .

Перейдем к общему случаю „неравномерной обмотки“, когда емкостное кольцо может отстоять от первой катушки на произвольном расстоянии и, кроме того, емкости K_w и C_w между витками для разных катушек могут быть разными. Вообразим опять емкости относительно земли отсутствующими. Проведем ряд эквипотенциальных поверхностей через точки перехода с катушки на катушку. Эти поверхности, вообще говоря, не будут уже плоскостями, перпендикулярными оси обмотки, но будут искривлены. Поскольку искривление не будет большим, заменим мысленно кривые поверхности горизонтальными плоскостями, близкими к ним. Эти плоскости не будут уже непременно плоскостями симметрии, ибо должны максимально приближаться к истинным кривым поверхностям. Обмотка расчленилась на ряд последовательных неравных между собой емкостей U_m . По сравнению с предыдущим случаем эквипотенциальные плоскости как бы сместятся.

Обозначим через $C_{m(m) \div (m+1)}^m$ емкость витка m -й катушки относительно плоскости проходящей между m -й и $(m+1)$ -й катушками (рис. 11). Через K_m — емкость между витками m -й катушки соседними в горизонтальном направлении. Символом $Q_{(m) \div (m+1)}$ обозначим витковую емкость через канал, разделяющий m -ю и $(m+1)$ -ю катушки. Этой емкости, заданной конструктивно, соответствует C_w рис. 10. Число витков в m -й катушке обозначим через n_m . Примем, что счет катушек идет от линейного конца.

Введем „коэффициент смещения“, показывающий, насколько смещена эквипотенциальная плоскость от своего симметричного положения:

$$\xi_{(m) \div (m+1)}^m = \frac{C_{(m) \div (m+1)}^m}{Q_{(m) \div (m+1)}}. \quad (4)$$

При симметричном расположении, когда плоскость делит пространство между катушками пополам, коэффициент $\xi = 2$. Если предельные значения: $+1$ и ∞ .

Применяя формулы „неравносторонней цепочки“ и беря опять среднее из емкостей, соответствующих двум указанным выше „разрезам“, получим

$$\left. \begin{aligned} U_m &= n_m Q_{(m) \div (m+1)} \xi_{(m) \div (m+1)}^m \xi_m, \\ \xi_m &= \frac{1}{1 + \delta} \left[\frac{1}{2\sqrt{\mu}} \left(\frac{2}{\operatorname{sh} \sqrt{\mu}} + \frac{\delta + \frac{1}{\delta}}{\operatorname{th} \sqrt{\mu}} \right) + 1 \right] \approx \\ &\approx \frac{1}{1 + \delta} \left[\frac{1}{2\sqrt{\mu}} \left(\delta + \frac{1}{\delta} \right) + 1 \right] \\ \delta &= \frac{Q_{(m) \div (m+1)} \xi_{(m) \div (m+1)}^m}{Q_{(m-1) \div (m)} \xi_{(m-1) \div (m)}^m}, \\ \mu &= \frac{n_m^2 Q_{(m-1) \div (m)} \xi_{(m-1) \div (m)}^m}{K_m} + \\ &+ \frac{n_m^2 Q_{(m) \div (m+1)} \xi_{(m) \div (m+1)}^m}{K_m} \end{aligned} \right\} (5)$$

Приближенное равенство применимо, если $\sqrt{\mu}$ (аналогично преждему p) больше $3 \div 4$. Символ $\xi_{0 \div 1}^0$ лишен смысла, так как самое емкостное кольцо является эквипотенциальной плоскостью. Вместо произведения $\xi_{0 \div 1}^0 Q_{0 \div 1}$ в формулы нужно представлять витковую емкость относительно емкостного кольца, т. е. $C_{0 \div 1}^1$ (рис. 11).

Величины Q , K , n могут быть получены из конструктивных данных обмотки, однако для вычисления U_m нужно знать еще величины коэффициентов смещения ξ . Можно

положение наших плоскостей нам неизвестно. Поэтому будем поступать по методу последовательного приближения.

Зададимся приближенным положением плоскостей. Можем, например, провести их как равноделящие межкатушечные пространства и положить все $\xi = 2$. Вычисляем теперь емкость U_m по формулам (5). Далее условие распределения напряжения по последовательным емкостям U_m дает для напряжения на m -й емкости

$$e_m = E \frac{1}{q=N}, \quad (6)$$

$$U_m \sum_{q=1}^1 \frac{1}{U_q}$$

где N — число всех катушек.

Поле между катушками мы можем принять приблизительно параллельным оси обмотки. Через две емкости C , разделяемые нашей эквипотенциальной плоскостью, проходит один и тот же поток. Следовательно,

$$e_m C_{(m) \div (m+1)}^m = e_{m+1} C_{(m) \div (m+1)}^{m+1} \quad (7)$$

или, учитывая (4) и соотношения

$$\frac{1}{Q_{(m) \div (m+1)}} = \frac{1}{C_{(m) \div (m+1)}^m} + \frac{1}{C_{(m) \div (m+1)}^{m+1}},$$

можем написать вместо (7)

$$\left. \begin{aligned} \xi_{(m) \div (m+1)}^m &= \frac{e_{m+1} + e_m}{e_m}, \\ \xi_{(m) \div (m+1)}^{m+1} &= \frac{e_{m+1} + e_m}{e_{m+1}} \end{aligned} \right\} (8)$$

Рис. 12. Приведенная емкостная схема замещения с учетом емкостей относительно земли

Мы получили новые значения ξ . Вычисляем их для всех i , принимаем за исходные и снова повторяем весь круг. Степень приближения определяется степенью схождения значений ξ , взятых вначале и полученных в конце этого круга вычислений. Практически часто достаточно первого круга: т. е. можно довольствоваться значениями $\xi = 2$.

Обычно главная часть обмотки состоит из одинаковых („нормальных“) катушек. Можем принять, что несимметрия имеет место только для P начальных катушек, что упрощает вычисления. В число P должны войти усиленные катушки несколько нормальных. Остальные $N - P$ катушек составят обмотку, которую можем считать равномерной, ибо практически эквипотенциальные плоскости здесь уже займут симметричное положение. Следовательно, эта часть состоит из $N - P$ последовательно включенных равных емкостей U . Вычисляем емкость U , как указано выше при рассмотрении равномерной обмотки. Можем считать, что последовательно с частью, состоящей из P начальных катушек, включена емкость $\frac{U}{N - P}$. В предыдущем расчете ничего не изменится только вместо формулы (6) нужно пользоваться формулой

$$e_m = E \frac{1}{U_m} \frac{1}{N - P} + \sum_{q=1}^1 \frac{1}{U_q}. \quad (6a)$$

Между тем, можем производить расчеты лишь для P катушек.

Можно упростить вычисления ξ_m по формуле (5), построив кривые для практического диапазона μ и δ (рис. 13). Все

чины μ вычисляются просто, так как коэффициенты $\frac{n^2 Q}{K}$ [см. формулу (5)] неизменны для всех „кругов приближения“ - Так же просто вычисляются δ .

Получив с нужной степенью точности емкости U_m , вычисляем емкости W катушек относительно земли и состав-

Напряжения между соседними в горизонтальном ряду витками, для крайних пар витков (при $\sqrt{\mu} > 3 \div 4$):

$$(e_w)_{s=0} \approx \frac{e_m}{n_m} \sqrt{\mu} \frac{1}{1+\delta} + E \frac{W_m}{K_m} (-1)^{m+1},$$

$$(e_w)_{s=n_m} \approx \frac{e_m}{n_m} \sqrt{\mu} \frac{\delta}{1+\delta} + E \frac{W_m}{K_m} (-1)^{m+1}.$$

Одно из этих напряжений является наибольшим „напряжением на виток“ в m -й катушке. Что касается напряжений на виток, то их нужно множить еще на эмпирический коэффициент $\sim 1,5$.

В сложных случаях можно не производить вычислений, а собрать электрическую схему замещения, инсценировав проводимостями емкости между витками и относительно земли (это можно сделать, например, с помощью „стола коротких замыканий“). Вместо N_c катушек рис. 12 можно включить подсчитанную входную емкость этой части обмотки. Прилагая к схеме низковольтное напряжение, можно найти его распределение по омическим проводимостям; это распределение будет эквивалентно емкостному распределению по обмотке.

Таким методом были определены теоретические градиенты для обмотки свирского трансформатора [см. выше схематический разрез обмотки (см. рис. 6)]. Нетрудно видеть, что для средней части обмотки за вычетом усиленных катушек (где помимо влияния утолщения изоляции самое расположение емкостного кольца создает асимметрию) и нескольких нормальных катушек в качестве емкостной схемы замещения служит цепочка, изображенная на рис. 14. Действительно, эквипотенциальные поверхности можно провести так, как указано на рис. 6, что и приводит к схеме рис. 14.

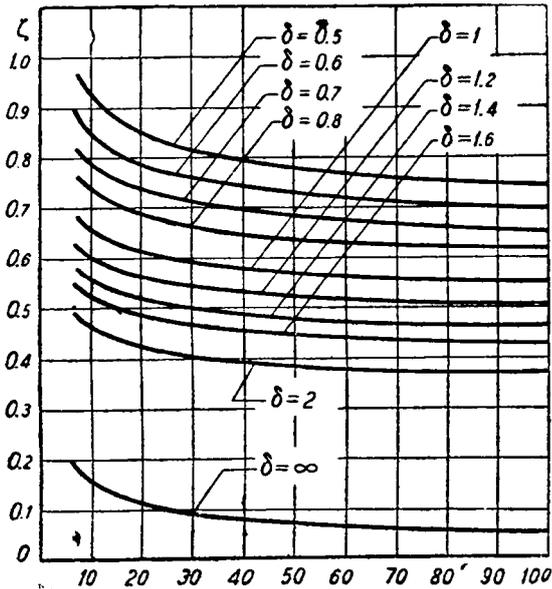


Рис. 13. Расчетные кривые

$$\tau = \frac{1}{1+\delta} \left[\frac{1}{2\sqrt{\mu}} \left(\frac{2}{\text{sh}\sqrt{\mu}} + \frac{\delta + \frac{1}{\delta}}{\text{th}\sqrt{\mu}} \right) + 1 \right].$$

ляем схему рис. 12. Вычисляем емкость H_M точки M относительно земли по формуле „входной емкости“ равномерной обмотки

$$H_M \approx \sqrt{UW}$$

и вместо части MO включаем между M и землей эту емкость. По полученной схеме нетрудно рассчитать распределение напряжений. Для этого начинаем расчет от нейтрали и, постепенно подвигаясь к линейному концу, определяем емкость H точек a, b, \dots, p, q, A относительно земли. Тогда напряжения, лежащие на катушки I, II и т. п., определяются как

$$e_1 = E \frac{H_q}{U_I}, \quad e_2 = (E - e_1) \frac{H_p}{U_{II}} \dots \quad (9)$$

Для еще большего приближения к теоретической точности мы могли бы производить интеграцию дальше, уже исходя из тех напряжений e_m , которые получены после присоединения емкостей W [вместо формул (6), пользуясь формулами (9)].

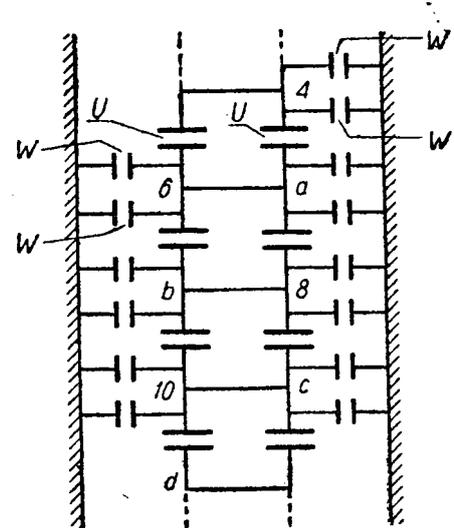


Рис. 14. Емкостная схема замещения „зигзаг-обмотки“

Проводимостями были инсценированы емкости витков для первых шести катушек и входная емкость остальной части обмотки (вычисленная исходя из схемы рис. 14).

Выражаю благодарность инж. Панову за ценные материалы и указания и совместно со мной проводившим работу инж. Эйману и инж. Шпитальскому.

13/II 1934 г.

Теоретические основания работы механического вибрационного выпрямителя и возможность упрощения его конструкции

Проф. А. Г. Белявский

Новочеркасск, Электротехническая лаборатория Северокавказского индустриального института

Автору настоящей работы было поручено разработать тип упрощенного вибрационного механического выпрямителя для выпрямленного тока 8—10 А при напряжении 20—25 В. Задача оказалась гораздо сложнее, чем это можно было предполагать, так как сколько-нибудь подробной теории вибрационных механических выпрямителей не было ¹⁾.

Ввиду указанного пришлось сначала дать теоретические обоснования вибрационных выпрямителей.

Детальное осциллографическое исследование существующих типов вибрационных выпрямителей, а также теоретические выводы показали, что вибрационный выпрямитель может быть построен весьма упрощенного типа.

Настоящая работа и представляет собой сводку результатов как теоретической, так и экспериментальной работы, проделанной автором по разработке упрощенного типа вибрационного выпрямителя, построенного в электротехнической лаборатории Северокавказского индустриального института.

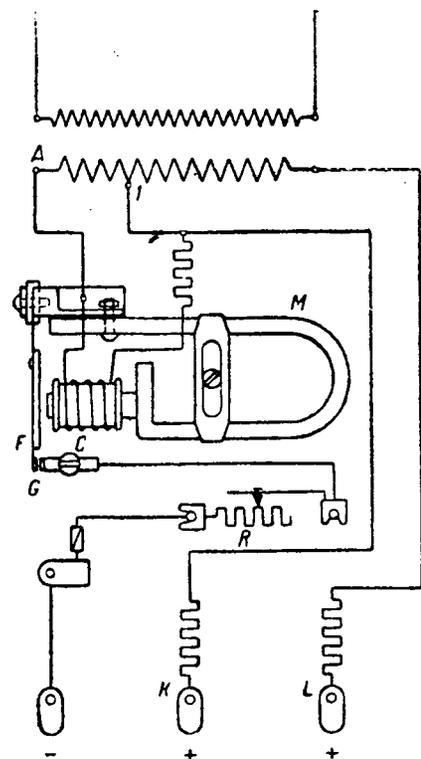


Рис. 1

Основной частью вибрационных выпрямителей является колеблющаяся пластинка, которая служит контактом. Схематично этот тип выпрямителя изображен на рис. 1. Выпрямитель состоит из катушки (соленоида) C, к которой подводится напряжение от части витков ($A = I$) вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого присоединяется к сети переменного тока. Зажим A вторичной обмотки трансформатора подводится к колеблющему язычку F и через контакт S и реостат R к отрицательному зажиму заряжаемой батареи. Если переменный ток проходит через катушку C, то язычок F будет притягиваться к сердечнику катушки с силой

$$\frac{B^2 S}{8\pi}$$

¹⁾ Очень хорошо представил положение вопроса о теории вибрационных механических выпрямителей L. Schüler, главный инженер фирмы Max Levy в Берлине, в своем докладе Германскому электротехническому союзу (Elektrotechnischer Verein) о новом типе механического выпрямителя. Он следующими словами охарактеризовал это положение; Pendelgleichrichter werden seit einer Reihe von Jahren von mehreren Firmen mit mehr oder weniger gutem Erfolg hergestellt, über die Theorie ihrer Wirkungsweise ist jedoch bisher wenig veröffentlicht worden. Das ist eigentlich zu bedauern, denn die Analyse des bei diesem Apparaten auftretenden innigen Ineinandergreifens elektrischer und mechanischer Vorgänge wird des theoretischen Interesses halber nicht ermangelt*.

где B есть индукция и S — площадь поперечного сечения катушки. Очевидно, что язычок будет притягиваться два раза за период и замыкать контакт G, а следовательно, переменный ток будет проходить в течение части обоих полупериодов, и кривая тока будет иметь примерно форму, изображенную на рис. 2.

Для того чтобы выпрямление имело место, необходимо уничтожить отрицательную часть волны. Для этой цели выпрямитель снабжается постоянным магнитом, который нейтрализует магнитный поток соленоида, когда ток в катушке имеет направление, соответствующее отрицательной части волны. Благодаря этому кривая выпрямленного тока будет

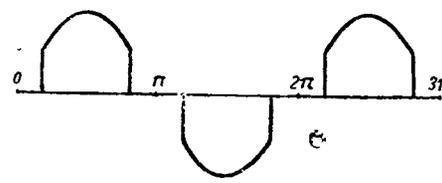


Рис. 2

иметь форму, изображенную на рис. 3. Такая форма кривой получается вследствие того, что известный промежуток времени протечет после того, как сердечник соленоида дает импульс и якорь (язычок) выпрямителя соприкасается с контактом.

Кроме рассмотренного типа выпрямителя, который схематически может быть изображен так, как это сделано на рис. 4а, возможны еще типы, изображенные на рис. 4б, и 4с. В основной схеме (рис. 4а) якорь выпрямителя, несущий контакт K и представляющий собой пластинку из магнитного материала, помещается между полосами электромагнита W. Катушка электромагнита W питается переменным током, а пластинка с контактом K соединяется с постоянным магнитом M. Переменной местами постоянного магнита M и катушки переменного тока получаем схему, изображенную на рис. 4б. В этой схеме контактная система (якорь выпря-

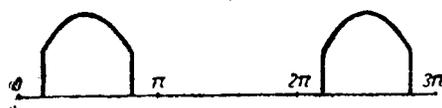


Рис. 3

мителя) намагничивается катушкой, питаемой переменным током, и помещается между полюсами постоянного магнита M. Третья схема вибрационного выпрямителя изображена на рис. 4с. В этом случае якорь выпрямителя представляет собой просто стальную пластинку, помещенную в поле электромагнита переменного тока. Катушка электромагнита W питается выпрямляемым переменным током, который включается последовательно с аккумуляторной батареей, а потому через катушку электромагнита будет течь и переменный ток, и этим способом достигается необходимая поляризация.

Для изучения явлений, происходящих в вибрационном выпрямителе, необходимо совместно решить уравнения, которые дает теория упругости и электротехника.

Сначала рассмотрим колебания стержня (рис. 5), не нагруженного сосредоточенным грузом. Предположим, что колебания происходят в одной из главных плоскостей изгиба стержня M, и что измерения поперечного сечения стержня малы по сравнению с длиной стержня. В таком случае д

любого поперечного сечения стержня, отстоящего на x от места закрепления, можно применить дифференциальное уравнение упругой линии

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = -M, \quad (1)$$

где EJ — жесткость на изгиб, а M — изгибающий момент в рассматриваемом поперечном сечении. Продифференцировав уравнение (1) два раза по x , получим дифференциальное уравнение стержня, подверженного действию равномерно распределенной нагрузки, представляющей собой вес стержня.

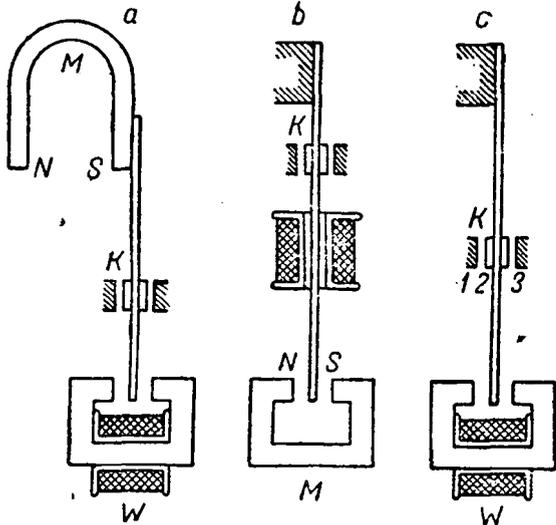


Рис. 4

Для получения уравнения поперечного колебания рассматриваемого стержня на основании принципа Даламбера необходимо принять во внимание силы инерции

$$- \frac{p}{g} \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (2)$$

где p — вес единицы длины стержня, а g — ускорение силы тяжести.

Общее уравнение поперечного колебания стержня в рассматриваемом случае, случай призматического стержня, у которого EJ остается постоянной по всей длине стержня, будет иметь вид

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = - \frac{p}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Как известно из теории упругости, при колебании стержня прогиб в любом месте его изменяется гармонически со временем и может быть представлен выражением

$$y = y'(A \cos \omega t + B \sin \omega t), \quad (4)$$

где y' есть функция абсциссы x , определяющая форму рассматриваемого колебания, а ω — угловая скорость. Подставляя выражение (4) в уравнение (3) и обозначая

$$\frac{\omega^2 p}{Eyg} = k^4, \quad (5)$$

получим окончательно уравнение

$$\frac{\partial^4 y'}{\partial x^4} = k^4 y'. \quad (6)$$

Общий интеграл уравнения (6) будет иметь вид

$$y' = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \operatorname{sh} kx + C_4 \operatorname{ch} kx, \quad (7)$$

где C_1, C_2, C_3 и C_4 — произвольные постоянные, определяемые из конечных условий,

Для решения нашего частного случая лучше общее уравнение (7) преобразовать в следующую форму:

$$y' = C_1(\cos kx + \operatorname{ch} kx) + C_2(\cos kx - \operatorname{ch} kx) + C_3(\operatorname{sh} kx + \sin kx) + C_4(\operatorname{sh} kx - \sin kx). \quad (8)$$

Для рассматриваемого случая, когда левый конец стержня закреплен, получим следующие конечные условия;

$$\begin{aligned} (y')_{x=0} &= 0, & \left(\frac{dy'}{dx}\right)_{x=0} &= 0, \\ \left(\frac{d^2 y'}{dx^2}\right)_{x=l} &= 0, & \left(\frac{d^3 y'}{dx^3}\right)_{x=l} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Чтобы удовлетворить первым двум конечным условиям (9), необходимо положить в общем решении (8) $C_1 = C_3 = 0$, а потому уравнение (8) обращается в

$$y' = C_2(\cos kx - \operatorname{ch} kx) + C_4(\sin kx - \operatorname{sh} kx). \quad (10)$$

Из условий третьего и четвертого из выражений (9) получим

$$\begin{aligned} C_2(-\cos kl - \operatorname{ch} kl) + C_4(-\sin kl - \operatorname{sh} kl) &= 0, \\ C_2(\sin kl - \operatorname{sh} kl) + C_4(-\cos kl - \operatorname{ch} kl) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Решения для постоянных C_2 и C_4 , отличные от нуля, можно получить только тогда, когда определитель уравнений (11) равен нулю. Таким образом получаем следующее уравнение частоты:

$$(-\cos kl - \operatorname{ch} kl)^2 + (\sin^2 kl - \operatorname{sh}^2 kl) = 0. \quad (12)$$

Приняв во внимание, что

$$\begin{aligned} \cos^2 kl + \sin^2 kl &= 1, \\ \operatorname{ch}^2 kl - \operatorname{sh}^2 kl &= 1, \end{aligned}$$

преобразуем уравнение (12) в уравнение (13):

$$\cos kl \cdot \operatorname{ch} kl = -1. \quad (13)$$

Последовательные корни этого уравнения, дают возможность определить частоты как основного колебания стержня, так и высших гармонических. Первые шесть значений корней уравнения (13) приведены в табл. 1.

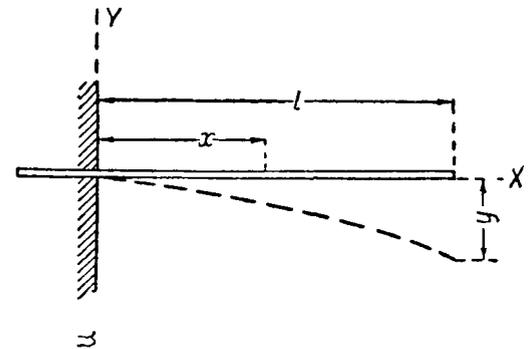


Рис. 5

| Таблица 1 | |
|-----------|--------|
| $k_1 l$ | 1,875 |
| $k_2 l$ | 4,694 |
| $k_3 l$ | 7,855 |
| $k_4 l$ | 10,996 |
| $k_5 l$ | 14,137 |
| $k_6 l$ | 17,279 |

Частоту как основного колебания, так и высших гармонических получим из выражения (5), переписав его в виде

$$\frac{\omega_n^2 p}{EJg} = k_n^4, \quad (14)$$

где значок n , y , ω и k показывает номер высшего гармонического колебания. Основное колебание будет иметь значок 1.

Из выражения (14) легко получить частоту любого колебания, помня, что $\omega = 2\pi\nu$, где ν — есть частота колебаний. Из выражения (14) определяем ω — угловую скорость;

$$\omega_n = k_n^2 \sqrt{\frac{EJg}{p}}. \quad (15)$$

Частота колебаний определится:

$$\nu_n = \frac{k_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EJg}{p}}. \quad (16)$$

Для определения, например, основного колебания возьмем из табл. 1 для kl значение $k_1 l = 1,875$. Тогда для частоты основного колебания получим

$$\nu_1 = \frac{3,515}{2\pi} \sqrt{\frac{EJg}{pl^4}}. \quad (17)$$

Соответствующий период колебания будет

$$T_1 = \frac{1}{\nu_1} = \frac{2\pi}{3,515} \sqrt{\frac{pl^4}{EJg}}. \quad (18)$$

Выше были рассмотрены собственные колебания нагруженного и ненагруженного язычка вибрационного выпрямителя. Теперь остается еще рассмотреть случай колебания язычка выпрямителя под действием внешней силы F , изменяющейся по закону синуса, и силы затухания (демпфирующей силы) пропорциональной скорости²⁾. Уравнение движения колеблющейся системы в этом случае напишется:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + \lambda y = F \sin \omega t. \quad (19)$$

В этом уравнении M — масса, b — коэффициент затухания и $F \sin \omega t$ — внешняя сила, действующая в вертикальном направлении и изменяющаяся по закону синуса. Полагая

$$\frac{b}{2M} = n; \quad m^2 = \frac{\lambda}{M} \quad \text{и} \quad f = \frac{F}{M}$$

и подставляя эти величины в уравнение (19), мы получим

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2n \frac{dy}{dt} + m^2 y = f \sin \omega t. \quad (20)$$

Однородное уравнение вида

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2n \frac{dy}{dt} + m^2 y = 0$$

при обозначении $\omega_1^2 = m^2 - n^2$ имеет, как известно, следующее общее решение³⁾:

$$y = e^{-nt} (A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t). \quad (21)$$

Постоянные интегрирования A и B определяются из начальных условий.

Полученное колебательное движение имеет период

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{m^2 - n^2}}. \quad (22)$$

Амплитуда колебаний, выражаемая уравнением (21), вследствие наличия множителя e^{-nt} постепенно с течением времени убывает, и, следовательно, возникшие колебания будут постепенно затухать.

Общее решение уравнения (20) получится, если к решению, соответствующему однородному уравнению (21), добавить частное решение уравнения (20).

Это частное решение, как известно, принимает вид

$$y = C \sin \omega t + D \cos \omega t. \quad (23)$$

²⁾ Силы затухания могут вызываться, вообще говоря, различными причинами, а именно: трением воздуха или жидкости, внутренним трением в материале колеблющегося тела, трением между поверхностями скольжения и т. п. В рассматриваемом случае колебания язычка выпрямителя в воздухе должно быть принято во внимание сопротивление воздуха, и эта сила сопротивления в случае небольших скоростей, с какими мы имеем дело в вибрационном выпрямителе, пропорциональна первой степени скорости, в то время как для больших скоростей она должна быть принята пропорциональной второй степени скорости.

³⁾ Здесь принято, что величина n , зависящая от трения, меньше m , а потому величина $\sqrt{m^2 - n^2}$ действительная, в противном случае, как известно, имеет место апериодическое движение.

Таким образом общее решение уравнения (20) будет иметь вид

$$y = e^{-nt} (A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t) + C \sin \omega t + D \cos \omega t. \quad (24)$$

Подставляя частное решение (23) в уравнение (20), получим следующие уравнения для определения постоянных C и D :

$$\begin{aligned} -C\omega^2 + 2D\omega n + Cm^2 &= 0, \\ -D\omega^2 - 2C\omega n + Dm^2 &= f, \end{aligned}$$

откуда

$$C = -\frac{2f\omega n}{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2}$$

и

$$D = \frac{f(m^2 - \omega^2)}{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2}.$$

Первый член правой части уравнения (24), содержащий множитель e^{-nt} , представляет, как было указано выше, затухающие собственные колебания. Два других члена, пропорциональные f , представляют вынужденные колебания. Эти колебания вызываются периодически изменяющейся внешней силой и не затухают. Период этих вынужденных колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (25)$$

т. е. тот же самый, что и периодически изменяющейся внешней силы, а амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна величине этой силы.

Выражение для вынужденных колебаний после затухания собственных колебаний будет иметь вид

$$\begin{aligned} y = & -\frac{2f\omega n}{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2} \sin \omega t + \\ & + \frac{f(m^2 - \omega^2)}{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (26)$$

Выражение (26) для вынужденных колебаний может быть упрощено, если ввести следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{2f\omega n}{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2} &= -Q \sin \alpha, \\ \frac{f(m^2 - \omega^2)}{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2} &= Q \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Выражение (26) принимает вид

$$y = Q (\cos \alpha \sin \omega t - \sin \alpha \cos \omega t),$$

или

$$y = Q \sin (\omega t - \alpha). \quad (28)$$

Амплитуду вынужденных колебаний Q определяем из выражений (27):

$$Q = \frac{f}{\sqrt{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2}}. \quad (29)$$

Таким образом

$$y = \frac{f}{\sqrt{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2}} \sin (\omega t - \alpha). \quad (30)$$

Угол α в уравнении (28) есть разность фаз между вынужденными колебаниями и периодически изменяющейся силой, являющейся причиной вынужденных колебаний.

Тангенс и синус этого угла определяются из выражения (27)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\omega n}{m^2 - \omega^2}, \quad (31)$$

$$\sin \alpha = \frac{2\omega n}{\sqrt{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2}}. \quad (32)$$

Если $m > \omega$, что имеет место в том случае, когда период собственных колебаний системы меньше периода вынужденных колебаний, угол α будет положительный и меньше $\frac{\pi}{2}$.

Из уравнения (28) можно видеть, что вынужденные колебания отстают от силы, вызывающей эти колебания.

Если $m < \omega$, что имеет место, когда период собственных колебаний больше периода вынужденных колебаний, отстаивание вынужденных колебаний будет больше $\frac{\pi}{2}$ и меньше π , т. е.

$$\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi.$$

Если, наконец, $m = \omega$, что имеет место в том случае, когда период собственных колебаний системы равен периоду вынужденных колебаний, т. е. при резонансе $\sin \alpha$, определяемый уравнением (32), будет равен 1, а угол $\alpha = 90^\circ$. Это означает, что во время такого колебательного движения система занимает свое среднее положение в тот момент, когда сила, вызывающая вынужденные колебания, достигает своего максимального значения. Уравнение (28) для рассматриваемого случая ($m = \omega$; $\alpha = 90^\circ$) примет вид

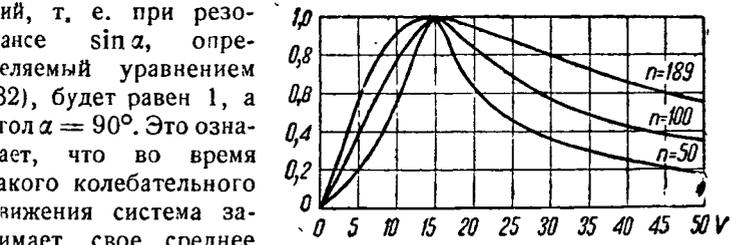


Рис. 6

Уравнение (34) показывает, что наибольшее отклонение колеблющейся системы (стержня, якоря выпрямителя) зависит исключительно от коэффициента затухания b , от силы F и частоты вынужденных колебаний, но не от массы M колеблющейся системы.

$$y = \frac{f}{2\omega n} \sin(\omega t - 90^\circ) = -\frac{f}{2\omega n} \cos \omega t = -\frac{F}{b\omega} \cos \omega t. \quad (33)$$

Таким образом

$$y = -\frac{F}{b\omega} \cos \omega t. \quad (34)$$

Кoeffициент $n = \frac{b}{2M}$ представляет собой величину, которую чрезвычайно трудно вычислить, так как она зависит от температуры, от модуля упругости, от трения системы о воздух и т. д.

На рис. 6 изображены кривые, которые дают амплитуду колебания якоря вибрационного выпрямителя в зависимости от частоты приложенного к выпрямителю напряжения. Кривые даны для различных значений коэффициента $n = \frac{b}{M}$ и показывают, что острота настройки, т. е. отношение амплитуды колебаний при какой-либо частоте к амплитуде, которая имеет место при резонансе, зависит также от коэффициента затухания b . Колеблющаяся пластинка настроена на частоту 15.

Для некоторых типов якорей вибрационных выпрямителей коэффициент n может быть определен путем измерения амплитуды колебания якоря выпрямителя при различных частотах по отношению к амплитуде при резонансе. Различные значения для амплитуды получим из выражения (29):

$$Q = \frac{f}{\sqrt{(m^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 n^2}}.$$

В этом выражении предполагаем, что величины f и n остаются постоянными, а меняется частота приложенного к выпрямителю напряжения.

Полагая, что при резонансе $\omega = \omega_0$ и амплитуда $Q = Q_0$, будем иметь

$$Q_0 = \frac{f}{\sqrt{(m^2 - \omega_0^2)^2 + 4\omega_0^2 n^2}}. \quad (35)$$

Аналогично при некоторой частоте колебаний ω_1 , отличной от резонансной частоты ω_0 , будем иметь $Q = Q_1$ и $\omega = \omega_1$, выражение (29) обратится в

$$Q_1 = \frac{f}{\sqrt{(m^2 - \omega_1^2)^2 + 4\omega_1^2 n^2}}. \quad (36)$$

Решая совместно уравнения (35) и (36), можно определить интересующий нас коэффициент затухания n :

$$n = \sqrt{\frac{m}{4} \cdot \frac{Q_1^2 - Q_0^2}{Q_0^2 \omega_1^2 - Q_1^2 \omega_0^2} + \frac{1}{4}}. \quad (37)$$

При определении величины y — величины отклонения якоря вибрационного выпрямителя от положения равновесия — необходимо под силой F подразумевать силу магнитного притяжения.

Уравнение (33) может быть переписано:

$$y = kF \sin(\omega t - \alpha), \quad (38)$$

где k есть постоянная, определяемая [формулы (18) и (34)] выражением

$$k = \frac{1}{2\omega n l}.$$

Скорость определяется как первая производная по t :

$$\frac{dy}{dt} = k\omega F \cos(\omega t - \alpha). \quad (39)$$

Если через δ обозначить междужелезное пространство, то

$$y = \delta - \delta_1, \quad (40)$$

где δ_1 есть некоторая постоянная. По известной формуле

$$\frac{F}{8\pi} = \frac{B^2 S}{8\pi}, \quad (41)$$

где B есть индукция, изменяющаяся с изменением величины магнитного сопротивления, а S — площадь поперечного сечения намагничивающей катушки. Таким образом

$$\delta = y + \delta_1, \quad \delta = k \frac{B^2 S}{8\pi} \sin(\omega t - \alpha) + \delta_1. \quad (42)$$

Магнитное сопротивление цепи может быть определено из выражения

$$R_{\text{маг}} = \frac{l}{\mu S} + \frac{\delta}{S}, \quad (43)$$

где l — средняя длина магнитных линий в железе магнитной цепи выпрямителя, а μ — магнитная проницаемость. Подставляя выражение (42) в уравнение (43), получаем следующую формулу для магнитного сопротивления:

$$R_{\text{маг}} = \frac{l}{\mu S} + k \frac{B^2}{8\pi} \sin(\omega t - \alpha) + \frac{\delta_1}{S}. \quad (44)$$

Последнее выражение представляет собой сложную функцию, которая не может быть решена обычными способами. Действительно, в уравнении (44) магнитная проницаемость μ изменяется с изменением магнитной индукции B , которая является функцией от времени. Поэтому последнее выражение может быть приближено (без учета потерь на гистерезис)

решена методом, который имеет широкое применение при решении уравнений колебания телефонных мембран.

Из рассмотренного выше видно, что можно довольно точно рассчитать размеры якоря вибрационного выпрямителя, а также ту частоту, для которой этот якорь будет наиболее подходящим: таким образом можно рассчитать главные элементы вибрационного выпрямителя.

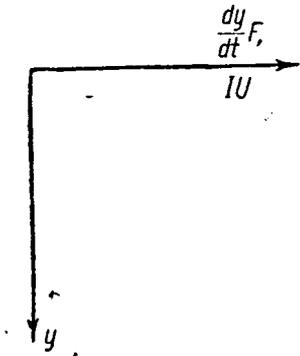


Рис. 7

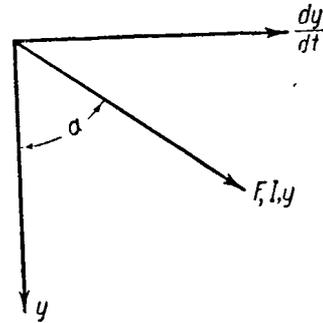


Рис. 8

Из уравнения (30) следует, что, когда частота собственных колебаний системы совпадает с частотой вынужденных колебаний ($m = \omega$), т. е. при резонансе, мы будем иметь для величины отклонения якоря выражение (33).

$$y = -\frac{F}{b\omega} \cos \omega t.$$

Скорость колебаний якоря определяется формулой:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{F}{b} \sin \omega t. \quad (45)$$

Примем, кроме того, во внимание, что механическая сила будет точно в фазе с током, проходящим через намагничивающую катушку. На основании рассмотрения выражения для механической силы и скорости, т. е. уравнений (33) и (45), можно сделать вывод, что при резонансе (при совпадении частоты, на которую настроен якорь вибрационного выпрямителя, с частотой сети, питающей выпрямитель) механическая сила (а следовательно, и ток), скорость и напряжение (если не учитывать самоиндукции намагничивающей катушки) совпадают по фазе, а отклонение якоря отстает от напряжения на 90° . Это может быть выражено диаграммой рис. 7.

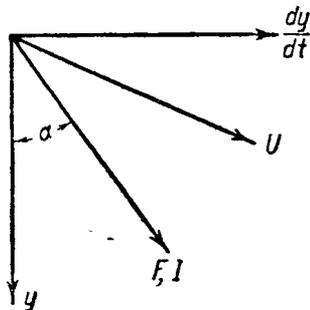


Рис. 9

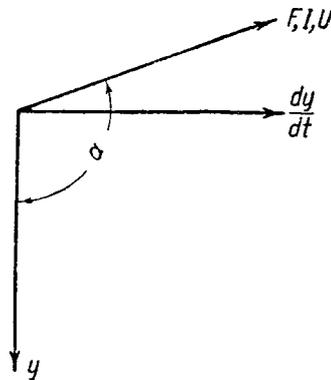


Рис. 10

Рассмотрим случай, когда частота собственных колебаний больше частоты вынужденных колебаний. В этом случае $m > \omega$, как следует из сказанного выше, $\alpha < 90^\circ$, и уравнения для силы отклонения (38) и скорости (39) переписутся:

$$y = KF \sin(\omega t - \alpha),$$

$$\frac{dy}{dt} = K\omega F \cos(\omega t - \alpha).$$

Если не учитывать самоиндукции, то диаграмма примет вид, представленный на рис. 8. При наличии самоиндукции будем иметь диаграмму рис. 9.

Если частота собственных колебаний якоря выпрямителя меньше частоты вынужденных колебаний, т. е. $m < \omega$, то угол α , как было указано выше, будет больше 90° и мы будем иметь диаграмму, изображенную на рис. 10. В этом случае сила будет опережать скорость колебаний. На основании сказанного ясно, что на резонансовой кривой выпрямителя (рис. 11) режим соответствует резонансу.

Правая ветвь резонансной кривой aO_1 соответствует режимам, когда частота сети, в которую включен вибрационный выпрямитель, больше частоты, на которую настроен якорь вибрационного выпрямителя, и для этих режимов, как было выведено выше, возмущающая сила опережает скорость (рис. 10). Левая ветвь резонансной кривой aO соответствует режимам работы, при которых частота сети меньше частоты, на которую настроен выпрямитель; в этом случае возмущающая сила будет отставать от скорости (рис. 10). Самоиндукция вызывает электрический сдвиг фаз, и мы будем иметь диаграмму (рис. 12а). Если самоиндукция большая, то диаграмма принимает вид, изображенный на рис. 12b.

На основании всего сказанного легко сделать вывод, что при резонансе, так как отклонения и напряжение, приложенное к выпрямителю, разнятся по фазе на 90° , выпрямление

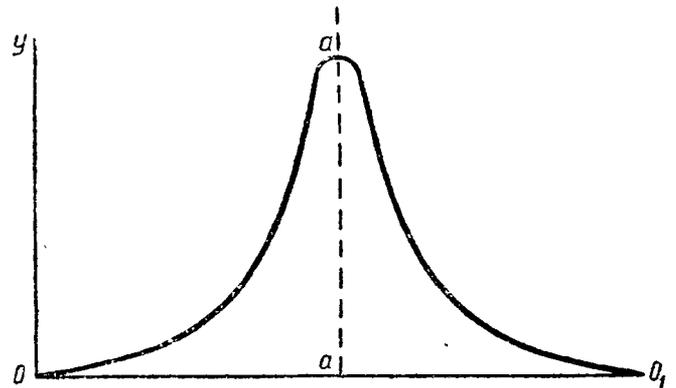


Рис. 11

вообще не может иметь места, так как якорь выпрямителя будет находиться в среднем положении тогда, когда сила (а следовательно, и напряжение при отсутствии самоиндукции) достигает своего наибольшего значения. Следовательно, несмотря на то, что при резонансе амплитуда наибольшая и, вообще говоря, потери наименьшие, этот режим не подходит для работы вибрационного выпрямителя, и мы должны работать вблизи этого режима или же, если желаем работать при резонансе, то искусственно добиться того, чтобы отклонения якоря выпрямителя были конфазами с напряжением, приложенным к выпрямителю.

Для достижения конфажности напряжения и отклонения можно применять различные способы. Рассмотрим три главных способа.

Первый способ получения конфажности между отклонением колеблющейся системы и напряжением выпрямленного переменного тока заключается в том, что при трехфазной сети катушку электромагнита переменного тока включают в другую фазу по отношению к той, в которую включен выпрямитель. Этот способ получения конфажности вследствие его относительной сложности совершенно не применяется.

Второй способ получения конфажности заключается в том, что намагничивающая катушка включается непосредственно в цепь выпрямляемого переменного тока. Вследствие наличия в катушке самоиндукции возбуждаемый ею магнитный поток Φ отстает приблизительно на 90° (рис. 13) от приложенного к катушке напряжения. Вследствие этого колеблющаяся система выпрямителя, настроенная на частоту сети, будет приблизительно на 180° отставать от

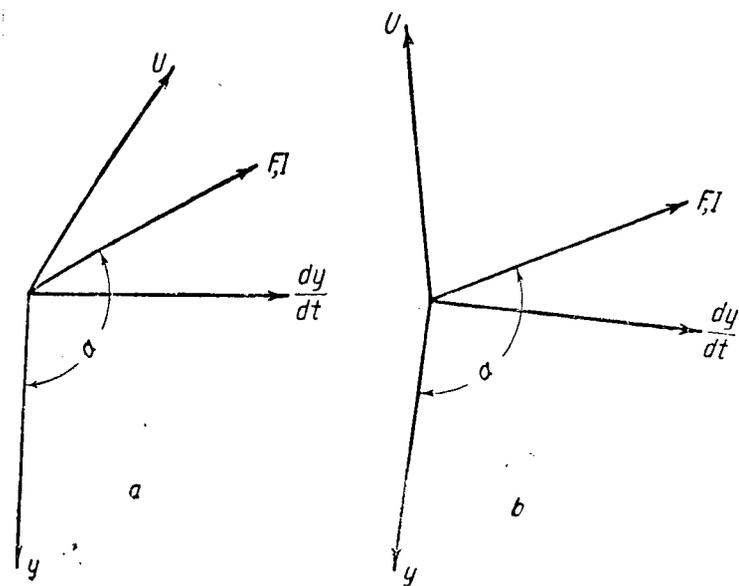


Рис. 12

напряжения. Соответствующим натяжением пружины можно добиться отставания колеблющейся системы на 180° от напряжения переменного тока и тем добиться надлежащей установки в отношении фазы, т. е. добиться включения и выключения цепи переменного тока в надлежащий момент.

Третий способ получения конфазных колебаний якоря выпрямителя заключается в том, что последовательно с катушкой электромагнита переменного тока включается соответствующей емкости конденсатор, который компенсирует самоиндукцию катушки, а также магнитный и механический гистерезис, кроме того, сдвигает так напряжение, что оно начинает совпадать по фазе с отклонениями, и этим достигается то, что контактная система выпрямителя колеблется, имея одну и ту же фазу (конфазна) с переменным током.

Выше было указано, что вибрационные выпрямители строятся таким образом, что используется одна половина волны переменного тока или используются обе половины волны переменного тока. Для последнего случая принципиальная схема дана на рис. 14. На этой схеме: T — трансформатор

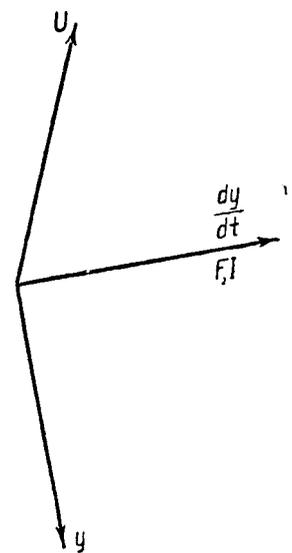


Рис. 13

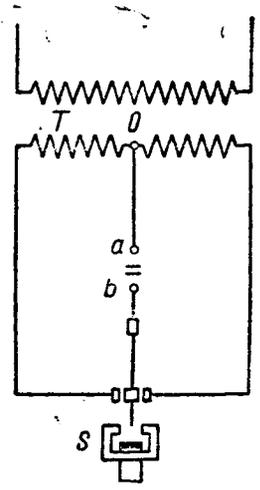


Рис. 14

тор, служащий, с одной стороны, для уменьшения напряжения до величины, при которой работает выпрямитель, а с другой стороны, для получения нулевой точки O , необходимой, если желательно использовать обе полуволны переменного тока; S — рабочая часть выпрямителя, благодаря действию которой якорь выпрямителя приходит в колебательное движение; a и b — зажимы цепи выпрямленного тока.

Рассмотрим теперь те условия, которые должны быть выполнены для того, чтобы выпрямитель мог при различных нагрузках работать хорошо, т. е. без значительного искрообразования у контактов. Рассмотрим случай, когда нагрузка в цепи выпрямленного тока чисто омическая. На рис. 15а изображены кривые выпрямляемого напряжения и тока, а на рис. 15б — кривые выпрямленного напряжения и тока. Так как напряжение и ток совпадают по фазе (влиянием самоиндукции трансформатора мы пренебрегаем), в точке I должно иметь место замыкание, предположим, левого контакта, и это замыкание цепи должно продолжаться до момента II . В момент II якорь выпрямителя должен будет занять среднее положение и одновременно замкнут правый контакт, и это замыкание должно продолжаться до момента III .

Из сказанного следует, что теоретически необходима такая установка контактов, при которой при среднем положении якоря выпрямителя он должен своей контактной частью одновременно касаться обоих контактов (рис. 14).

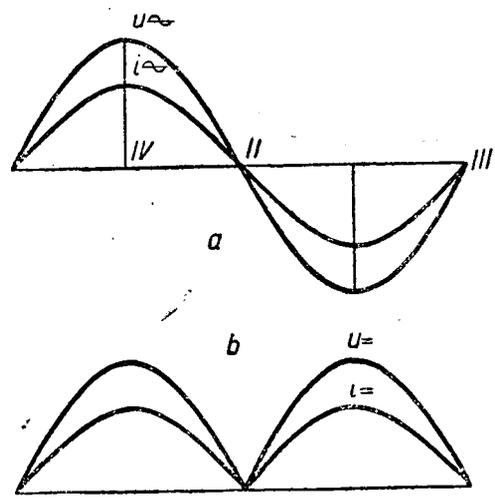


Рис. 15

Само собою очевидно, что практически такое положение якоря невозможно, а потому контакты находятся на небольшом расстоянии. Такое устройство ведет к тому, что замыкание и размыкание происходят при некотором напряжении. Действительно, если положить, что расстояние между контактами равняется $0,2$ мм и отклонение колеблющейся системы (якоря) в одну сторону от среднего положения равно $3,5$ мм, то напряжение при размыкании цепи будет приблизительно 9 V, если максимальное значение переменного тока равно 100 V. Из рассмотренного следует, что напряжение при размыкании можно уменьшить, если увеличить амплитуду колебания якоря.

Перейдем теперь к рассмотрению случая, когда в цепи выпрямленного тока имеется индукционная нагрузка. Присутствие понижающего трансформатора дает всегда некоторую индукционную нагрузку. Если трансформатор имеет сравнительно большую самоиндукцию, то условия коммутирования вибрационного выпрямителя значительно ухудшаются.

В рассмотренном выше численном примере прерываемый ток, если не учитывать влияния самоиндукции, будет иметь 9% своей максимальной величины. При наличии самоиндукции этот ток возбуждает дополнительное напряжение при размыкании, величина которого зависит от промежутка времени, в течение которого ток прерывается. Это дополнительное напряжение будет увеличивать указанное выше напряжение, равное в рассмотренном выше примере 9% от 100 V, и будет причиной искрения контактов.

Если нагрузка выпрямителя будет такова, что появится сдвиг тока относительно напряжения, то в момент заключения I , как это видно из рис. 16, ток i' будет меньше тока i ; при выключении же (момент II), наоборот, ток i' будет больше тока i в отношении $\frac{a}{a}$. Это обстоятельство будет

очевидно, увеличивать искрение выпрямителя. Само собою очевидно и то, что выпрямитель, у которого трансформатор имеет большую самоиндукцию, начинает больше искрить, если уменьшить внешнее сопротивление (омическое). Действительно, это должно иметь место, так как в этом случае увеличивается сдвиг фаз между напряжением и током.

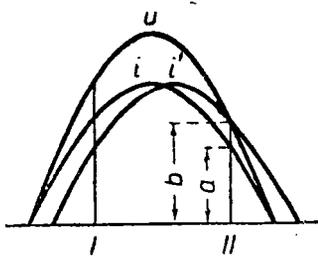


Рис. 16.

Ввиду указанного необходимо делать трансформатор выпрямителя с возможно меньшим рассеянием, а потому трансформаторы вибрационных выпрямителей обычно делаются с относительно большим количеством железа и малым количеством меди. Обмотки также делаются такими, чтобы рассеяние было возможно малым.

Если вибрационный выпрямитель, кроме того, питает электромагниты, реактивные катушки и т. п., то мы будем иметь случаи большой индукционной нагрузки, и условия работы выпрямителя будут тяжелые. Малейшее изменение фазы колебаний якоря по отношению к фазе напряжения уже влечет искрение; а следовательно, и плохую работу выпрямителя. В этих случаях выпрямитель должен быть отрегулирован для каждой нагрузки особо.

Рассмотрим еще случай, когда выпрямитель питает приемник с обратной э. д. с., например, случай зарядки выпрямителем аккумуляторной батареи. Так как в этом случае замыкание цепи должно быть тогда, когда напряжение, приложенное к батарее, равно обратному напряжению батареи, то совершенно очевидно, что при таком режиме работы выпрямителя установка контактов должна быть совершенно другая, чем при нагрузке выпрямителя просто сопротивлениями. В этом случае, даже если в цепи имеется самоиндукция, выпрямитель работает без искрения, так как токи будут малы. На рис. 17 показаны кривые напряжения и тока выпрямителя при работе его на зарядку аккумуляторной батареи, имеющей обратное напряжение $U_{ак}$. В точках I, II, III и IV напряжение выпрямителя равно обратному напряжению аккумуляторной батареи, и в эти моменты должны происходить включение и выключение контактной системы. Диаграмма показывает, что для определенной волны переменного тока для безыскровой работы

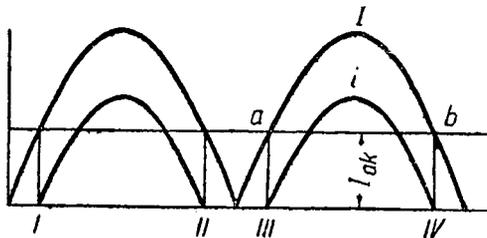


Рис. 17.

выпрямителя теоретически существует только одно значение обратного напряжения, при котором выпрямитель будет работать без искрения. Если изменяется обратное напряжение, то или должно быть изменено приложенное напряжение, или же произведена новая регулировка выпрямителя.

При правильной установке выпрямителя небольшие колебания обратного напряжения не влияют на безыскровую работу выпрямителя. Такой случай, например, имеет место при зарядке свинцовых аккумуляторов. Действительно, в этом случае мы имеем в начале зарядки напряжение на зажимах элемента 2,2 V, а в конце зарядки 2,75 V.

Если при зарядке аккумуляторной батареи работа выпрямителя в отношении искрообразования происходит на границе, то выгодно при начале зарядки установить ток примерно на 10% выше нормального. Тогда при возрастании обратного напряжения при зарядке ток падает до 85% первоначально установленного тока, что как известно, является желательным для самых аккумуляторов.

Если желательно заряжать выпрямителем различное число аккумуляторных батарей, то это достигается выводом ряда зажимов от трансформатора.

Во многих случаях можно добиться уменьшения искрения выпрямителя включением параллельно к контактному устройству конденсатора, который будет брать на себя напряжение размыкания.

На основании рассмотренного выше можно сделать вывод о том, как влияет изменение напряжения на работу выпрямителя. Если выпрямитель нагружен омическим и индуктивным сопротивлениями, при уменьшении приложенного напряжения он будет работать в более легких условиях относительно искрения, так как в этом случае будет уменьшаться и напряжение размыкания. Повышение напряжения ухудшает по тем же причинам работу вибрационного выпрямителя. Совершенно иначе обстоит дело в том случае, когда выпрямитель работает на аккумуляторную батарею. В этом случае, как видно из рис. 16, условия будут более неблагоприятными при колебании напряжения, так как, начиная от точек *a* и *b*, мы будем иметь разности напряжений и токов. Ввиду этого колебание напряжений более неблагоприятно отражается при работе выпрямителя на аккумуляторной батарее. В общем нужно сказать, что вибрационные выпрямители свободно переносят обычно имеющие место колебания напряжения в сети 10—12%.

Гораздо более чувствительны вибрационные выпрямители к колебаниям частоты сети. Как это уже было подробно рассмотрено выше, колеблющаяся контактная система (якорь выпрямителя) может настраиваться на частоту сети, так как возможно и при этом случае достигнуть равенства фаз колеблющейся системы и напряжения, приложенного к выпрямителю. Работа выпрямителя в этом случае (т. е. при резонансе) будет происходить при наименьших потерях.

Как это было подробно рассмотрено выше и как следует из диаграмм (рис. 7—13), даже сравнительно небольшое изменение частоты (фиг. 11) сильно изменяет амплитуду колебания, а также и разность фаз.

Таким образом вибрационные выпрямители при настройке якоря на частоту сети, вообще говоря, не могут работать, так как при резонансе отклонения якоря и напряжения переменного тока будут иметь разность фаз, равную 90°, и вследствие этого якорь выпрямителя будет находиться в среднем положении (т. е. цепь будет разомкнута), когда напряжение достигает своего наибольшего значения. Замыкание и размыкание цепи якорем вибрационного выпрямителя должно иметь место тогда, когда напряжение переменного тока равно нулю, если в цепи выпрямленного тока включено омическое сопротивление (рис. 15). Если в цепи выпрямленного тока имеется обратная э. д. с. (например аккумуляторная батарея), то замыкание и размыкание цепи должны происходить тогда, когда напряжение переменного тока равно напряжению аккумуляторной батареи. Из этого, как уже было указано выше, следует, что якорь выпрямителя должен колебаться не только синхронно, но и конфазно с изменением напряжения переменного тока, приложенного к выпрямителю.

Из рассмотрения вибрационных выпрямителей различных конструкций следует, что различные фирмы настраивают якорь выпрямителя на частоту цепи (т. е. работают при резонансе), а чтобы работа выпрямителя была возможна, устраивают искусственно сдвиг напряжения относительно тока таким образом, чтобы колебания были конфазны. Этим очень усложняется устройство выпрямителей, так как необходимо либо включение конденсаторов значительной емкости, либо устройство сложной комбинации пружин тормозящих устройств.

Из теории также следует, что работа выпрямителя возможна, если он настроен на частоту выше или ниже частоты сети (т. е. если будет работать не при резонансе), причем для хорошей работы выпрямителя отклонения якоря должны быть конфазны с напряжением, или, что то же самое, скорость якоря выпрямителя должна

на 90° отставать или опережать напряжение. Опережать на 90° или отставать на 90° в данном случае безразлично, так как сдвиг фаз на 180° может быть скомпенсирован соответствующим включением.

Таким образом на основании теории вибрационных выпрямителей можно вывести следствие, что, настраивая выпрямитель на работу не при резонансе, беря якорь определенной длины и определенной

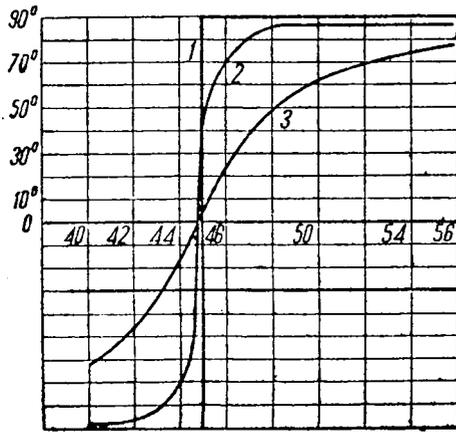


Рис. 18

упругости, а также предусматривая определенное механическое сопротивление колебаниям (сопротивление воздуха, искусственное торможение и т. д.), можно добиться вполне удовлетворительной работы выпрямителя в определенных пределах без всяких дополнительных устройств. Действительно, это легко видеть из рассмотрения диаграммы, изображенной на рис. 18. Кривая I изображает зависимость фазы скорости колебаний якоря выпрямителя от частоты сети, причем зависимость дана при отсутствии какого-либо демпфирования. Резонанс соответствует 45 Hz (т. е. частота собственных колебаний якоря равна 43). В этом случае будет иметь место резкий переход фазы от $+90^\circ$ до -90° .

Само собой разумеется, что в практике такой случай не может иметь места. Демпфирование колебаний вызывает изменение кривой I и переход ее в кривую II или III в зависимости от величины этого демпфирования.

Линии абсцисс можно принять за фазу силы, производящей колебания якоря, т. е. за фазу тока, проходящего через возбуждающую катушку. Предположим, что этот ток вследствие индуктивности катушки отстает на 30° от напряжения. Фаза напряжения в таком случае выразится прямой, лежащей ниже оси абсцисс, так как напряжение будет опережать ток на 30° ; хорошая работа выпрямителя требует, чтобы фаза скорости на 90° отставала от напряжения, а это будет иметь место тогда, когда фаза скорости якоря будет на 60° отставать от тока, т. е. и от силы. На фиг. 18 видно, что кривая 2 пересекает линию, параллельную оси абсцисс и соответствующую фазе 60° при $45,5 \text{ Hz}$. Ясно, что выпрямитель будет хорошо работать при частоте $45,5 \text{ Hz}$. Та же кривая 2 показывает, что при уменьшении частоты только на фазе скорости меняет свой знак, и следовательно, батарея не будет заряжаться, но будет при большом токе разряжаться. Ясно, что при такой настройке якоря уже при колебании частоты на $0,1\%$ выпрямитель будет сильно искрить и практически будет непригоден для работы. Совершенно другие соотношения мы будем иметь, если соответствующим образом подберем упругость колеблющегося якоря и его торможение. Зависимость фазы скорости от частоты выразится тогда кривой 3, которая будет иметь более пологую форму. Кривая 3 пересекает горизонтальную линию, соответствующую фазе 60° при 50 Hz .

Ясно, что выпрямитель будет работать без искрения при частоте сети, равной 50 Hz , но так как кривая достаточно полого, то он будет работать удовлетворительно приблизительно в пределах $47-53 \text{ Hz}$. Таким образом проблема настройки на безыскровую работу выпрямителя может быть чрезвычайно просто разрешена. На рис. 19 изображена принципиальная схема включения такого выпрямителя. Катушка возбуждения Q питается через лампу накаливания L непосредственно от сети переменного тока. Выпрямитель через трансформатор питается от той же сети. Трансформатор понижает напряжение на 20 V , необходимых для выпрямителя. Постоянный магнит M служит для поляризации якоря F , который при колебании дает контакт тогда, когда ток имеется в надлежащем направлении. На рис. 20 дана монтажная схема этого выпрямителя.

Якорь представляет собой упругую стальную пластинку, верхний конец неподвижно закреплен в крепком неподвижном зажиме S . Пластинка (якорь) имеет прорез, и с помощью винта D можно изменять длину колеблющегося якоря и, таким образом, подбирать наиболее выгодную длину его. Промежуток между контактами можно регулировать винтом P с нарезкой. Контактный винт P при малом токе можно снабжать серебряным наконечником, а при большом токе ($2-8 \text{ A}$) — платиновым.

Выпрямитель такой конструкции был построен в электротехнической лаборатории Северокавказского индустриального института. В качестве якоря была взята стальная полоска 115 mm длины и 14 mm ширины. Длина была вычислена согласно приведенным выше формулам и затем уже точно установлена при регулировке выпрямителя.

Якорь сбоку (в месте касания с неподвижным контактным винтом P) имеет также приклепанный кусочек платины или серебра. Еще лучшие результаты дает следующая конструк-

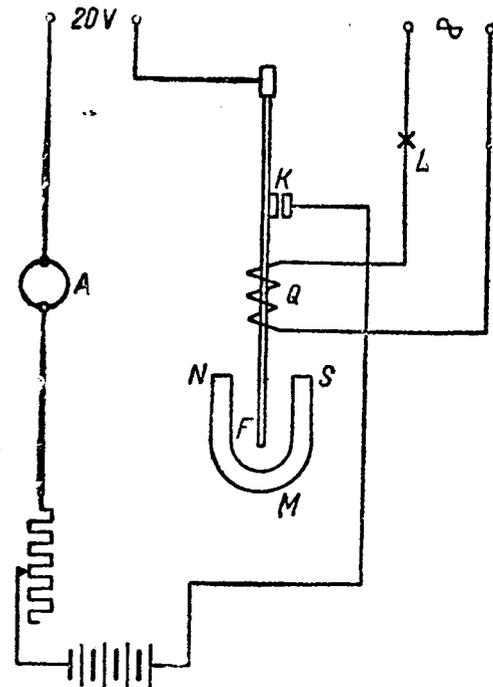


Рис. 19

ция контакта (наподобие конструкции фирмы Hydrowerk в Берлине): к якорю приклепывается (рис. 21) сбоку упругая пластинка f_1 , в которую также вклепывается кусочек платины k_1 .

Кроме того, к якорю приклепывается хомутик a , не позволяющий пластинке f_1 прилипнуть (вследствие пригорания) к неподвижному контакту. Катушка возбуждения наматывалась на латунный (можно, конечно, и на картонный) каркас и в построенном в лаборатории выпрямителе состояла из 550 витков медной изолированной проволоки диаметром

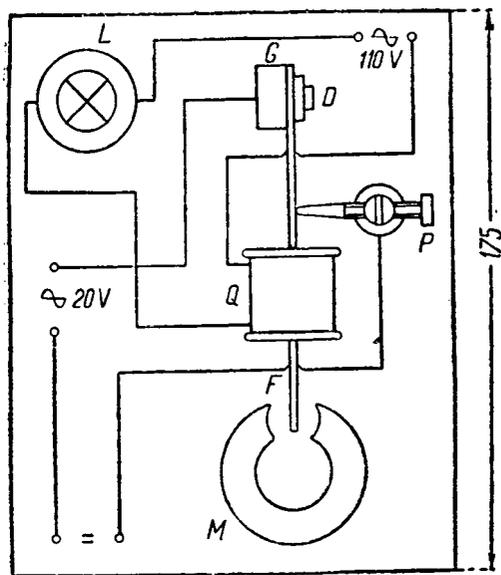


Рис. 20

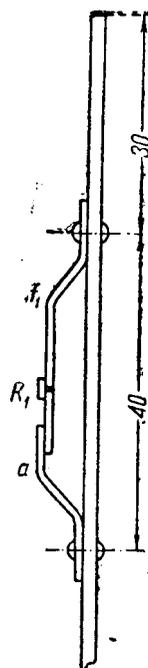


Рис. 21

Зажим *G* и неподвижный контакт *P* должны быть сделаны прочно и ни в коем случае не должны сдвигаться при колебании якоря. Как показал опыт, от прочности устройства конструкции зажима *G* и контакта *P* в значительной степени

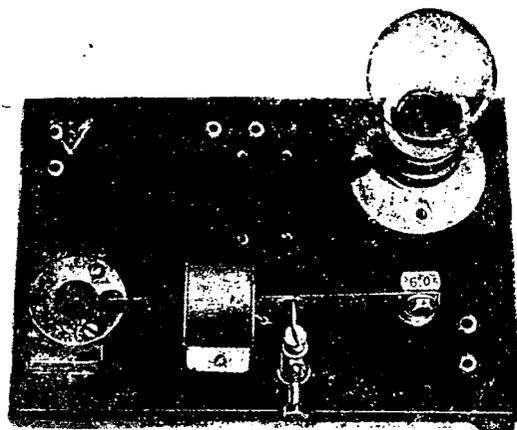


Рис. 22

зависят устойчивость работы выпрямителя и работа его продолжительное время без какой-либо дополнительной регулировки.

В качестве поляризующего магнита был взят постоянный магнит от измерительного прибора. На рис. 22 изображен внешний вид описанного выше выпрямителя. Описанный вы-



Рис. 23

прямитель был детально исследован автором в электротехнической лаборатории Северокавказского энергетического института. Для этого сначала выпрямитель регулировался приблизительно, а именно так, чтобы работа его происходила без искрения, а затем уже производилась точная его регулировка с помощью осциллографа. Для этого кривые выпрямленного тока и напряжения с помощью проекционного приспособления осциллографа проектировались на экран, а затем уже изменением длины якоря и воздушного промежутка

Как показали опыты, хорошо сконструированный и выполненный выпрямитель, будучи один раз отрегулирован, работает очень долго вполне исправно и без всякой дополнительной регулировки. Тщательно отрегулированный выпрямитель вполне исправно работал при напряжении в 20 В на стороне выпрямленного тока и тока в 8 А.



Рис. 24.

Колебания якоря и фаза их легко могут быть исследованы стробоскопически. При работе выпрямителя при сравнительно большом токе необходимо рассчитать контакты так, чтобы они сильно не нагревались. Выпрямитель использует одну половину волны переменного тока. На рис. 23, 24 и 25 приведены осциллограммы этого выпрямителя. На рис. 23 приведена кривая выпрямленного напряжения не вполне отрегулированного выпрямителя. На рис. 24 приведена кривая



Рис. 25

выпрявленного тока достаточно хорошо отрегулированного выпрямителя при безиндуктивной нагрузке, а на рис. 25 изображена кривая тока *a* и кривая напряжения *b* при слабо индуктивной нагрузке в цепи выпрямленного тока. Как это ясно видно из осциллограммы, в этом случае имелся сдвиг фазы и выпрямитель слегка искрил.

Также легко выпрямитель мог быть отрегулирован и для зарядки аккумуляторной батареи. Если выпрямитель предназначен только для зарядки батареи, то вместо постоянного магнита можно взять электромагнит, обмотку которого питать от заряжаемых аккумуляторов. Так как заряжаемая батарея всегда имеет некоторое напряжение, то его всегда будет достаточно для поляризации и, следовательно, для пропуска выпрямителем неподходящей половины волны переменного тока. Само собой разумеется, что того же результата можно достигнуть смешанным возбуждением катушки возбуждения, т. е. включая ее последовательно со вторичной обмоткой трансформатора и заряжаемыми аккумуляторами как это показано на рис. 26. На этой схеме вторичная обмотка трансформатора 5, обмотка электромагнита 1 и аккумуляторная батарея 6 представляют одну общую цепь, а потому через катушку электромагнита будет течь и постоянный и переменный токи, и этим простейшим способом будет достигнута необходимая поляризация. Выгодой такого включения является то, что выпрямитель не имеет заранее заданных определенной полярности, но полярность зажимов по-

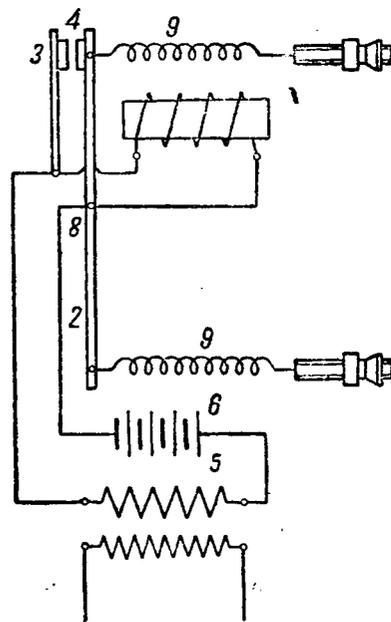


Рис. 26

никакой надобности заботиться о правильном в отношении полярности включении.

Само собой разумеется, что такой способ поляризации наперед предполагает, что аккумуляторная батарея при включении к выпрямителю имеет определенное напряжение. Как известно, это всегда имеет место. Опыт показывает, что вполне достаточно иметь даже только половину нормального напряжения аккумуляторной батареи для нормальной работы выпрямителя. При этом через обмотку возбуждения будет одновременно течь и постоянный и переменный ток, и этим будет достигаться необходимая поляризация.

Коэффициент полезного действия выпрямителя при полной нагрузке $20 \text{ V} \times 8 \text{ A} = 160 \text{ W}$ равнялся $46,5\%$, учитывая и потери в понижающем трансформаторе.

В заключение необходимо сказать, что, несмотря на то,

что в настоящее время имеются выпрямители на малую мощность (для зарядки аккумуляторных анодных батарей и батарей накала), удовлетворительно работающие (например, контактный с окисью меди, селеновый и т. п.) и вытесняющие вибрационные механические выпрямители, последние имеют целый ряд преимуществ, которые делают их в некоторых условиях совершенно незаменимыми механизмами.

К главным преимуществам механического выпрямителя нужно отнести его необыкновенную простоту и вследствие этого возможность постройки его с помощью самых примитивных средств, причем для этой постройки совершенно не требуются квалифицированные работники. Кроме того, механический вибрационный выпрямитель очень прост в эксплуатации и имеет достаточно высокий к. п. д.

28/1—1934

Пробивное напряжение оксида алюминия

Инж. Н. Н. Соколов
Москва, ВЭИ

Оксидная изоляция алюминия привлекает к себе за последние годы все возрастающий интерес как новый вид электроизоляционного материала. Наряду с бесспорно хорошими качествами оксидной пленки как антикоррозийного защитного средства выявились и некоторые области применения оксидной изоляции в электротехнической промышленности¹⁾. Развивающиеся в последнее время работы по алюминированию меди и железа позволяют также ставить вопрос о нанесении оксида алюминия и на эти проводниковые материалы.

Предварительные основные данные о работе по оксидной изоляции алюминия, проведенной в отделе электротехнических материалов ВЭИ, были освещены в одном из предыдущих номеров „Электричества“²⁾. Там же была указана важнейшая литература по затронутому вопросу. Со времени написания этой статьи появилось несколько работ, посвященных изучению свойств оксидной пленки и процессов ее получения. Г. Бетц³⁾ исследовал пробивную напряженность весьма тонких слоев оксида алюминия и тантала, пользуясь выработанным Гюнтершульце методом определения толщины оксидной пленки по интерференционным цветам. Той же теме посвящена работа Г. Юста⁴⁾.

А. Вальтер, С. Гутин, Т. Ляпунцова и Д. Степанов⁵⁾ сообщают предварительные данные о результатах оксидации алюминия переменным током высокой частоты (500, 13 000 и 10^6 Hz).

В статье Д. Степанова и сотрудников⁶⁾ имеются некоторые данные о процессах формирования окиси алюминия в серной кислоте. Электрофизические свойства оксидной пленки рассматриваются в статье С. Гутина⁷⁾.

Однако до сих пор в научной литературе остается неосвещенным вопрос о важнейших характеристиках оксидных пленок: пробивном напряжении и толщине в связи с условиями формирования. Вопрос этот, имеющий одновременно и теоретический и практический интерес, составляет предмет настоящей работы, являющейся частью работы ВЭИ по оксидной изоляции.

В настоящей статье мы не касаемся вопроса о природе пробоя оксида алюминия, поскольку данные по этой теме, так же как об электрофизических свойствах оксидной пленки, будут опубликованы особо. Укажем лишь, что по исследованиям В. И. Пружининой (ВЭИ) пробой оксида до 150°C — электрический. Пробивное напряжение не зависит от темпе-

ратуры до 150°C , причем дальнейшее повышение температуры влечет за собой падение пробивного напряжения (до 300 V при 550°C). Пробою оксида предшествует пробой газовых включений в порах пленки.

Эквивалентная толщина оксидных покрытий

Процесс оксидирования представляет собой явление, сводящееся к анодному окислению алюминия и постепенному нарастанию оксидной пленки состава Al_2O_3 за счет соединения алюминия электрода с выделяющимся кислородом. Процесс этот сопровождается многими своеобразными явлениями: быстрое возрастание напряжения формирования, появление в некоторых случаях искрения электрода, быстрое падение формирующего тока со временем, неоднородное протекание процесса в различных электролитах, различные качества образующейся пленки и пр.

Однако во всех случаях образование оксидного покрытия может идти, конечно, лишь за счет выделяющегося кислорода, и поэтому процесс должен подчиняться законам Фарадея.

Прежде всего интересно выяснить количественную сторону явления, т. е. проверить, соответствует ли экспериментально получаемый электрохимический эквивалент оксида алюминия теоретической величине на единицу протекшего количества электричества.

В теоретическом случае при отсутствии вторичных реакций на аноде 96 500 кулонов выделяют $\frac{106}{6} \text{ g Al}_2\text{O}_3$. Следовательно, на каждый кв. сантиметр поверхности одна ампер-минута дает

$$\frac{106 \cdot 60}{6 \cdot 96 \cdot 500} = 0,0106 \text{ g Al}_2\text{O}_3.$$

Так как плотность пленки равна в среднем 3, то эквивалентная толщина покрытия равна

$$\frac{0,0106}{3,0} = 35,4 \mu.$$

Таким образом за 100% к. п. д. тока можно условно принять $35,4 \mu/\text{A min}$.

Ждать более или менее полного соответствия теоретической и экспериментальной величины электрохимического эквивалента можно лишь при возможно низкой температуре электролита, при малой плотности тока и лишь в первые минуты электролиза. Это обстоятельство вытекает из того, что образующаяся пленка частично растворяется в процессе формирования, в случае же больших плотностей тока происходит бесполезная добавочная поляризация анода кислородом, не

¹⁾ См. например, статью Б. М. Тареева, „Электричество“, № 14, 1933.

²⁾ Александров, Пружинина и Соколов, „Электричество“, № 14, 1933.

³⁾ H. Betz „Zeitschrift für Physik“ 82,647, 1923.

⁴⁾ G. Just, „Zeitschrift für Physik“ 82,1/2 H, 1933.

⁵⁾ „Журнал физической химии“, т. IV, 295, 1933.

⁶⁾ „Журнал физической химии“, т. VI, 395, 1933.

⁷⁾ „Журнал физической химии“, т. VII, 1934.

В нижеследующих опытах мы пользовались в качестве электролита 2% водным раствором шавелевой кислоты. Методика эксперимента и аппаратура были нами указаны в предыдущей статье.

Толщина пленки измерялась окуляр-микрометром на шлифе, протравленном концентрированной соляной кислотой. Толщина выведена как средняя из семи измерений каждой пленки ввиду того, что ее значения колеблются в пределах $3 \div 8\%$.

Пробивное напряжение выведено как среднее из 10 изме-

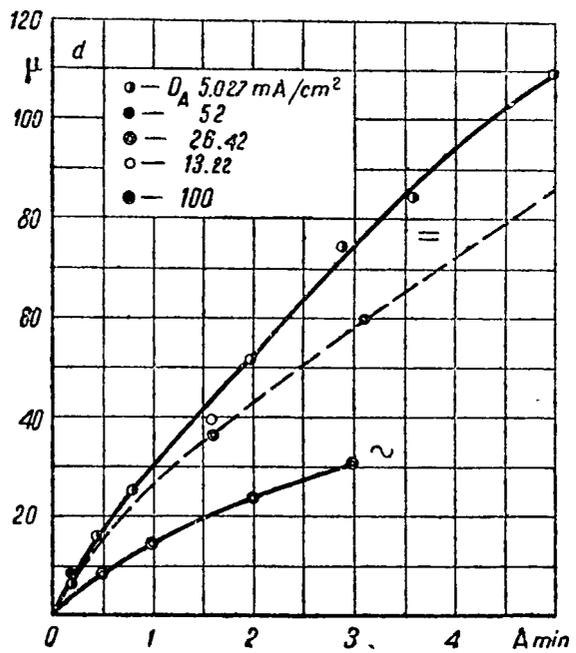


Рис. 1. Зависимость толщины оксидной пленки от количества амперминут при постоянном и переменном токах

рений пленки и измерялось с силовым трансформатором 120/3 300 V, 5 kVA. Пробивался один слой оксида, причем вторым электродом служил латунный шар диаметром 15 мм. Как известно, пробивное напряжение любого электроизолирующего материала является величиной, значительно колеблющейся для одного и того же образца. При условии тщательной постановки экспериментального получения пленок последние могут быть в значительной степени однородными. Процент отклонения от среднего значения пробивного напряжения в тонких слоях ($10 \div 30 \mu$) обычно не превышает $5 \div 20\%$ в толстых слоях (свыше 50μ) отклонения иногда достигают 30% .

На рис. 1 представлены результаты формирования алюминиевых пластинок постоянным током различной плотности для постоянного и переменного тока.

Вычисляя по кривой, соответствующей плотности тока $D_A = 5,027 \text{ mA/cm}^2$, эквивалентную толщину через различные промежутки времени от начала формирования, получаем:

Таблица 1

| Амперминуты от начала электролиза | Наблюдаемая толщина μ | Эквивалентная толщина μ |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 0,5 | 17,0 | 34,0 |
| 1,0 | 23,0 | 29,0 |
| 5,0 | 169,0 | 21,8 |

Таким образом лишь в первые доли амперминуты эквивалентная толщина (и, следовательно, к. п. д. тока) приближается к теоретической величине $35,4 \mu$.

Поскольку переменный ток действует на анод с выделением кислорода лишь в течение полупериода, постольку эквивалентная толщина в этом случае в два раза меньше.

Для достижения на проводе пробивного напряжения 300 V

менного тока на 1 cm^2 . Толщина оксидной пленки составляет в среднем 12μ . Следовательно, к. п. д. тока составляет (в лабораторных условиях) для постоянного тока в условии расчета на эквивалентную толщину около 67% , для переменного — 45% .

Максимальные значения пробивного напряжения оксидной пленки

Весьма важным в научном в практическом отношении является вопрос о том, какого наибольшего пробивного напряжения можно достигнуть для оксидной изоляции. Экспериментально этот вопрос сводится к получению пленок достаточной толщины. Как показано на рис. 2, пробивное напряжение оксидных пленок находится примерно в линейной зависимости от толщины пленки. Данные опыта относятся к оксиду на пластинках при поверхности анода 26 cm^2 и температуре электролита 15°C . По причинам, о которых будет сказано ниже, получение больших значений пробивных напряжений возможно лишь на пластинках, а не на проволоках, и притом только постоянным током. Плотность тока формирования не имеет особого значения (в пределах до 40 mA/cm^2) на электрические свойства получаемой пленки.

Вначале, при малых толщинах пробивная напряженность велика: $30 \div 40 \text{ kV/mm}$ при 5μ . Г. Бети⁸⁾, исследовавший весьма тонкие слои оксида алюминия, нашел для толщин около $0,1 \mu$ пробивную напряженность порядка 200 kV/mm . В пределах $15 \div 30 \mu$ пробивное напряжение аномально падает с толщиной, опять несколько повышаясь в дальнейшем.

Причины аномального хода кривой рис. 2 еще недостаточно ясны. Следует иметь в виду, что структура пленки имеет сложный характер. Непосредственно к алюминию прилегает тончайший так называемый „активный“ слой беспорядочного оксида. На этот слой приходится главное падение напряжения при оксидировании. Без сомнения, этот слой обладает и более высокими электрическими качествами. Активный слой образуется в течение первых минут формирования, оставаясь в дальнейшем по своей толщине почти без изменения. Наиболее ясным доказательством образования активного слоя служит первоначальный быстрый рост напряжения формирования, остающегося в дальнейшем почти постоянным. В процессе электролиза активный слой в наружных слоях постепенно переходит в пористый слой, через поры которого происходит

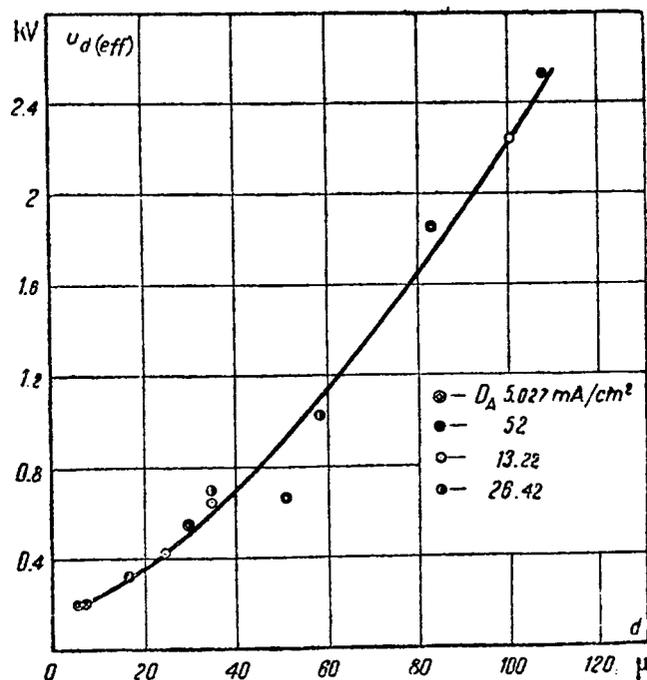


Рис. 2. Пробивное напряжение и толщина оксида на пластинках сформированных постоянным током различной плотности

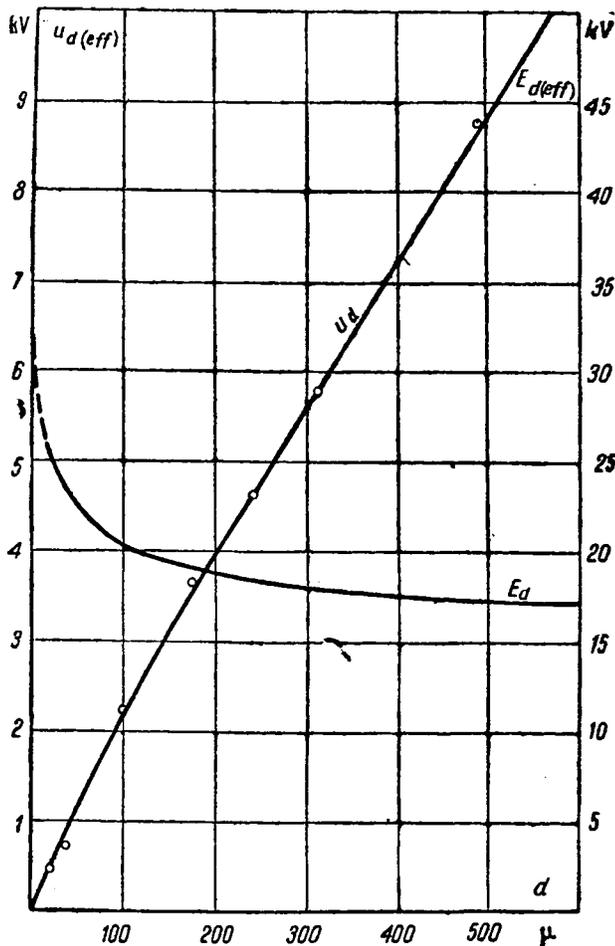


Рис. 3. Пробивное напряжение оксидных пленок на пластинках (постоянный ток)

проникновение электролита к активному слою. Таким образом тонкие слои оксидных пленок за счет активного слоя имеют более высокие электрические качества. По мере увеличения толщины пленки все большая часть этой толщины приходится на счет пористого слоя, худшего по электрическим свойствам. При достаточной толщине пленки процент толщины активного слоя можно считать постоянным. Кроме того, как указано выше, пробой оксидных пленок зависит от газовых и других включений в порах.

Таким образом мы имеем в случае оксида двухфазную систему: оксид-газ, а в случае остатков жидких включений — трехфазную систему.

На рис. 3 дана зависимость пробивного напряжения и пробивной напряженности оксидных пленок как функция толщины (рис. 3).

Мы получили пленки до 0,5 мм толщиной с пробивным напряжением около 9 кВ/мм при D_A постоянного тока, равном 13,22 мА/см². В пределах 0,1—0,5 мм пробивная напряженность имеет почти стационарное значение около 18 кВ/мм. Таким образом пробивная напряженность толстых слоев оксида примерно в два раза ниже мусковита, для которого пробивная напряженность (в масле) достигает при толщине 0,1—0,2 мм 50 кВ/мм, а при 0,3—0,7 мм составляет 35—25 кВ/мм. В этом отношении толстые слои оксида можно сравнить, например, с фарфором, для которого пробивная напряженность около 15 кВ/мм.

Мы полагаем, что возможно достигнуть пробивного напряжения оксидной пленки и свыше 10 кВ. Однако слой оксида становится все более рыхлым и хрупким, наступает расслаивание пленки на 3—4 резко различаемых слоя. Наибольшее пробивное напряжение и твердость имеют нижний слой. Большую роль также играет степень чистоты алюминия. Вполне удовлетворительными для практического применения следует считать слои оксида (на пластинках) с пробивным напряжением 2—4 кВ.

Достигнуть сколько-нибудь значительного пробивного напряжения при формировании переменным током оказалось невозможным. Уже при толщинах 40—50 мкм наступает разрушение пленки, обусловленное выделяющимся водородом.

Пробивное напряжение и толщина оксида на проводах

Значения пробивного напряжения на проводах меньше, чем на пластинках, по крайней мере, начиная с величин порядка 20 мкм и 400 В. Объясняется это разрушением наружного слоя оксида по мере увеличения толщины слоя. Так как нарастание пленки происходит в активном слое, прилегающем непосредственно к алюминию, и так как оксид занимает больший объем, чем металл, наружный слой постепенно растрескивается. Уже при 600 В пробивного напряжения на поверхности оксидированного провода появляются продольные трещины, отчетливо видимые в микроскоп⁹⁾.

Рис. 4 дает зависимость пробивного напряжения от толщины для проволок диаметром 3,05, 1,05, 0,22 и 0,35 мм, оксидированных постоянным током различной плотности при 15°C. Пробивная напряженность для малых диаметров несколько ниже, чем для больших. Во всех случаях мы видим нормальный ход кривых, отличающийся от аномальной кривой для пластинок.

Соответственные точки для проводов, оксидированных переменным током, лежат ниже (рис. 5).

Вообще формируемая переменным током модификация оксида (B) имеет меньшую пробивную напряженность, чем в случае постоянного тока (A).

Повидимому, переменный ток дает некоторое разрыхление пленки, снижающее ее качества. При прокаливании пленок переменного тока не наблюдается сколько-нибудь значительного уменьшения веса, что указывает на отсутствие гидратации пленки.

Таким образом пробивная напряженность на проводах резко падает с увеличением толщины изоляции. Практически наиболее целесообразно является оксидирование проводов до 300—500 В пробивного напряжения.

Наконец, помимо двух основных модификаций оксида по пробивной напряженности (A и B) следует упомянуть еще о модификации C с гораздо большей пробивной напряженностью. На рис. 6 даны результаты формирования провода диаметром 3,05 мм, постоянным током при различных температурах (15—85°C) и различных D_A (25 и 50 мА/см²). При одинаковом количестве амперминут вплоть до 35—40° толщина и пробивная напряженность пленки остаются более или менее постоянными. При 40—50° начинается резкий рост пробивного напряжения пленки параллельно со столь же резким уменьшением толщины. При температурах свыше 70°C формирование с такими значениями D_A почти не идет.

При толщине 10—25 мкм пробивная напряженность „горячего“ оксида равна 36 кВ/мм против 18 кВ/мм для оксида, сформированного при низкой температуре, т. е. повышается в два раза.

Модификация C представляет собой по полученным нами данным гидратированную модификацию Al_2O_3 . Повидимому, она более или менее аналогична с описываемой Сето и Мията¹⁰⁾ модификацией, получаемой после обработки оксида водяным паром.

Оксиды B и A не показывают снижения веса и пробивного напряжения после прокалывания при 350° в течение 12 часов. В этих же условиях модификация C обнаружила снижение веса, соответствующее потере одной и более молекул воды (смотря по температуре формирования). Пробивное напряжение U_d оксида C при указанном нагреве снижается, пробивная напряженность также уменьшается, приближаясь к нормальной для A и B (табл. 2).

⁹⁾ Так как пробой пластинок и проводов производился одним и тем же шаром диаметром 15 мм, возможно частичное влияние большей неоднородности электрического поля в условиях пробоя проволок (цилиндрический шар).

Таблица 2

| Температура формирования °С | U_d до прокаливания | U_d после прокаливания | Толщина μ | % снижения U_d |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------------------|
| 18 | 313 | 306 | 17,8 | — |
| 17 | 526 | 530 | 30,5 | — |
| 27,5 | 320 | 322 | 14,8 | — |
| 20 | 684 | 660 | 65,8 | — |
| 65 | 757 | 425 | 21,3 | 43,9 |
| 65 | 933 | 545 | 31,5 | 40,5 |
| 75 | 345 | 310 | 8,4 | 31,0 |
| 65 | 461 | 337 | 12,2 | 27,0 |

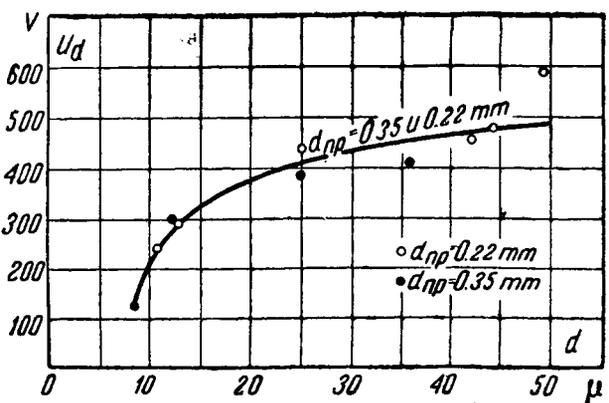
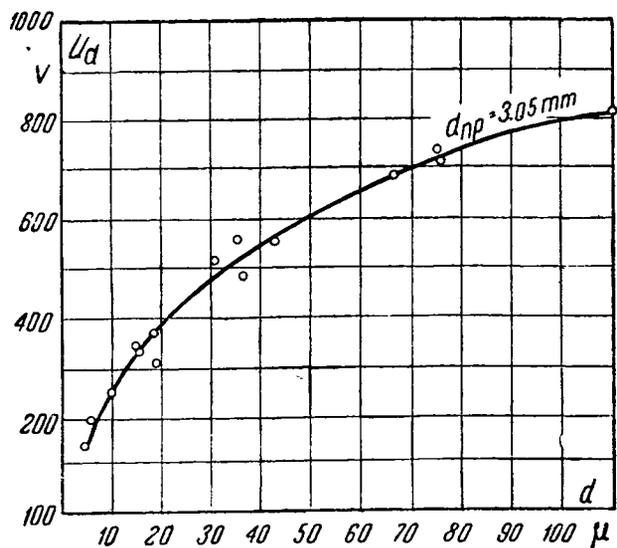
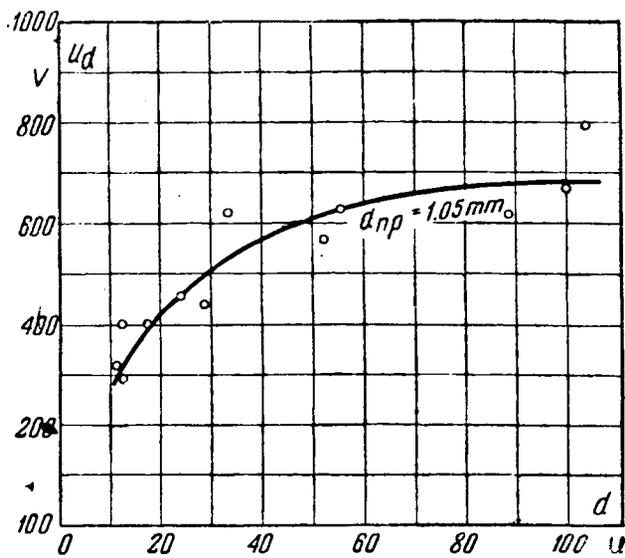


Рис. 4. Пробивное напряжение в зависимости от толщины оксида, формируемого на проводах диаметром 3,05 мм, 1,05, 0,22 и 0,35 мм

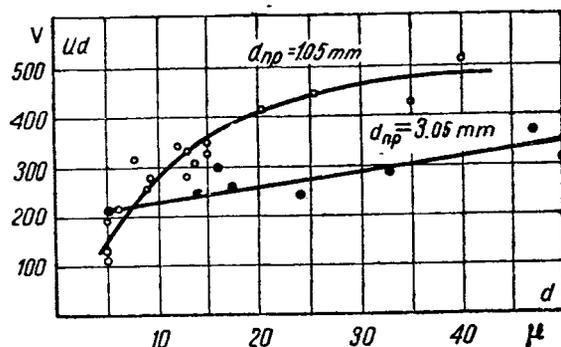


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения от толщины оксида, формируемого переменным током на проводах диаметром 3,05 и 1,05 мм

Получение гидратированной модификации С возможно и некоторыми другими путями. Для практического применения указанные пленки рациональны только в особых случаях ввиду снижения пробивного напряжения при нагреве и растворения основного металла при формировании.

Пробивная напряженность пленок, полученных постоянно-переменным („наложенным“) током

Электролиз одновременным действием переменного и постоянного токов весьма целесообразен в некоторых случаях получения оксидных пленок. Один постоянный ток дает наряду с большим к. п. д. тока пленки с высокими значениями пробивного напряжения. Однако постоянный ток способен при-

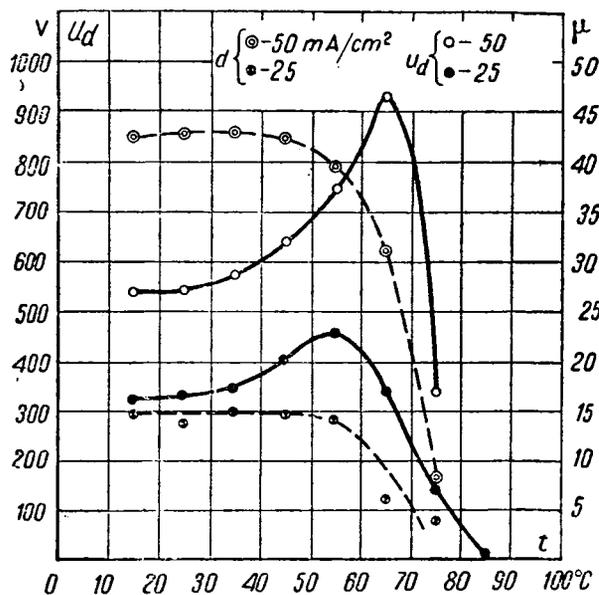


Рис. 6. Влияние температуры формирования на толщину и пробивное напряжение оксидной пленки

нять местные повреждения пленки. Переменный ток, как указано выше, дает лишь невысокие значения пробивного напряжения, однако процесс формирования идет очень гладко. Наложенный ток при рациональном выборе составных частей по величине тока и напряжения дает возможность найти оптимальные условия формирования для получения пленок тех или иных качеств.

Оставляя в настоящей статье в стороне электрохимические особенности при электролизе наложенным током, остановимся лишь на выяснении модификации, получаемой в этом случае.

Если вычислить пробивную напряженность пленок наложенного тока и отложить ее как функцию процента переменного или постоянного тока, мы получим (рис. 7) совершенно ясную характеристику наложенных оксидных пленок. Пробивная напряженность пленок зависит от соотношения составных токов. Постоянный ток дает оксид А с наиболь-

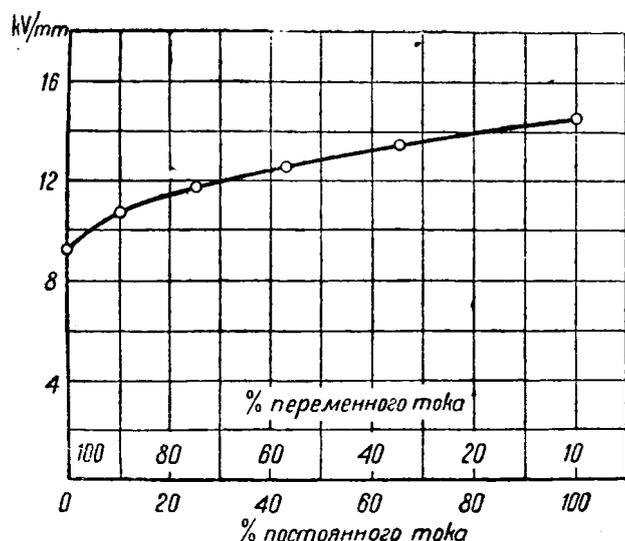


Рис. 7. Пробивная напряженность пленок наложенного тока

пробивной напряженностью, переменный — оксид В с наименьшей пробивной напряженностью. Пленки наложенного тока не являются какой-либо новой модификацией, а занимают промежуточное положение между А и В соответственно количеству (по D_A) того или иного вида тока.

Расход электроэнергии для получения различных пробивных напряжений пленки

Нижеследующие данные относятся к проводам диаметром 1 мм, поверхностью 13 см² с учетом, что переменный ток оксидирует оба электрода: температура электролита 10°C, D_A постоянного тока 40 мА/см², переменного — 100 мА/см², для наложенного тока 20 мА/см² постоянного и 60 мА/см² переменного.

Результаты выражены в ваттминутах по отношению к достигаемому пробивному напряжению. Количество ватт вычислено по кривым напряжения формирования. По теоретическим соображениям и по нашему прямому определению $\cos \varphi$ лабораторной ванны близок к единице и потому не учтен.

Из рис. 8 ясно следует, что наиболее эффективным является оксидирование постоянным током, наименее — переменным. Наложный ток занимает промежуточное положение.

В табл. 3 проведены данные о расходе электроэнергии на оксидирование различными видами тока.

Таблица 3

| Пробивное напряжение V | Расход электроэнергии (кWh/m ²) | | |
|------------------------|---|--|----------------|
| | постоянный ток | переменный ток с наложенным постоянным | переменный ток |
| 300 | 7,34 | 10,6 | 15,7 |
| 400 | 14,0 | 20,0 | 35,3 |
| 500 | 22,1 | 31,3 | (45,4) |

Расход электроэнергии несколько снижается при повышении плотности тока и температуры электролита.

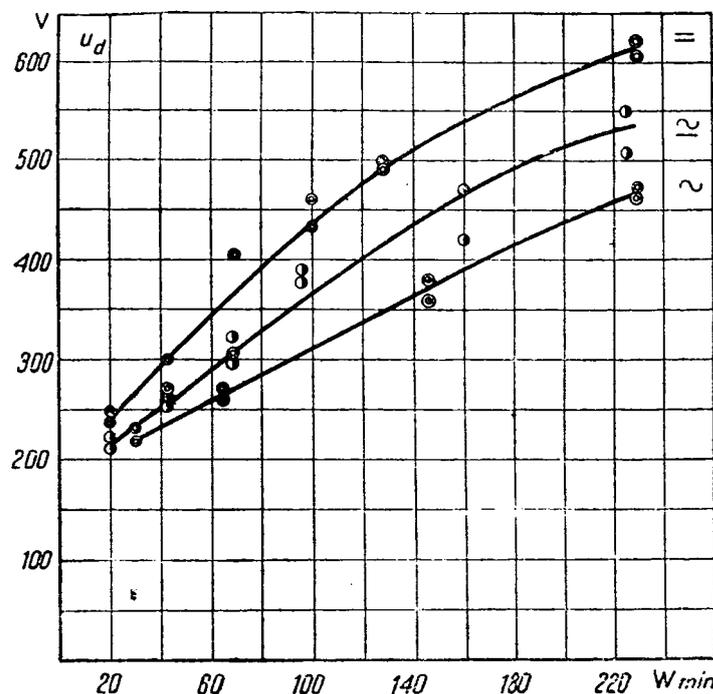


Рис. 8. Количество ваттминут для достижения одинакового пробивного напряжения при формировании постоянным, переменным и наложенным токами

26/II 1934 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Вихревые токи в ферромагнитных телах

Инж. Е. Г. Марквардт
Москва, ВЭИ

Расчет добавочных потерь от вихревых токов в электрических машинах и аппаратах во многих случаях может быть сведен к расчету потерь в массивных металлических проводниках от вихревых токов, наведенных близрасположенными

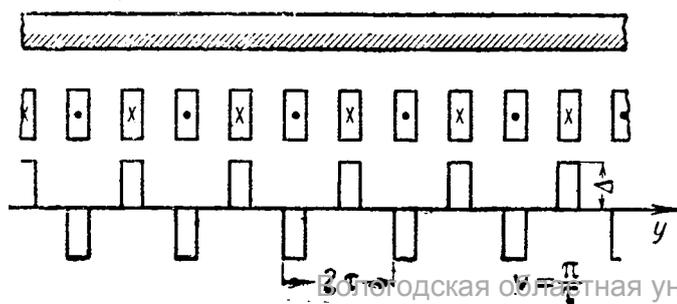


Рис. 1.

токами периодической плотности (рис. 1). Разлагая заданное периодическое изменение токов в тригонометрический ряд и ограничиваясь рассмотрением действия основной волны плотности тока и первых гармонических, обычно можно с достаточной точностью проследить все явления, связанные с образованием вихревых токов и рассчитать вызываемые ими потери.

1. Постановка задачи и решение уравнений

Предположим, что безграничная в плоскости yz металлическая плита толщиной b расположена вблизи тока периодической плотности $\Delta = \Delta_0 e^{i\omega t} \cos yu$, направленного по оси z и расположенного на полосе шириной 2δ . Разобьем полу-пространство, соответствующее положительным значениям координаты x на две области (рис. 1).

- 1) область, занятую металлической плитой ($b > x > 0$);
 2) область за металлической плитой ($b < x < \infty$).

Для первой области, заполненной вихревыми токами, будут справедливыми следующие общие уравнения¹⁾:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= i, & \operatorname{div} \mathbf{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{div} \mathbf{E} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для второй области соответственно справедливы уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= 0, & \operatorname{div} \mathbf{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{div} \mathbf{E} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где \mathbf{H} — вектор напряженности магнитного поля в А/см; $\mathbf{B} = \Pi \mathbf{H}$ — индукция в В сек/см²; \mathbf{E} — напряженность электрического поля в В/см.

Уравнения (2) и (3) совместно с нижеприведенными условиями на границах области I и II дают полное решение вопроса о величине плотности вихревого тока в каждой точке металлической плиты. Введем для решения уравнений (2) и (3) потенциальную векторную функцию \mathbf{A} , свойства и связь которой с магнитным полем определяются следующими уравнениями:

$$\operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{H}; \quad \operatorname{div} \mathbf{A} = 0. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (2) и (3) дает следующие уравнения для области I ($b > x > 0$)

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -i, \quad \mathbf{E} = -\Pi \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (5')$$

и области II ($b < x < \infty$)

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0, \quad \mathbf{E} = -\Pi \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (5'')$$

Для нашего случая плоского поля, параллельного координатной плоскости xu , все величины, характеризующие поле, не зависят от координаты z , и поэтому уравнения (5), будучи выражены в декартовых координатах, примут следующий вид:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -i; \quad \mathbf{E} = -\Pi \frac{\partial A}{\partial t}; \quad \text{для } b > x > 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0; \quad \mathbf{E} = -\Pi \frac{\partial A}{\partial t}; \quad \text{для } b < x < \infty, \quad (6'')$$

где под A и E подразумеваются слагающие A и E по оси z .

В уравнения (5) и (6) зависимость между индукцией и силой поля выражается уравнением $B = \Pi H$, где $\Pi = 4\pi \mu \cdot 10^{-9} \text{ В сек/А см}$.

В соответствии с периодическим изменением плотности тока $\Delta = \Delta_0 e^{j\omega t} \cos yu$ в пространстве и во времени векторный потенциал также будет гармонической функцией места и времени, что в комплексной форме может быть выражено в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{A}} = f(x) e^{j\omega t} \cdot \cos yu. \quad (7)$$

Подставляя (7) в уравнение (6), получим следующие обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} - \nu^2 f(x) = -j\omega \lambda \Pi f(x) \quad \text{для } b > x > 0, \quad (8')$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} - \nu^2 f(x) = 0, \quad \text{для } b < x < \infty. \quad (8'')$$

Если учесть, что в области I вихревой ток и напряжение электрического поля связаны зависимостью $i = \lambda E$, где λ —

проводимость железа $\left(\frac{1}{Q_{\text{ст}}}\right)$, то решение уравнений (8) представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} f(x) &= m_1 e^{-\xi x} + m_2 e^{-\xi x} \quad \text{для } b > x > 0, \\ f(x) &= n_1 e^{\nu x} + n_2 e^{-\nu x}, \quad \text{для } b < x < \infty, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \xi &= \sqrt{\nu^2 + j\omega \lambda \Pi} = \sqrt{\nu^2 + jx^2}, \\ \nu &= \frac{\pi}{\tau}, \quad x^2 = \omega \lambda \Pi, \end{aligned} \quad (10)$$

и m_1, m_2, n_1 и n_2 — постоянные интегрирования.

Полное выражение векторного потенциала будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{A}} &= (m_1 e^{-\xi x} + m_2 e^{-\xi x}) e^{j\omega t} \cdot \cos yu \quad \text{при } b > x > 0, \\ \dot{\mathbf{A}} &= (n_1 e^{\nu x} + n_2 e^{-\nu x}) e^{j\omega t} \cos yu \quad \text{при } b < x < \infty. \end{aligned} \quad (11)$$

Условия непрерывности тангенциальных слагаемых векторов электрического и магнитного полей на границе областей I и II и условие, что при $x \rightarrow \infty$ электромагнитное поле исчезает, дает:

$$\begin{aligned} n_1 &= 0, \quad -m_1 \xi e^{\xi b} + m_2 \xi e^{-\xi b} = n_2 \nu e^{-\nu b}, \\ \mu (m_1 e^{\xi b} + m_2 e^{-\xi b}) &= n_2 e^{-\nu b}. \end{aligned}$$

Тангенциальную слагающую напряженности магнитного поля на другой стороне железа ($x = 0$) обозначим через

$$\mathbf{H} = (-m_1 \xi + m_2 \xi) e^{j\omega t} \cos yu = H_0 e^{j\omega t} \cos yu,$$

где H_0 — амплитудное во времени и пространстве значение тангенциальной слагающей напряженности магнитного поля на краю железа.

Совместное решение последних уравнений позволяет выразить все постоянные интегрирования через значения H_0 .

$$m_1 = H_0 \frac{(\xi - \nu \mu) e^{-\xi b} \cos yu}{2\xi (\nu \mu \operatorname{sh} \xi b + \xi \operatorname{sh} \xi b)},$$

$$m_2 = \frac{H_0}{2\xi} \frac{(\xi + \nu \mu) e^{\xi b} \cos yu}{(\nu \mu \operatorname{ch} \xi b + \xi \operatorname{ch} \xi b)},$$

и, следовательно, окончательное выражение для векторного потенциала магнитного поля внутри магнитной плиты:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{A}} &= A_0 e^{j\omega t} \cos yu = \frac{H_0}{2\xi} \left[\frac{(\xi - \nu \mu) e^{-\xi(b-x)}}{\nu \mu \operatorname{sh} \xi b + \xi \operatorname{sh} \xi b} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\xi + \nu \mu) e^{\xi(b-x)}}{\nu \mu \operatorname{ch} \xi b + \xi \operatorname{sh} \xi b} \right] e^{j\omega t} \cos yu. \end{aligned} \quad (1)$$

Комплексная величина ξ , определяемая равенством (10) имеет модуль

$$\xi = \sqrt{\nu^2 + x^2}$$

и отдельно значения действительной и мнимой части

$$\varphi = \operatorname{Re} \xi = \sqrt{\frac{\xi^2 + \nu^2}{2}}, \quad \psi = \operatorname{Im} \xi = \sqrt{\frac{\xi^2 - \nu^2}{2}}. \quad (1)$$

Нетрудно видеть, что параметры φ и ψ имеют физическое значение: φ характеризует быстроту затухания падающих волн электромагнитного поля внутри железа; ψ дает длину волны электромагнитного поля в железе, равную $\frac{2\pi}{\psi}$.

¹⁾ Токами смещения пренебрегаем.

Для железа при $\tau = 5$ см и $\nu = \frac{\pi}{\tau} = 0,624$, $\lambda = 10^5 \frac{1}{\Omega \text{см}}$; $\mu = 500$; $\omega = 314$, будем иметь:

$$\xi \approx \chi = \sqrt{\Pi \omega \lambda} = \sqrt{4 \pi \cdot 10^{-9} \cdot 500 \cdot 314 \cdot 10^5} = 14,1;$$

$$\varphi \approx \psi = \frac{\xi}{\sqrt{2}} = \frac{14,1}{\sqrt{2}} = 10,0;$$

следовательно, длина волны в железе $l = \frac{2\pi}{\varphi} = 0,628$ см.

Если толщина железа $b = 0,2$ см, то $b\xi = 2,82$.

II. Распределение вихревых токов в железе

Вихревые токи в железе благодаря вообще большой магнитной проницаемости железа всегда распределяются только у поверхности железного проводника. Действительно, как выше было показано, уже при толщине железа $b = 0,2$ см величина $\xi b = 2,82$. Не совершив большой ошибки, примем в этом случае, что $\text{sh } \xi b = \text{ch } \xi b = \frac{e^{\xi b}}{2}$. Выражение (7") в этом случае примет следующий вид:

$$\dot{A} = \frac{H_0}{\xi} \left[\frac{\xi - \nu \mu}{\xi + \nu \mu} e^{-2\xi(b-x)} + e^{-\xi x} \right] e^{i\omega t} \cos \nu y.$$

Для $\xi b > 2,5$ в полученном выражении первое слагаемое суммы, помещенное в скобках, весьма мало по сравнению со вторым, и поэтому последнее уравнение можно представить в следующем виде:

$$\dot{A} = \frac{H_0}{\xi} e^{-\xi x + j\omega t} \cos \nu y.$$

Следовательно, слагающие вектора напряженности поля по осям координат будут равны

$$\dot{H}_x = \frac{\partial \dot{A}}{\partial y} = H_0 \frac{\nu}{\xi} e^{-\xi x + i\omega t} \cos \nu y,$$

$$\dot{H}_y = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial x} = H_0 e^{-\xi x + j\omega t} \cos \nu y.$$

Плотность вихревого тока в железе

$$i = -\Pi \lambda \frac{\partial \dot{A}}{\partial t} = -j \frac{\omega \Pi \lambda}{\xi} H_0 e^{-\xi x + j\omega t} \cos \nu y \quad (14)$$

и, следовательно, квадрат эффективного значения (во времени) плотности тока, которое пропорционально мощности, теряемой в железе,

$$i_{\text{эф}}^2 = \frac{i \cdot \bar{i}}{2} = H_0^2 \frac{\lambda^2}{2\xi^2} e^{-2\xi x} \cos^2 \nu y = i_{0\text{эф}}^2 e^{-2\xi x} \cos^2 \nu y. \quad (15)$$

Нетрудно видеть, что уже на глубине железа $a = \frac{1,5}{\varphi}$ см квадрат эффективного значения плотности вихревого тока достигает 5% своего максимального значения на краю железа. Например для вышеприведенного примера на толщине железа $a = \frac{1,5}{10} = 0,15$ см практически выделяется вся энергия вихревых токов. С повышением проводимости, частоты f переменного тока и магнитной проницаемости железа μ величина a уменьшается еще более. Например, при $\mu = 2000$ $a = 0,075$ см. С укорочением длины волны 2τ (рис. 1 и 2) затухание возрастает еще больше, что видно из выражения (11). Отсюда следует, что потери в железе практически не зависят от толщины железа, начиная с толщины $b \approx 1,5 \div 2$ мм.

III. Энергия вихревых токов

Энергия, поглощаемая в железе, отнесенная к единице поверхности железной плиты (в плоскости zx), равна вектору

и в нашем случае плоского поля равна

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad (16)$$

где

$$p_x = -H_y E \quad \text{и} \quad p_y = H_x E_z \quad (17)$$

слагающие вектора потока энергии p по осям x и y .

Учитывая синусоидальное изменение магнитного и электрического поля во времени, выражения (17) можно переписать в следующем виде:

$$\dot{p}_x = -\frac{\overline{H}_y \dot{E}_z}{2}, \quad \dot{p}_y = \frac{\overline{H}_x \dot{E}_z}{2},$$

где \dot{p}_x и \dot{p}_y — слагающие векторы потока энергии в комплексной форме; \overline{H}_x и \overline{H}_y — соответственно сопряженные значения для \dot{H}_x и \dot{H}_y .

В соответствии с выражениями для \dot{H}_y и \dot{E}_z [(12), (13)] будем иметь

$$p_x = \frac{j}{\xi} \frac{\omega \Pi H_0^2}{2} e^{-2\xi x} \cos^2 \nu y, \quad (18a)$$

$$p_y = -j \frac{\nu \omega \Pi}{4 \xi^2} \sin 2\nu y e^{-2\xi x}. \quad (18b)$$

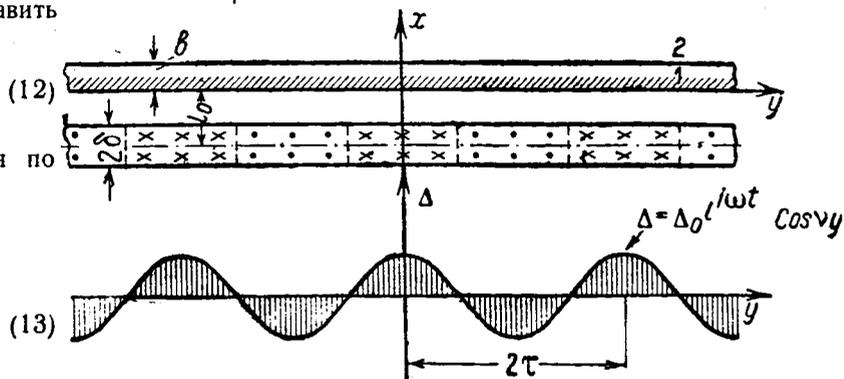


Рис. 2

Действительная часть комплексного числа \dot{p}_x при $x=0$ дает величину активной мощности на 1 см^2 поверхности железной плиты. Следовательно, потери в железе

$$P_a = \frac{\chi H_0^2 \cos^2 \nu y}{2 \sqrt{2} \lambda} \cdot \frac{\chi \varphi \sqrt{2}}{\xi^2} \text{ W/cm}^2 \quad (19)$$

и средние потери на 1 см^2 поверхности железа за период 2

$$P_a = \frac{\chi H_0^2}{4 \sqrt{2} \lambda} \frac{\varphi \chi \sqrt{2}}{\xi^2} = \beta_a \frac{\chi H_0^2}{4 \sqrt{2} \lambda} \text{ W/cm}^2. \quad (20)$$

Величина $\frac{\sqrt{2} \chi \varphi}{\xi^2}$ может быть выражена как функция только

отношения $a = \frac{\nu}{\chi}$

$$\beta_a = \sqrt{\frac{a^2 + \sqrt{1+a^4}}{1+a^4}}; \quad (21)$$

Реактивную мощность, проходящую через 1 см^2 поверхности железной плиты, мы получим как мнимую составляющую комплекса \dot{p}_x :

$$P_r = \frac{\chi H_0^2 \cos^2 \nu y \varphi \chi \sqrt{2}}{2 \sqrt{2} \lambda} \quad (22)$$

Выражение $\beta_r = \frac{\phi x \sqrt{2}}{\xi^2}$ аналогично β_a и определяется

через $\alpha = \frac{\nu}{\kappa}$ следующим образом:

$$\beta_r = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\alpha^4} - \alpha^2}{1+\alpha\nu}}. \quad (23)$$

Среднее значение удельной реактивной мощности за период будет равно

$$p_r = \beta_r \frac{\kappa H_0^2}{4\sqrt{2}\lambda} \text{ W/cm}^2. \quad (24)$$

Выражение (18b) представляет чисто реактивную мощность, обусловленную периодичностью магнитного поля в простран-

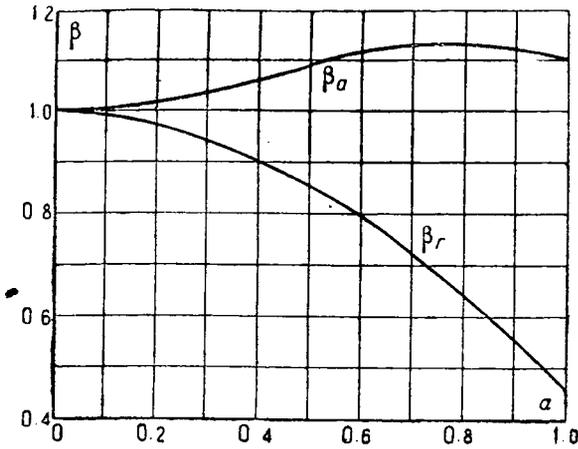


Рис. 3.

стве. Среднее значение этой энергии за полную длину волны равно нулю и поэтому не учтено при определении реактивной мощности вихревого тока.

Таким образом окончательно после приведения формул (19) и (22) к более удобному виду получим выражение для активной мощности вихревых токов:

$$p_a = 0,5 \beta_a H_0^2 \sqrt{\frac{f\mu}{\lambda}} 10^{-4} \text{ W/cm}^2 \quad (25)$$

и для реактивной

$$p_r = 0,5 \beta_r H_0^2 \sqrt{\frac{f\mu}{\lambda}} 10^{-4} \text{ W/cm}^2, \quad (26)$$

где H_0 — максимальное значение во времени и пространстве тангенциальной слагающей напряженности магнитного поля в А/см.

Коэффициенты β_a и β_r учитывают влияние периодичности электромагнитного поля в направлении оси y . Если поле параллельно в направлении оси y , т. е. если $\nu=0$, то $\beta_a = \beta_r = 1$ и энергия вихревых токов получает следующее выражение:

$$p_a = p_r = H_0^2 \sqrt{f\mu\rho} 10^{-4} \text{ W/cm}^2, \quad (26')$$

где $\rho = \frac{1}{\lambda}$ и, следовательно, активная и реактивная энергии поля становятся равными друг другу.

Характер изменения коэффициентов β_a и β_r в зависимости от α представлен на рис. 3.

Пример. На краю железной плиты создано периодическое поле с длиной волны $2\tau = 10$ см. Амплитуда тангенциальной слагающей (во времени и по оси y) равна 20 А/см. Определить потери в железе.

значение магнитной проницаемости $\mu = 500$. Тогда, если $f = 50$ Hz,

$$\kappa = \sqrt{\pi\omega\lambda} = 14,1, \quad \alpha = \frac{\nu}{\kappa} = \frac{\pi}{\kappa\tau} \approx 0,07$$

и, следовательно,

$$\beta_a \approx \beta_r \approx 1,0 \quad \text{и} \quad p_a = p_r = 0,5 \cdot 20^2 \sqrt{50 \cdot 500 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-4}} = 1,0 \text{ W/cm}^2.$$

Все вышеприведенные соображения относятся к случаю стоячей волны, тангенциальная слагающая поля которой на краю железа равна

$$\dot{H} = H_0 e^{j\omega t} \cos \nu y.$$

Нетрудно показать, не приводя подробных расчетов, что в случае бегущей волны $\dot{H} = H_0 e^{j(\omega t + \nu y)}$ потери в железе будут в 2 раза больше и эффективное значение индукции в $\sqrt{2}$ раза больше, чем при стоячей волне. Действительно, эффективное значение тангенциальной слагающей поля $\dot{H} = H_0 e^{j(\omega t + \nu y)}$ будет равно $H_{\text{эф}} = \frac{H_0}{\sqrt{2}}$, и квадрат эффективного значения плотности тока, пропорционального энергии вихревых токов,

$$i_{\text{эф}}^2 = \frac{i_0^2}{2} e^{-2\varphi x}.$$

Сравнивая последние выражения с полученным прежде, можно сделать заключение, что при равных амплитудных значениях тангенциальной слагающей магнитного поля бегущая волна будет создавать в железе потери в 2 раза больше стоячей волны.

Приведенные формулы (25) и (26) дают возможность определить потери на вихревые токи в железе, исходя из известного значения тангенциальной слагающей напряженности магнитного поля на краю листа.

Однако в практических случаях нередко бывает проще определить приближенным способом величину нормальной составляющей напряженности магнитного поля на краю железа или величину магнитного потока, входящего в железо. Поэтому полезно найти зависимость величины энергии вихревых токов в железе от величины магнитного потока, входящего в железо.

В нашем случае плоского поля поток, входящий в железо на длине железа в 1 см в направлении оси z

$$\begin{aligned} \Phi &= \Pi (\dot{A}_{x=0} - \dot{A}_{x=0}) = \Pi \frac{H_0}{\xi} (1 - \cos \nu y) = \\ &= \frac{2 \Pi H_0}{\xi} \sin^2 \frac{\nu y}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

и, следовательно, абсолютная величина амплитуды магнитного потока (на длине τ) будет

$$\Phi_0 = \frac{2 \Pi H_0}{\xi}. \quad (28)$$

Исключая с помощью последнего равенства из формул (25) и (26) величину H_0 , получим следующие формулы для расчета активной мощности вихревых токов

$$p_a = 0,612 \varepsilon_a f \Phi_0^2 \sqrt{\frac{f\lambda}{\mu}} 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \quad (2)$$

и реактивной

$$p_r = 0,612 \varepsilon_r f \Phi_0^2 \sqrt{\frac{f\lambda}{\mu}} 10^{-12} \text{ W/cm}^2,$$

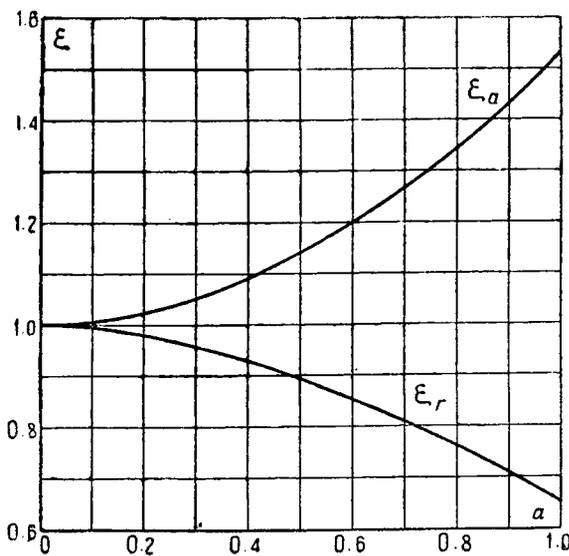


Рис. 4.

где Φ_0 — амплитудное значение магнитного потока, входящего в железо на длине τ в максвеллах. Коэффициенты

$$\begin{aligned} \epsilon_a &= \beta_a \sqrt{1 + \alpha^4} = \sqrt{\sqrt{1 + \alpha^4} + \alpha^2}; & \epsilon_r &= \beta_r \sqrt{1 + \alpha^4} = \\ & & &= \sqrt{\sqrt{1 + \alpha^4} - \alpha^2}. \end{aligned}$$

Для удобства расчетов на рис. 4 представлена зависимость ϵ_a и ϵ_r от $\alpha = \frac{\nu}{\kappa}$.

В зависимости от условий задачи могут быть более удобны для расчета потерь в железе формулы (25) или (29).

IV. Экранирующее действие вихревых токов

Вышеприведенные соотношения для расчета потерь на вихревые токи в железе требуют знания или тангенциальной слагающей напряженности магнитного поля у железа или величины магнитного потока, входящего в железо. Этот поток или связанная с ним по формуле (28) тангенциальная слагающая H_0 представляют суммарное поле, полученное в результате наложения на внешнее поле, созданное какой-либо системой токов около железа поля вихревых токов. Это результирующее поле обычно трудно поддается определению, поэтому ниже дан простой способ определения результирующего поля через основное внешнее поле.

Мы видели, что плоское электромагнитное поле в проводящей среде определяется векторным потенциалом следующего вида:

$$A = (m_1 e^{\xi x} + m_2 e^{-\xi x}) e^{j\omega t}.$$

В этом выражении $m_2 e^{-\xi x}$ представляет векторный потенциал падающей волны и $m_1 e^{\xi x}$ — волны отраженной.

В случае если бы среда, в которой распространяется поле, была неограничена в направлении оси x , то поле отраженной волны равнялось нулю [см. формулу (13)].

Тангенциальные слагающие электрического и магнитного полей в плоскости раздела сред.

$$E = -\Pi \frac{\partial A}{\partial t} = -j\omega \Pi (m_1 e^{\xi x + j\omega t} + m_2 e^{-\xi x + j\omega t}),$$

$$H = -\frac{\partial A}{\partial x} = -\xi m_1 e^{\xi x + j\omega t} + \xi m_2 e^{-\xi x + j\omega t}.$$

Учитывая пограничные условия, можно написать, что зависимость между преломленной волной, прошедшей во вто-

рую среду за плоскость раздела сред, и волнами падающей и отраженной может быть выражена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{np} &= \dot{H}_{пад} - \dot{H}_{от}, \\ \dot{E}_{np} &= \dot{E}_{пад} + \dot{E}_{от}. \end{aligned}$$

Отношение напряженности электрического и магнитного полей для первой среды

$$\frac{E_{пад}}{H_{пад}} = \frac{E_{от}}{H_{от}} = -j \frac{\omega \Pi_I}{\xi_I}$$

и для второй среды

$$\frac{E_{np}}{H_{np}} = -j \frac{\omega \Pi_{II}}{\xi_{II}}.$$

Следовательно, пользуясь этими выражениями, последние уравнения можно привести к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{np} &= \dot{H}_{пад} - \dot{H}_{от}, \\ H_{np} \frac{\Pi_{II}}{\xi_{II}} &= (H_{пад} + H_{от}) \frac{\Pi_I}{\xi_I}, \end{aligned}$$

откуда получаем, что отношение волны преломленной и волны падающей

$$\gamma = \frac{H_{np}}{H_{пад}} = \frac{2\Pi_I \xi_{II}}{\Pi_I \xi_{II} + \Pi_{II} \xi_I}.$$

Если волна падает из воздуха в железо, то $\mu_I = 1$, $\lambda_I = 0$, $\xi_I = \nu$, и выражение для γ приобретает следующий вид:

$$\gamma = \frac{2\xi}{\nu\mu + \xi}. \quad (30)$$

В последнем выражении опущены индексы, указывающие, что ξ относится ко второй среде, так как теперь это не внесет неясность.

Коэффициент γ представляет отношение преломленной волны к падающей, иными словами, дает отношение величины магнитного поля у железной стенки к полю, которое имело бы место в тех же точках пространства при удалении железа в бесконечность. Следовательно, коэффициент γ учитывает, во сколько раз изменяется тангенциальная слагающая магнитного поля под влиянием двух взаимно противоположных факторов: большой магнитной проницаемости железа и экранирующего действия вихревых токов.

При очень больших длинах волн, как легко видеть из последнего соотношения, γ стремится к двум, т. е. при приближении железа тангенциальная слагающая поля усилится вдвое. Это действие объясняется влиянием вихревых токов и проявляется в полной мере при достаточной толщине железа. Нетрудно видеть из формулы (32), что с повышением проницаемости значение γ также стремится к двум и с повышением μ — к нулю.

Для случая стационарного поля ($\omega = 0$) мы имеем вследствие различия магнитной проницаемости воздуха и железа уменьшение тангенциальной слагающей поля на краю листа:

$$\gamma = \frac{2}{\mu + 1}.$$

Таким образом если нам известна тангенциальная слагающая напряженности магнитного поля в отсутствие железа, то изменение поля под влиянием железа с учетом экранирующего действия вихревых токов мы можем подсчитать и, следовательно, определить потери в железе.

Нетрудно также определить уменьшение магнитного потока, которое возникает благодаря экранирующему действию вихревых токов. Согласно (28) магнитный поток в железе

$$\Phi_\omega = \frac{2\Pi}{\xi} H_{\omega},$$

где индекс ω указывает круговую частоту во времени, которую имеет рассматриваемая величина. Последнее выражение может быть приведено к следующему виду:

$$\Phi_{\omega} = \frac{\Pi H_0 \gamma}{2\xi} = \frac{\Pi H_0}{\nu\mu + \xi},$$

где $H_{0\omega} = \gamma H_0$ — амплитуда тангенциальной составляющей поля в плоскости раздела сред в предположении, что железо отсутствует (или, что для железа имеем $\mu = 1, \lambda = 0$).

С другой стороны, поток при отсутствии вихревых токов ($\omega = 0$) будет

$$\Phi_{\omega=0} = \frac{\Pi}{\nu\mu + \nu} H_0$$

и, следовательно, коэффициент экранирования магнитного потока

$$\sigma = \frac{\Phi_{\omega}}{\Phi_0} = \frac{\nu(\mu + 1)}{\nu\mu + \xi} \approx \frac{\nu\mu}{\nu\mu + \xi}$$

и абсолютное значение

$$\sigma \approx \frac{\nu\mu}{\sqrt{\nu^2\mu^2 + \xi^2 + 2\nu\mu\xi \cos \theta}},$$

где θ — аргумент комплекса ξ .

Пример. При длине волны поля по оси y $2\tau = 10$ см, магнитной проницаемости железа $\mu = 500$ и проводимости

$$\lambda = 10^5 \frac{1}{\Omega \text{ см}}$$

будем иметь

$$\nu = \frac{\pi}{\tau} = 0,628, \quad \chi = 14,1, \quad \xi \approx \chi = 14,1,$$

$$\sigma = \frac{0,314 \cdot 500}{0,314 \cdot 500 + 14,1} \approx 0,92,$$

т. е. поле от экранирующего действия вихревых токов уменьшится на 8%.⁰

V. О выборе значения магнитной проницаемости

Полученные выше формулы, хотя и выведены, строго исходя из основных уравнений электромагнитного поля, только до известной степени отражают действительные явления, происходящие в железе. Вследствие зависимости магнитной проницаемости от индукции характер изменения поля в железе отступает от экспоненциального; вместе с тем искажается и экспоненциальная кривая распределения плотности вихревых токов. Все же вышеприведенные формулы могут дать достаточно близкие к действительности результаты, если принять за величину μ некоторое среднее эффективное значение. Эффективное значение слагающих напряженности поля по пространству (по оси y)

$$\dot{H}_{x\text{эф}} = \frac{H_0 \nu}{\sqrt{2} \xi} e^{-\xi x + j\omega t}, \quad \dot{H}_{y\text{эф}} = \frac{H_0}{\sqrt{2}} e^{-\xi x + j\omega t}.$$

Квадрат результирующего эффективного значения индукции определяется как

$$H_{x\text{эф}}^2 + H_{y\text{эф}}^2 = \frac{H_0^2}{2} \frac{\nu^2 + \xi^2}{\xi^2} e^{-2\xi x + j\omega t}.$$

Эффективное значение напряженности поля во времени и в направлении оси y , следовательно, будет равно

$$\frac{H_0^2}{2} \frac{\nu(\nu + \nu)}{\xi^2} e^{-2\xi x}.$$

Если считать по предыдущему, что в направлении оси x полетери сосредоточены на толщине железа $a = \frac{1,5}{\nu}$, то квадрат эффективного значения напряженности поля в пространстве и времени будет равен

$$H_{\text{эф}}^2 = \frac{\nu}{1,5} \int_0^{\frac{1,5}{\nu}} \frac{H_0^2}{2} \frac{\nu(\nu + \nu)}{\xi^2} e^{-2\nu x} dx = \frac{H_0^2}{\xi^2} \nu(\nu + \nu)$$

и, следовательно, эффективное значение напряженности поля

$$H_{\text{эф}} = \frac{H_0}{\xi} \sqrt{\frac{\nu(\nu + \nu)}{6}}$$

или, пользуясь выражением (28), связывающим поле с потоком, получим

$$B_{\text{эф}} = \frac{\Phi_{\omega}}{2\sqrt{6}} \sqrt{\nu(\nu + \nu)}$$

или, исходя из потока стационарного поля

$$B_{\text{эф}} = \frac{\Phi_0 \sigma}{2\sqrt{6}} \sqrt{\nu(\nu + \nu)}.$$

При малых значениях ν будем иметь приближенно

$$B_{\text{эф}} \approx \frac{\Phi_0}{2\sqrt{6}} \frac{\nu\mu\chi}{\sqrt{2\nu\mu + \chi}} = 0,23 \frac{\Phi_0 \nu\mu\chi}{\sqrt{2\nu\mu + \chi}}.$$

Искомое эффективное значение должно по формуле (35) соответствовать $B_{\text{эф}}$. С другой стороны, зависимость между B и μ должна также соответствовать кривой намагничивания данного железа. Для определения искомого значения вычертим на одном и том же графике кривую намагничивания

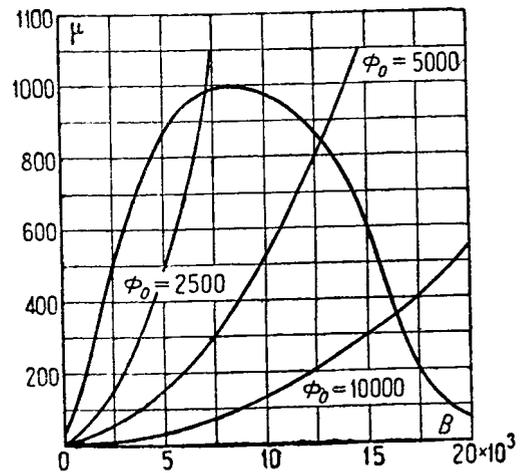


Рис. 5.

и кривую $B = f(\mu)$ по уравнению (35). Пересечение обеих кривых дает эффективное значение магнитной проницаемости¹⁾.

На рис. 5 дана зависимость μ от индукции, измеренной на котельном листовом железе, и нанесен ряд кривых по

равнению (35) для $\nu = 0,628$ для различных значений стационарного потока Φ_0 . Пересечение этих кривых с кривой намагничивания дает эффективные значения магнитной проницаемости для различных значений магнитного потока Φ_0 .

На рис. 6 представлена зависимость μ от потока Φ_0 . Результаты расчета потерь на вихревые токи в железе будут давать тем более точные значения, чем ближе найденное эффективное значение приближается к максимальной магнитной проницаемости для данного сорта железа, так как в этой области намагничивания изменение μ не претерпевает сильных изменений с изменением B и, следовательно, исходное предположение, что характер распределения индукции имеет экспоненциальный вид, приближается к действительности.

Пример 1. Определить потери в железе от вихревых токов, наведенных от ряда шин, несущих токи чередующегося направления. Ток шины $J = 3\,000$ А, частота $f = 50$ Hz (рис. 7). Магнитные свойства железа определяются рис.

1. Проводимость железа $\lambda = 10^5 \frac{1}{\Omega \text{см}}$. Геометрические размеры определяются следующими данными: $\delta = 4,0$ см, $b = 6,0$ см, $a = 0,5$ см, $\tau = 5,0$ см, $l = l_0 - \delta = 2,0$ см. Толщина железа 0,5 см. Определим прежде всего магнитный поток стационарного поля Φ_0 , вступающий в железо на длине τ и на 1 см в глубину железа по оси z при обтекании шин постоянным током.

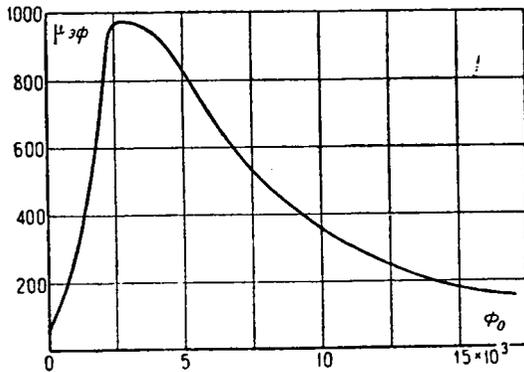


Рис. 6.

Определить этот поток можно двумя путями:
Плотность тока в шине

$$\Delta = \frac{\sqrt{2}I}{2a\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 3\,000}{2 \cdot 4 \cdot 0,5} = 1\,060 \text{ А/см.}$$

Если разложить заданное периодическое изменение плотности тока в тригонометрический ряд, то амплитуда основной волны

$$\Delta_0 = \frac{4\Delta}{\pi} \sin \frac{\nu a}{2} = \frac{4 \cdot 1\,060}{\pi} \sin \frac{0,628 \cdot 0,5}{2} = 211 \text{ А/см}^2.$$

Векторный потенциал магнитного поля основной волны плотности тока будет определяться в отсутствие железа как 2)

$$A' = \frac{\Delta_0}{\nu^2} e^{-\nu l_0} \text{sh } \nu \delta \cdot \cos \nu y,$$

учитывая влияние железа фиктивными токами, зеркально отраженными от плоскости $x' = 0$, как от зеркала, мы получим по оси ординат удвоенное значение векторного потенциала

$$A = 2A' = \frac{2\Delta_0}{\nu^2} e^{-\nu l_0} \text{sh } \nu \delta \cdot \cos \nu y.$$

Следовательно, магнитный поток, входящий в железо на длине τ ,

$$\Phi_0 = | \Pi A |_{y=0}^{\tau} = \frac{4 \Pi_0 \Delta_0}{\nu^2} \text{sh } \nu \delta \cdot e^{-\nu l_0} = \frac{2 \Pi_0 \Delta_0}{\nu^2} (1 - e^{-2\nu \delta}) e^{-\nu l},$$

где $\Pi_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$. Магнитный поток $\Phi_0 = \Phi_{0m} e^{-\nu l}$, где

$$\Phi_{0m} = \frac{2 \Pi_0 \Delta_0}{\nu^2} (1 - e^{-2\nu \delta})$$

представляет наибольшее значение потока, который входил бы в железо, когда железный лист непосредственно лежит на шинах ($l = 0$).

Отсюда ясно, что с удалением шин от железа этот поток уменьшается со скоростью экспоненциальной функции $e^{-\nu l}$.

Найдем величину магнитного потока

$$\begin{aligned} \Phi_{0m} &= \frac{2 \Pi_0 \Delta_0}{\nu^2} (1 - e^{-2\nu \delta}) \approx \frac{2 \Pi_0 \Delta_0}{\nu^2} = \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot 211}{0,628^2} = \\ &= 0,134 \cdot 10^{-4} \text{ Vsec} \end{aligned}$$

или $\Phi_{0m} = 1\,340$ максвеллов.

Величину этого потока можно определить также из следующей приближенной формулы

$$\Phi_{0m} = \Pi_0 H_n \left[(\tau - a) + \frac{a}{2} \right] = \Pi_0 H_n \left(\tau - \frac{a}{2} \right),$$

где $H_n = \frac{I\sqrt{2}}{4\delta}$ (нормальная составляющая поля) в предположении, что все сопротивление магнитной цепи сосредоточено на участке между шинами. Следовательно,

$$\begin{aligned} \Phi_{0m} &= \frac{\Pi_0 I\sqrt{2}}{4\delta} \left(\tau - \frac{a}{2} \right) = \\ &= \frac{1,25 \cdot 10^{-8} \cdot 3\,000 \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot 4} (5 - 0,25) = 0,158 \cdot 10^{-4} \text{ V sec,} \end{aligned}$$

т. е. результаты подсчета магнитного потока по обоим методам близки друг к другу.

Стационарный поток, входящий в железо, если между шинами и железом расстояние l см

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} e^{-\nu l} = 1\,340 \cdot 0,287 = 385 \text{ максвеллов.}$$

Для определения значения μ на рис. 5 построена зависимость

$$B_{\text{эф}} = 0,2\sqrt{3} \Phi_0 \frac{\nu \mu x}{\sqrt{2\nu \mu + x}}.$$

Пересечение построенной кривой и кривой намагничивания дает эффективное значение $\mu \approx 60$. Следовательно, коэффициент экранирования магнитного потока

$$\sigma = \frac{\nu \mu}{\nu \mu + \xi} \approx \frac{\nu \mu}{\nu \mu + \frac{x}{\sqrt{2}}} = \frac{0,628 \cdot 60}{0,628 \cdot 60 + 3,46} = 0,915,$$

где

$$\frac{x}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\Pi_0 \omega l}{2}} = 3,46.$$

Следовательно, действительный поток, входящий в железо,

$$\Phi = \Phi_0 \sigma = 385 \cdot 0,915 = 352 \text{ максвелла}$$

и отсюда потери в железе при $f = 50$ Hz

) См., например F. Ollendorff, Potentialfelder der Elektrotech-
332.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru $p = 0,612 f (\Phi_0 \sigma)^2 \frac{1}{\dots} 10^{-12} = 1,07 \cdot 10^{-8} \text{ W/cm}^2;$

на квадратный метр поверхности железа, следовательно, потери

$$p = 10,7 \text{ W.}$$

При расчете потерь, как видно из вышеизложенного, была принята во внимание только основная волна плотности тока шин. Нетрудно было бы показать, что учет высших гармонических практически не изменяет полученной величины. Небольшое значение потерь в железе объясняется малым расстоянием между шинами, несущими ток разного направления. С увеличением этого расстояния потери возрастают весьма быстро.

Пример 2. Предположим, что те же шины (рис. 7) обтекаются трехфазным током $I = 3000 \text{ A}$. Плотность тока

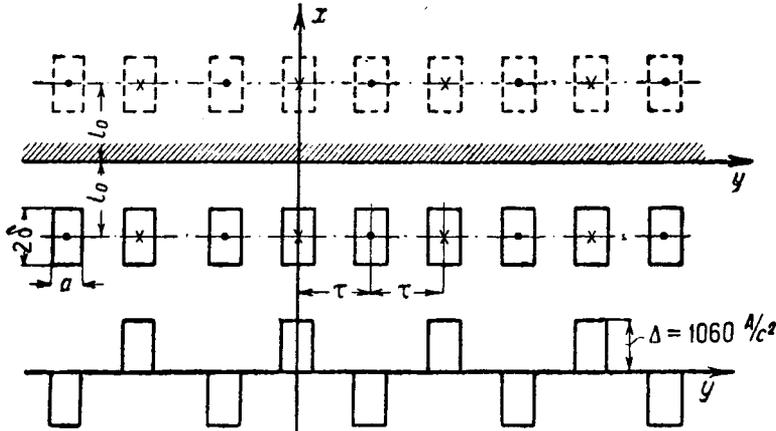


Рис. 7.

шины, как и в предыдущем случае, $\Delta_0 = 1060 \text{ A/cm}^2$. Разложим отдельно периодическое изменение плотности тока каждой фазы в тригонометрический ряд. Тогда получим, что основные гармонические фаз будут равны:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}_A &= \Delta_0 e^{j\omega t} \cos \frac{\nu y}{3}, & \dot{\Delta}_B &= \Delta_0 e^{j\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)} \cos \left(\frac{\nu y}{3} + \frac{2\pi}{3}\right), \\ \dot{\Delta}_C &= \Delta_0 e^{j\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)} \cos \left(\frac{\nu y}{3} + \frac{4\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

где Δ_0 — амплитуда основной волны плотности тока фазы $\Delta_0 = \frac{4I}{\pi} \sin \frac{\nu a}{6}$ и $\nu = \frac{\pi}{\tau}$ (длина основной волны 6τ).

Складывая основные волны всех фаз, будем иметь бегущую волну

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}_R &= \dot{\Delta}_A + \dot{\Delta}_B + \dot{\Delta}_C = \frac{3\Delta_0}{2} e^{j\left(\omega t - \frac{\nu y}{3}\right)} = \\ &= \frac{6\Delta}{\pi} \sin \frac{\nu a}{6} e^{j\left(\omega t - \frac{\nu y}{3}\right)}. \end{aligned}$$

Амплитуда бегущей волны

$$\Delta_{R0} = \frac{6\Delta}{\pi} \sin \frac{\nu a}{6} \approx \frac{\Delta \cdot a}{\tau} = \frac{1060 \cdot 0,5}{5} = 106 \text{ A/cm}^2.$$

Стационарный магнитный поток по предыдущему будет равен

$$\begin{aligned} \Phi_{0m} &= \frac{2\Pi_0 \Delta_{0R}}{\left(\frac{\nu}{3}\right)^2} \left(1 - e^{-\frac{2\delta\nu}{3}}\right) = \\ &= \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi 10^{-9} \cdot 106}{\left(\frac{0,628}{3}\right)^2} \left(1 - e^{-\frac{8,0,628}{3}}\right) = 0,487 \cdot 10^{-4} \text{ V sec.} \end{aligned}$$

Учитывая, что расстояние от железа до шин 2 см, получим следующую величину потока, входящего в железо:

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} e^{-\frac{\nu l}{3}} = 0,487 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-0,42} = 0,32 \cdot 10^{-4} \text{ V sec.}$$

Для определения эффективного значения μ воспользуемся методом, использованным в предыдущем примере, т. е. найдем значение μ , удовлетворяющее одновременно зависимости, определяемой кривой намагничивания (рис. 5), и зависимости

$$B_{\text{эф}} = \sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot \Phi_0 \frac{\nu \mu \cdot \chi}{\sqrt{2\nu \mu + \chi}}.$$

Определенное таким образом значение $\mu = 930$ — величина, значительно большая, чем в предыдущем случае, так как здесь насыщение железа значительно выше.

Коэффициент экранирования магнитного потока, следовательно,

$$\sigma = \frac{\frac{\nu \mu}{3}}{\frac{\nu \mu}{3} + \sqrt{2}} = \frac{\frac{0,628}{3} \cdot 930}{\frac{0,628}{3} \cdot 930 + 13,5} = 0,937,$$

так как

$$\frac{\chi}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\Pi \omega \lambda}{2}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot 314 \cdot 10^5 \cdot 930}{2}} = 13,5.$$

Следовательно, действительный поток, входящий в железо, с учетом экранирования от токов Фуко будет

$$\Phi = \sigma \Phi_0 = 0,937 \cdot 0,32 \cdot 10^{-4} = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ V sec}$$

и потери в железе

$$p = 1,25 \cdot 50 \cdot 3000 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^5}{930}} 10^{-12} = 41,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2,$$

или 413 W/m^2 .

Следовательно, несмотря на значительную величину магнитной проницаемости в этом случае по сравнению с предыдущим примером потери при трехфазной системе шин значительно больше, чем однофазной. Объясняется это в основном тем, что при трехфазной системе шин увеличивается в три раза длина волны магнитодвижущей силы, что в свою очередь сильно увеличивает магнитный поток, входящий в железо.

К РАСЧЕТУ НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ

Еще о спорных вопросах проектирования низковольтных сетей¹⁾

Инж. С. Н. Никогосов, инж. Б. Л. Айзенберг, инж. М. Н. Карасик.
Ленэнерго

Вопросы проектирования электрических распределительных сетей низкого напряжения неоднократно поднимались на страницах технической печати и служили предметом ожесточенной дискуссии.

Последнее выступление проф. В. М. Хрущова, любезно взявшего на себя труд проведения итогов дискуссии, к сожалению, никак не может считаться ее завершением. Ввиду того что в указанной статье автор уделил много места отзыву о нашей статье 1931 г. (№ 19 журнала „Электричество“) по выбору напряжения низковольтной городской сети, считаем необходимым дать нижеследующие дополнения и разъяснения к указанной статье.

В основном весь комплекс затрагиваемых вопросов распадается на две части: 1) определение расчетных нагрузок сети, 2) размещение трансформаторных подстанций, выбор конфигурации сети и выбор напряжения.

1. Определение расчетных нагрузок

Подробное описание методов определения электрических нагрузок, положенных в основу первого пятилетнего плана развития сетей Ленинграда, данные из которого и были приведены в первой статье авторов, содержится в статье инженеров Б. Л. Айзенберга, М. Н. Карасика и К. Д. Бурлина, „Определение нагрузок Ленинграда“ (ЛЭМИ № 2, 1933 г.). Поэтому здесь приводим только вкратце сущность метода, полученные величины нагрузок и результаты проверки их на практике.

Метод определения электрических нагрузок, применяемый Электросетью, базировался на данных ряда специальных многочисленных и массовых обследований: обследования 1927 г. в Ленинграде и в Москве (2 765 абонентов), 1928 г. (500 абонентов), 1929 г. (11 000 абонентов), 1930 г. (10 000 абонентов) и, наконец, в 1930 г. — 8 Сольских кварталов города (свыше 100 крупных домов).

Изучение полученных результатов позволило сделать следующие выводы:

1. Удельное потребление электрической энергии для освещения жилых квартир на 1 м² жилой площади независимо от района города является величиной постоянной, но вместе с тем возрастающей из года в год: так, в 1927 г. эта величина в Ленинграде составляла 2,52 kWh/m², а в 1930 г. достигла приблизительно 3,8 kWh/m².

2. Если условно отнести к каждому квадратному метру жилой площади не только внутриквартирное потребление энергии, но и потребление дворов, лестниц, жактов, учреждений, торговых помещений и мелких мастерских, расположенных в данном доме, то полученная таким подсчетом величина уже не будет постоянной для разных районов города. В результате тщательного изучения вопроса было установлено, что полное (условное) удельное потребление электрической энергии, приходящееся на 1 м² полезной жилой площади, зависит от числа квадратных метров площади учреждений, торговых помещений и мастерских, приходящихся на 1 га застроенной площади города; зависимость эта оказалась весьма устойчивой и позволила принять ряд удельных норм

(см. табл. 1). Этим же фактором определялась величина коэффициента пользования.

3. Метод подсчета электрических нагрузок был основан на использовании данных о предполагаемых к расчетному году размерах жилого фонда в рассматриваемом районе, удельном потреблении электрической энергии на 1 м² полезной жилплощади, взятой из табл. 1, и учетом ежегодного прироста этой величины, значениях коэффициента пользования и значениях коэффициента одновременности.

Таблица 1

| Категория районов города | Площадь учреждений, торговых помещений и мелких мастерских в м ² на 1 га застроенной площади участка | Удельное потребление в kWh на 1 м ² жилплощади | Коэффициент пользования в часах | Максимум нагрузок в W/m ² | Головой прирост удельной нагрузки в % | Расчетная нагрузка к 5-му году |
|--------------------------|---|---|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| I | 2 500 и выше | 10—12,5 | 3 000 | 3,33—4,17 | 15 | 6,6—8,4 |
| II | 1 000—1 500 | 7 | 2 750 | 2,55 | 20 | 6,4 |
| | 500—100 | 6,5 | 2 500 | 2,60 | | |
| III | 200—500 | 5 | 2 100 | 2,38 | 12 | 4,2 |
| | До 200 | 4 | 1 600 | 2,50 | | |

Мы, к сожалению, не располагаем в настоящий момент значениями коэффициента застройки, которыми оперирует проф. Хрущов, но несомненно одно, что, поскольку приведенная в табл. 1 расчетная удельная нагрузка не ниже даваемого проф. Хрущовым значениям 3,5 W/m², нет никаких оснований предполагать о бесперспективном определении нами нагрузок для Ленинграда.

Кажущиеся проф. Хрущову крайне низкими значениями поверхностных плотностей нагрузок для отдельных районов Ленинграда, которые даже по контрольным замерам 1932/33 г. не превышают 0,5 W/m², могут быть частично объяснены тем, что фактический коэффициент застройки старых окраин Ленинграда значительно ниже принятого проф. Хрущовым на основании рассуждений, относящихся, повидимому, к вновь застраиваемым кварталам социалистического типа.

Если для такого крупного центра, как Ленинград, предположения проф. Хрущова к 1937 г. являются в своем нижнем пределе близкими к действительно возможному для старых окраин и в верхнем пределе для вновь сооружаемых жилых массивов социалистического типа, то для громадного большинства средних и мелких городов СССР они совершенно нереальны, как это видно, например, из табл. 2, составленной по данным проектной практики последних лет ЛОВЭО. Значения нагрузок для этих городов, подсчитанных к 1935 и 1937 гг., лежат не выше тех значений, которые приняты и инж. Тер-Миньяном в практике Московского отделения ВЭО, и во всяком случае не имеют ничего общего с теми значениями нагрузок, которые подсчитывает проф. Хрущов. Приходится решить вопрос, каким из них отдавать предпочтение, но простая логика заставляет, конечно, больше верить значениям нагрузки, подсчитанным ЛОВЭО, который при детальном проектировании безусловно, учел как существующие условия, так и возможности дальнейшего роста и раз-

¹⁾ Проф. В. М. Хрущов „О некоторых спорных вопросах проектирования электрических сетей населенных мест“ „Электричество“ № 1, 1933 г.

Таблица 2

| Города | Дата начала и конца проектирования | Расчетный год | Площадь города, охваченная сетью в км ² | Погонная длина электрифицированных улиц в км | Максимум нагрузки низковольтной сети в кВт | Низковольтная сеть | | Плотность заселения числа жителей на 1 км города | Число жителей к 1935 г. | Общая площадь электрифицированных помещений (жилые, учреждения, склады и пр.) | Площадь помещений к 1935 г. в м ² на 1 км ² города | Общая характеристика города |
|---------------------------|------------------------------------|---------------|--|--|--|--|------------------------------------|--|-------------------------|---|--|---|
| | | | | | | Поверхностная плотность нагрузки в Вт/м ² | Погонная плотность нагрузки в Вт/м | | | | | |
| Красногвардейск | VII 1929—III 1930 | 1935 | 5 | 43,3 | 1 113 | 0,220 | 25,7 | 4 200 | 21 000 | 505 000 | 0,101 | 1 + 2-этажные; преобладают деревянные дома |
| Шлиссельбург | 15/IX—1/XII 1930 | 1935 | 1,6 | 15,5 | 230 | 0,143 | 14,8 | 5 875 | 9 400 | 82 830 | 0,052 | То же |
| Котельнич | V—VII 1930 | 1935 | 1,35 | 19,0 | 469,0 | 0,35 | 24,7 | 8 500 | 11 500 | 137 610 | 0,102 | То же |
| Бологое | 25/IV—VII 1930 | 1935 | 1,90 | 26,7 | 367,0 | 0,193 | 13,8 | 6 850 | 13 000 | 95 117 | 0,050 | То же |
| Новгород | — | 1935 | 5,0 | 37,1 | 1 217,0 | 0,242 | 32,8 | 6 600 | 33 000 | 301 130 | 0,063 | 2 + 3-этажные здания; в центре каменные |
| Луга | V—IX 1929 | 1935 | 6,7 | 42,0 | 350,0 | 0,05 | 8,4 | 2 740 | 18 300 | 162 840 | 0,024 | 1 + 2-этажные; преобладают деревянные дома |
| Вятка | 27/III—25/VIII 1930 | 1935 | 3,5 | 26,7 | 1 098,5 | 0,31 | 41,0 | 10 857 | 38 000 | 316 240 | 0,090 | 1 + 2-этажные дома; редкая застройка |
| Петрозаводск | II—III 1930 | 1935 | 6,0 | 46,5 | 1 981 | 0,33 | 42,6 | 5 600 | 38 500 | 190 755 | 0,032 | Двухэтажные деревянные |
| Глазов | I—III 1930 | 1935 | 1,53 | 17,86 | 216 | 0,14 | 12,1 | 5 590 | 8 550 | 119 125 | 0,078 | 1 + 2-этажные деревянные |
| Шлиссельбург | 15/IX—1/XII 1930 | 1935 | 1,60 | 15,5 | 266 | 0,17 | 17,2 | 5 875 | 9 400 | 82 330 | 0,051 | То же |
| Петергоф | 15/III—15/VI 1930 | 1936 | — | 40,0 | 934 | — | 23,4 | — | 33 900 | 339 300 | — | То же |
| Дно | 11/VIII—6/IX 1931 | 1936 | 2,4 | 12,0 | 166 | 0,07 | 13,8 | 4 800 | 10 300 | 45 875 | 0,019 | То же |
| Детское село и Слуцк . | 5/V—10/VIII 1931 | 1937 | 4,5 | 51,0 | 1 953 | 0,43 | 38,4 | 10 120 | 87 200 | 713 605 | 0,160 | 1-, 2- и 3-этажные в Детском Селе и деревянные в Слуцке |
| Новоржев | 1/X—1/XI 1933 | 1936 | 1,2 | 9,0 | 130 | 0,10 | 14,5 | 2 900 | 3 500 | 53 650 | 0,045 | 1 + 2-этажные деревянные |

Пользование рекомендуемыми проф. Хрущовым нормами нагрузок привело бы в сущности к увеличению расчетного периода для сети вместо предписываемого последним приказом НКТП двухлетнего к 10—12-летнему периоду, или, иными словами, вызвало бы колоссальный перерасход остродефицитного проводникового материала.

2. Размещение сетевых подстанций, выбор конфигурации и напряжения сети

Вопрос о выборе числа сетевых подстанций, наиболее полно освещенный в печати в работах проф. Хрущова, основан, как и метод авторов, на классической работе проф. Зенгеля, являющегося основоположником технико-экономических расчетов сетей.

К сожалению, практическое применение метода проф. Хрущова в виду его чрезмерной сложности весьма затруднительно и доступно весьма ограниченному количеству высококвалифицированных инженеров, обладающих к тому же большим запасом терпения.

Что же касается метода авторов, то здесь необходимо указать следующее:

В первой статье авторов выводы были даны применительно к прямолинейной схеме питания. За прошедшее с появления статьи время авторы имели возможность значительно расширить дальнейшее исследование вопроса, причем в первую очередь было выяснено влияние на полученные результаты конфигурации сети. Были дополнительно рассмотрены

1) сеть четырехлучевой питания без ответвлений (рис 1.);

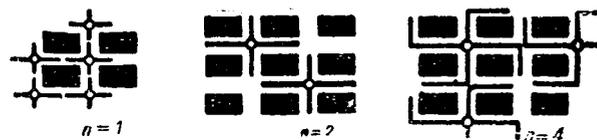


Рис. 1. Четырехлучевая схема

2) сеть четырехлучевой питания с одним ответвлением (рис. 2);

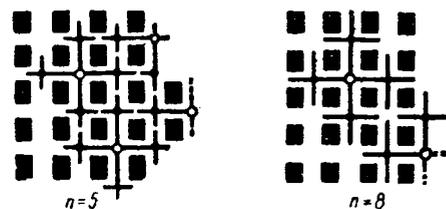


Рис. 2. Схема четырехлучевая с одним ответвлением

3) сеть четырехлучевой питания с двухсторонними ответвлениями (рис. 3).

Было выявлено, что рассматриваемые четыре конфигурации сети для удовлетворения условия полного охвата всех городских кварталов могут быть применены при обслуживании одной трансформаторной подстанцией приведенном

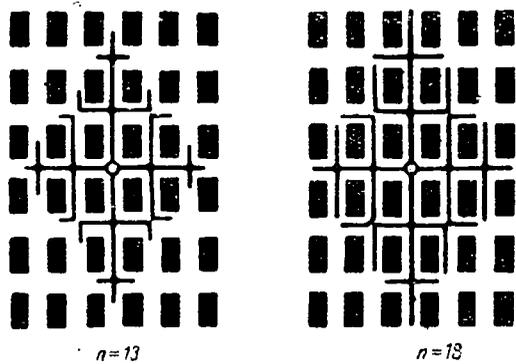


Рис. 3. Схема четырехлучевая с двумя ответвлениями

в табл. 3 числа кварталов было определено с учетом минимума проводящего материала. В результате расчета было получено, что приведенное в первой статье авторов значение для q должно быть умножено на коэффициенты формы сети рассмотренных конфигураций $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ или γ_4 , причем коэффициент γ_1 для прямолинейной схемы равен единице, так

Таблица 3

| С х е м а | Число обслуживаемых кварталов |
|-----------|-------------------------------|
| | 1 |
| | 1, 2 или 4 |
| | 5 и 8 |
| | 13 и 18 |

Для последних двух конфигураций сети сечение проводов q

как сечение проводов при этой конфигурации сети принято за исходное. Соответственно этому выражение для невыгоднейшей мощности сетевой трансформаторной подстанции получается равным:

для прямолинейной схемы

$$P_{T_1} = \phi_1 \sqrt[3]{\frac{s_1 D^2 t_2^2 \epsilon}{440 \cdot \zeta \cdot s_2}}$$

для четырехлучевой схемы

$$P_{T_2} = \phi_2 \sqrt{\frac{s_1 D^2 \cdot t_2^2 \epsilon}{440 \cdot \zeta \cdot s_2}}$$

для четырехлучевой с одним ответвлением

$$P_{T_3} = \phi_3 \sqrt{\frac{s_1 D^2 E_2^2 \epsilon}{440 \cdot s_2 \cdot \zeta}}$$

для четырехлучевой с двухсторонними ответвлениями

$$P_{T_4} = \phi_4 \sqrt{\frac{s_1 D^2 \cdot E_2^2 \epsilon}{440 \cdot s_2 \cdot \zeta}}$$

причем $\phi_1 = 1$. В этих основных формулах обозначают: s_1 — часть полной стоимости (в рублях) сетевой трансформаторной подстанции, не зависящая от мощности трансформатора и включающая: стоимость здания и оборудования подстанции, постоянную часть стоимости трансформатора с его монтажом и стоимость ввода в подстанцию сети среднего напряжения; s_2 — переменная часть полной стоимости

сети низкого напряжения (трехфазной с нулевым проводом), зависящая от сечения проводов, в рублях на 1 м длины сети и 1 мм² поперечного сечения проводов; ζ — коэффициент распределения нагрузки по проводу, принятый в первой статье авторов равным 2; ϵ — потеря напряжения от линейного напряжения E_2 (в процентах)

$$\frac{\epsilon E_2}{100} = \Delta U,$$

где ΔU — падение напряжения в вольтах по первой статье авторов.

Значения коэффициентов $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и γ_4 , а также ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 и ϕ_4 приведены в табл. 4 в функции от коэффициента формы кварталов $m = \frac{a}{b}$, где a — длина квартала, а b его ширина.

Таблица 4

| m | Четырехлучевое питание без ответвлений | | Четырехлучевое питание с одним ответвлением | | | | Четырехлучевое питание с двумя ответвлениями | | | |
|----------|--|----------|---|----------|-------------|----------|--|----------|--------------|----------|
| | γ_2 | ϕ_2 | 5 кварталов | | 8 кварталов | | 13 кварталов | | 18 кварталов | |
| | | | γ_3 | ϕ_3 | γ_3 | ϕ_3 | γ_4 | ϕ_4 | γ_4 | ϕ_4 |
| 0 | 1,0 | 1,0 | 0,215 | 1,67 | 0,147 | 1,90 | 0,082 | 2,30 | 0,0561 | 2,62 |
| 0,25 | 0,52 | 1,25 | 0,150 | 1,89 | 0,103 | 2,14 | 0,063 | 2,52 | 0,0422 | 2,88 |
| 0,50 | 0,33 | 1,44 | 0,124 | 2,00 | 0,085 | 2,28 | 0,056 | 2,62 | 0,0388 | 2,96 |
| 1,0 | 0,25 | 1,58 | 0,108 | 2,10 | 0,074 | 2,38 | 0,051 | 2,70 | 0,0365 | 3,02 |
| 2,0 | 0,33 | 1,44 | 0,124 | 2,00 | 0,085 | 2,28 | 0,056 | 2,62 | 0,0388 | 2,96 |
| 4,0 | 0,52 | 1,25 | 0,150 | 1,89 | 0,103 | 2,14 | 0,063 | 2,52 | 0,0422 | 2,88 |
| 8,0 | 0,705 | 1,13 | 0,177 | 1,79 | 0,121 | 2,03 | 0,072 | 2,41 | 0,0480 | 2,75 |
| ∞ | 1,0 | 1,0 | 0,215 | 1,67 | 0,147 | 1,90 | 0,082 | 2,30 | 0,0561 | 2,62 |

Для правильного решения задачи необходимо было также решить вопрос, какую из рассмотренных конфигураций сети следует выбирать при проектировании, что особенно затруднительно в начале расчета. Для решения этой задачи может быть рекомендован следующий простой способ:

По плану электрофицируемого города с нанесенной картограммой нагрузок определяется число кварталов N , соотношение длины и ширины городских кварталов m , длина низковольтной сети L (в метрах). Определяется средняя нагрузка одного квартала $P = \frac{M}{N}$, где M — максимальная нагрузка всей низковольтной сети, а делением M на L определяется $D = \frac{M}{L}$. По выбранным характерным для данного города значениям S_0, S_2, D, E_2, ζ вычисляют P_T для разных конфигураций сети (при полученном выше значении m).

Напряжение E_2 часто предопределяется напряжением существующих соседних участков сети города; если же вся сеть проектируется заново, определение E_2 производится способом, указанным ниже в пункте о выборе напряжения. Делением полученных значений P_T на p получают число охваченных сетью одной подстанции кварталов n . Следует выбрать при этом ту конфигурацию, значения n для которой лежат в приведенных в табл. 3 пределах, отдавая предпочтение в спорных случаях более разветвленной конфигурации сети. Для выбранной конфигурации сети определяют число подстанций путем деления максимума нагрузки M на P_T для этой конфигурации. Выбранное количество сетевых подстанций размещается на плане города соответственно картограмме нагрузок, а также имеющимся на этот счет общеизвестным практическим правилам, после чего приступают к расчету низковольтной сети. Последний вообще определяет собой окончательное число сетевых подстанций, так как для выполнения низковольтных сетей (особенно воздушных) в настоящее время имеется целый ряд основных правил. Теоре-

тическое число сетевых подстанций, по какому бы способу оно не было вычислено, служит только для ориентировочного расчета.

Теперь необходимо остановиться на основных упреках по существу метода авторов, приводимых проф. Хрущовым:

1. Учет способа размещения сетевых подстанций

Как нетрудно показать, несмотря на разные принципы подхода, приведенное выше выражение авторов для основного члена уравнения полной стоимости сети на 1 м ее длины — переменной составляющей стоимости низковольтной сети, — совершенно не отличается от аналогичного выражения проф. Хрущова, а раз это так, то и конечные результаты (L_2^1 и P_T) не должны отличаться, так как постоянная часть стоимости трансформаторной подстанции одинакова при обоих методах.

Действительно, объем металла четырехпроводной сети (при $q_0 = \frac{1}{2} q$) для прямолинейной схемы питания равен

$$Q_W = 3,5 q L = 3,5 q \frac{P}{D}$$

(так как $L = \frac{q}{D}$). Объем проводов, отнесенный к 1 kW при подстановке вместо q_2 его значения, делении выражения Q_1 на D и подстановке вместо $E_2 \epsilon$ и $3U_2^2$, получится равным

$$Q_W = \frac{220 \cdot 3,5 P_T^2 \zeta \cdot \gamma \cdot 10^3}{3 \cdot U_2^2 \epsilon D^2} = \frac{0,255 P_T^2 \zeta \gamma}{\epsilon U_2^2 D^2} \text{ ам}^3/\text{kW}.$$

Для четырехлучевой схемы без ответвлений ($m = 1$). Длины сети до точки сети с максимальным падением напряжения (одинаковая во все 4 стороны) $L_2^1 = \frac{P_T}{4D}$, откуда

$$P_T = 4L_2^1 D.$$

При подстановке вместо P_T и γ_2 их значений получаем

$$Q_W = \frac{0,255 \cdot 16 \cdot L_2^2 \zeta \cdot 0,25}{\epsilon U_2^2 D^2} = \frac{1,02 \zeta}{\epsilon} \cdot \frac{L_2^2}{U_2^2}.$$

Для четырехлучевой схемы с одним ответвлением $L_2 = \frac{P_T}{8D}$, откуда

$$P_T = 8DL_2 \text{ и } \gamma_3 = 0,074$$

(при $m = 1$ из табл. 4), следовательно,

$$Q_W = \frac{0,255 \cdot 64 L_2^2 \cdot 0,074 \zeta}{\epsilon \cdot U_2^2} = \frac{1,21 \zeta}{\epsilon} \cdot \frac{L_2^2}{U_2^2}.$$

Для четырехлучевой схемы с двумя ответвлениями

$$L_2 = \frac{P_T}{12D}$$

и

$$P_T = 12DL_2, \text{ а } \gamma_4 = 0,0365$$

(при $m = 1$ из табл. 4); следовательно,

$$Q_W = \frac{0,255 \cdot 144 \cdot L_2^2 \cdot 0,0365}{\epsilon v_2^2} = \frac{1,35}{\epsilon} \cdot \frac{L_2^2}{v_2^2}.$$

Значения коэффициента k_1 по данным проф. Хрущова приведены в табл. 5.

Как видно из этой таблицы, разница между коэффициентами лежит в пределах точности подсчетов.

Эти результаты приводят к выводу, что первый упрек о неучете формулой авторов способа размещения сетевых

| n | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|------|------|-------|
| k_1 | 1 | 1,25 | 1,297 |
| Полученные нами значения | 1,02 | 1,21 | 1,35 |

подстанций должен отпасть. Более подробно следует остановиться на втором упреке — неучете формулой авторов влияния распределительной сети среднего напряжения (6 kV).

Как уже указывалось выше, главная составляющая этого влияния — стоимость вводов сети среднего напряжения в каждую подстанцию, зависящая от числа подстанций — учтена в коэффициенте s_1 . Что же касается учета изменения стоимости собственно сети среднего напряжения, то необходимо указать следующее:

Производить это учет по методу проф. Хрущова, а именно вводить в полное уравнение стоимости сети — составляющей стоимости сети среднего напряжения, аналогичной составляющей по низковольтной сети, только с другими коэффициентами k_4 и k_5 , техническое обоснование которых не указано, не следует. Дело в том, что, во-первых, методы расчета городских сетей среднего напряжения коренным образом отличаются от методов расчета низковольтных сетей, а во-вторых, самый метод расчета первых зависит от типа сети — воздушной или кабельной, в свою очередь определяемых величиной электрической установки, к которой эти сети присоединены. Воздушные сети среднего напряжения применяются преимущественно в небольших городах, где имеются понижающие подстанции, присоединенные в свою очередь к районной сети.

Кабельные сети среднего напряжения применяются преимущественно в больших городах, где они являются одним из элементов всей распределительной системы от станции до потребителей.

Ограничивающим фактором при расчете для первых служит потеря напряжения и частично токи короткого замыкания, для вторых — преимущественно последнее. Это, конечно, сразу же отражается и на стоимости этой сети.

Рассмотрим практически наиболее характерный случай кабельной сети среднего напряжения, предпочтение которой всегда отдается. Для кабельной сети Ленинграда при мощности короткого замыкания на шинах фидерных подстанций около 100 000 kVA и при выдержке времени реле в 1 сек. минимально допустимое сечение проводов равно 50 мм² и, следовательно, совершенно не зависит ни от мощности сетевых подстанций, ни от их числа. Составляющая стоимости сети среднего напряжения на 1 м длины низковольтной сети и может быть выражена уравнением

$$k_3 = \frac{s_{03} L_{cp}}{L_H} + \frac{s_3 L_{cp}}{L_H} q_{cp}.$$

Соотношение длин сети среднего и низкого напряжений $\frac{L_{cp}}{L_H}$, входящих на одну сетевую подстанцию, для различных схем сети приведено на рис. 4, а на рис. 5 показана зависимость отношения $\frac{L_H}{L_{cp}}$ от числа охваченных сетью одной подстанции городских кварталов n . С достаточной для практических целей точностью эта зависимость может быть выражена уравнением:

$$\frac{L_H}{L_{cp}} = 2^3 \sqrt[n]{n}. \quad (A)$$

Мощность сетевой подстанции равна

$$P_T = b(m+1)nD,$$

$$n = \frac{P_T}{b(m+1)D}. \quad (B)$$

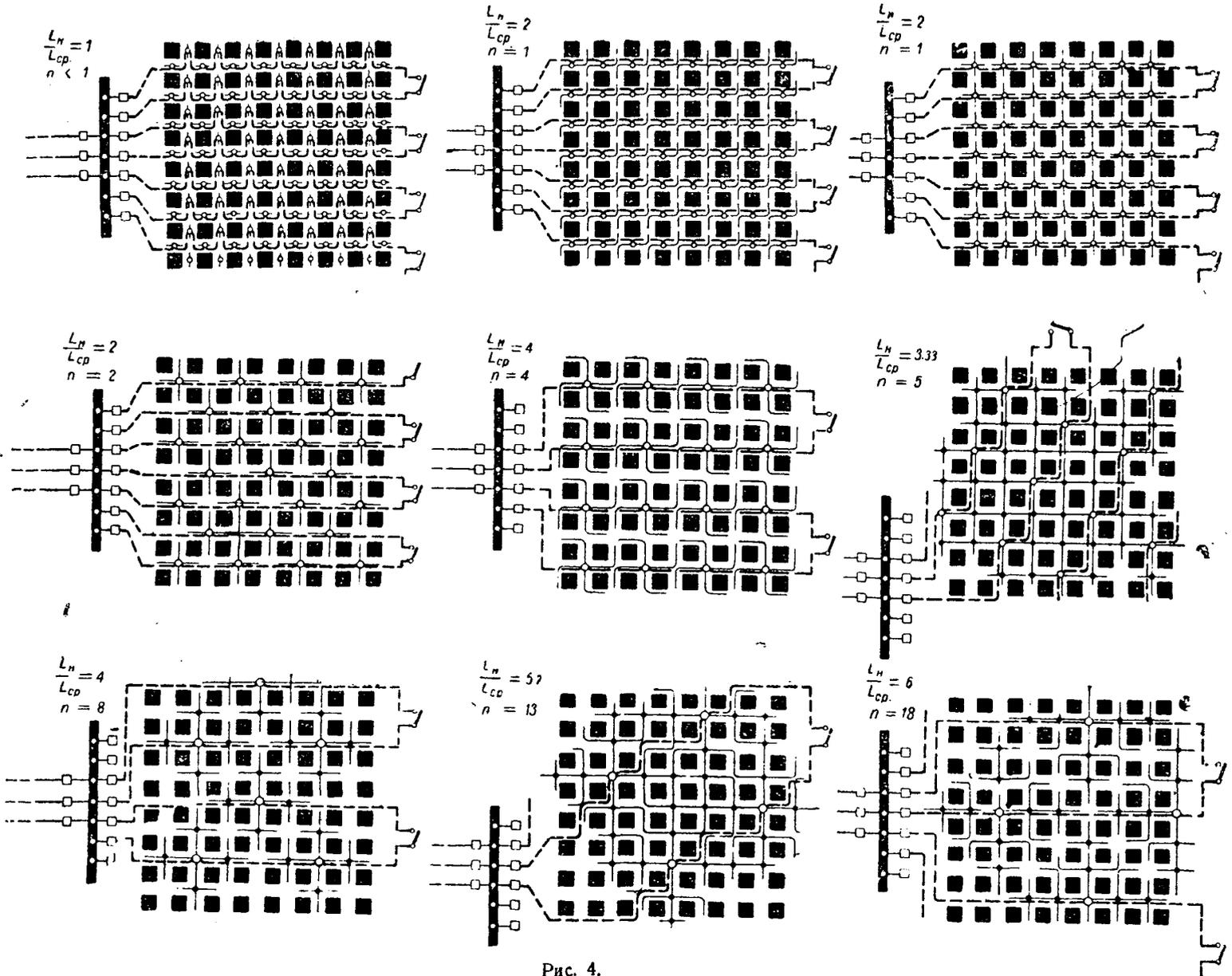


Рис. 4.

При подстановке значения n из уравнения (B) в уравнение (A) получаем:

$$\frac{L_{cp}}{L_H} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{6(m+1)D}{P_T}};$$

$$k_3 = \frac{(s_{03} + s_3 \cdot 50)}{2} \sqrt[3]{\frac{b(m+1)D}{\omega_T}}.$$

или

$$\frac{440\zeta\gamma P_T \Gamma}{E_2^2 \varepsilon D} - \frac{s_1 D}{\omega_T^2} - \frac{\Gamma D^{\frac{1}{3}}}{3P_T^{\frac{4}{3}}} = 0$$

$$\frac{440\zeta\gamma}{E_2^2 \varepsilon D} P_T^3 - \frac{\Gamma D^{\frac{1}{3}}}{3} P_T^2 = s_1 D.$$

Следовательно, при $m=1$

$$k_3 = 0,63 (S_{03} + S_3 \cdot 50) \sqrt[3]{\frac{bD}{\omega_T}}.$$

При учете составляющей сети среднего напряжения переменная часть общего уравнения стоимости сети на 1 м, зависящая от P_T , будет равна

$$k_1 = \frac{220P_T^2 \zeta \gamma}{E_2^2 \varepsilon D} + \frac{s_1 D}{\omega_T} + \Gamma \sqrt[3]{\frac{D}{P_T}},$$

где

$$\Gamma = b^{\frac{1}{3}} \cdot 0,63 (s_{03} + s_3 \cdot 50).$$

Произведенное дифференцирование для нахождения наимыгоднейшего значения P_T дает следующее выражение:

$$\frac{dk_e}{d\omega_T} = \frac{440\zeta\gamma}{E_2^2 \varepsilon D} P_T - \frac{s_1 D}{\omega_T^2} - \frac{\Gamma D^{\frac{1}{3}}}{3} P_T^{-\frac{4}{3}} = 0$$

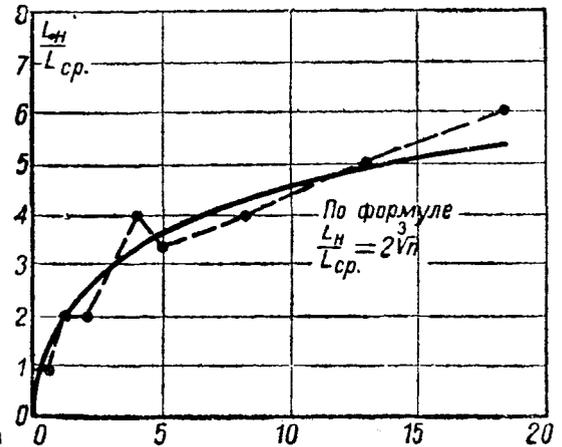


Рис. 5. Зависимость соотношения длины сети низкого и среднего напряжения одной трансформаторной подстанции от числа охваченных ее низковольтной сетью кварталов города

Определение значения наивыгоднейшей мощности трансформаторной подстанции из приведенного уравнения с учетом стоимости сети среднего напряжения и без учета этого члена показало, что разница составляет ничтожную величину, лежит в пределах точности расчета и с избытком перекрывается необходимым округлением величины P_T до ближайшей по стандарту мощности трансформатора.

Поскольку, как показано выше, основные упреки проф. Хрущова в неточности нашего метода по сравнению с его методом оказались несостоятельными, естественно возникает вопрос, не проще ли и не более ли удобен метод авторов для практического применения?

2. Выбор напряжения сети

Полученное основное выражение для стоимости сети разных конфигураций, пересчитанное на годовые расходы по сети по методу, приведенному в первой статье авторов, было применено к анализу вопроса о выборе напряжения низковольтной сети. В результате были получены следующие выражения наивыгоднейшего линейного напряжения E_2 , приведенные в табл. 6.

Таблица 6

| Конфигурация сети | Формула |
|---|---|
| 1. Прямолинейное питание | $E_2 = \delta_1 \sqrt[5]{\frac{440 C_1^2 C_2 \zeta}{\varepsilon D^2 \rho^3 \beta^3 T^3 C_4^3}}$ |
| 2. Четырехлучевое питание | $E_2 = \delta_2 \sqrt[5]{\frac{440 \cdot C_1^2 C_2 \zeta}{\varepsilon D^2 \rho^3 \beta^3 T^3 C_4^3}}$ |
| 3. Четырехлучевое питание с одним отверстием | $E_2 = \delta_3 \sqrt[5]{\frac{440 \cdot C_1^2 C_2 \zeta}{\varepsilon D^2 \rho^3 \beta^3 T^3 C_4^3}}$ |
| 4. Четырехлучевое питание с двумя отверстиями | $E_2 = \delta_4 \sqrt[5]{\frac{440 C_1^2 C_2 \zeta}{\varepsilon D^2 \rho^3 \beta^3 T^3 C_4^3}}$ |

Эти выражения в основном отличаются от приведенного в первой статье авторов выражения (с) только введением коэффициентов $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ и δ_4 соответственно рассмотренным четырем конфигурациям сети. Значения этих коэффициентов, равных соответственно $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = \sqrt[5]{\gamma_2}$, $\delta_3 = \sqrt[5]{\gamma_3}$ и $\delta_4 = \sqrt[5]{\gamma_4}$ приведены в табл. 7.

Таблица 7

| m | Четырехлучевое питание δ_2 | Четырехлучевое питание с одним ответвлением δ_3 | | Четырехлучевое питание с двумя ответвлениями δ_4 | |
|------|--------------------------------------|---|-------|--|--------|
| | | n = 5 | n = 8 | n = 13 | n = 18 |
| | | | | | |
| 0,25 | 0,878 | 0,685 | 0,632 | 0,575 | 0,531 |
| 0,5 | 0,716 | 0,659 | 0,611 | 0,561 | 0,523 |
| 1,0 | 0,759 | 0,642 | 0,595 | 0,552 | 0,516 |
| 2,0 | 0,716 | 0,659 | 0,611 | 0,561 | 0,523 |
| 4,0 | 0,878 | 0,685 | 0,622 | 0,575 | 0,531 |
| 8,0 | 0,933 | 0,710 | 0,655 | 0,589 | 0,545 |
| | 1,0 | 0,736 | 0,682 | 0,608 | 0,562 |

Задача выбора напряжения разрешается просто в том случае, если известна конфигурация сети, если же конфигурация сети неизвестна, что обычно имеет место в начале проектирования, следует определить E_2 по формуле (1) табл. 6 для прямолинейного питания. В том случае, если получается E_2 приблизительно равным 220 В или меньше, то для любой конфигурации напряжение 220 В предпочтительнее.

Может оказаться, что вычисление по приведенной формуле определит в качестве наивыгоднейшего напряжения $E_2 = 380$ В. Тогда следует учесть, что, как показал целый ряд расчетов, это возможно только при небольших значениях погонной плотности нагрузки D , при которой всегда более выгодны сильно разветвленные схемы. Следовательно, надо проверить E_2 умножением на δ_2 и δ_3 и принять в результате то из напряжений, к которому полученное в результате проверки E_2 окажется ближе.

Анализ этих выражений для наиболее часто встречающихся в настоящее время значений коэффициентов $c_1, c_2, D, \rho, \beta, T$ и c_4 ²⁾ показал, что по условиям удовлетворения минимуму расходов по передаче потребителю энергии наиболее экономичным напряжением в громадном большинстве случаев является напряжение 230/133 В не только для центра большого города, но и для его окраин и даже для мелких и средних городов, так как при небольших плотностях нагрузки окажется целесообразным применение наиболее разветвленной схемы сети. Однако практически в наших условиях при остром дефиците цветных металлов теоретически правильно рассчитанная сеть по падению напряжения в 4% но перегруженная вследствие невозможности ее реконструкции и усиления, окажется в большинстве случаев менее экономичной в эксплуатации при 220/127, чем при применении для данного же случая системы 380/220 В.

Действительно, в случае наблюдаемого в ряде районов Ленинграда и других городах Союза падения напряжения порядка 20% и выше, уменьшение светового потока при водит потребителя к необходимости увеличения установленной мощности ламп, в свою очередь еще больше перегружающего сеть, и к непроизводительному перерасходу энергии. Повышение напряжения до 380/220 В при тех же сечении провода уменьшит относительное падение напряжения в 1,49 раза и тем самым, несмотря на худшую светоотдачу 220 вольтных ламп, значительно повысит получаемый потребителем световой поток. Последнее легко может быть пояснено ниже следующими рассуждениями.

При уменьшении напряжения на клеммах 110-вольтовых ламп на 20%, световой поток, отдаваемый лампой, уменьшается приблизительно до 60% от номинального, и для получения номинального светового потока потребителю (если не учитывать куммулятивный процесс ухудшения напряжения из-за возрастающей в этом случае нагрузки) потребовалось бы увеличить мощность установленных ламп в 1,66 раза ³⁾

При уменьшении напряжения на клеммах 220-вольтовой лампы на 7% световой поток уменьшится до 77% от номинального, и для получения номинального светового потока потребителю необходимо было бы увеличить в 1,3 раза мощность ламп. Учитывая же повышенное при 220 В удельное потребление энергии в 15% для получения того же светового потока, что и в первом случае, потребовалось бы увеличить мощность ламп в $1,3 \times 1,15 = 1,49$ раза. Таким образом при повышении напряжения установки до 220 В эксплуатационные расходы уменьшатся в

$$\frac{(1,66 - 1,49) \cdot 100}{1,49} = 12\%$$

С точки зрения вышеприведенных соображений опубликованный в последнее время приказ Наркомтяжпрома об обязательном временном применении напряжений 380/220 В является, безусловно, правильным как временная мера в весь период дефицита цветных металлов. Следует только подчеркнуть, что для развитых существующих систем с напряжением 120 В этот переход на напряжение 380/220 В

²⁾ Значения всех этих коэффициентов приведены в первой статье авторов.

³⁾ Фактически учитываемая счетчиком потребителя энергия будет меньше вследствие понижения напряжения приемников, но это недоуценная энергия все равно теряется в проводах и тем самым увеличивает вредные потери в сети.

далеко не всегда возможен вследствие необходимости массовой замены приемников и трансформаторов и улучшения и изоляции домовых и квартирных сетей.

Кроме того, необходимо отметить, что дальнейший за пределами пятилетнего плана рост электрической нагрузки низковольтной сети пойдет в преимущественной степени не за счет осветительной, а за счет бытовой нагрузки (особенно в части потребления энергии, а не максимума нагрузки). Таким образом за счет этого фактора, как видно из формулы, величина наивыгоднейшего напряжения сильно повысится, и преимущества напряжения 220/127 V станут весьма проблематичными, и вопрос о бесперспективности, вероятно, окажется „палкой о двух концах“.

3. Выбор конфигурации низковольтной сети

Очень отраднo, что проф. Хрущов рекомендует применение замкнутых сетей. Это сейчас крайне необходимо, так как, к сожалению, в СССР применяются исключительно разомкнутые сети, рекомендуемые также и в специальных руководствах по сетям ⁴⁾. Безусловно, что на этом фронте овладения иностранной техникой имеется недопустимый прорыв. Значительность преимуществ замкнутых сетей особенно ясна из того интереса к этим сетям, который был за последние несколько лет проявлен германскими инженерами, и практического их осуществления в Берлине. Вопрос о применимости этой системы сетей в Ленинграде был также рассмотрен в 1930 г. при разработке комплекса основных вопросов сетевого строительства по первой пятилетке.

Соответственно техническому состоянию вопроса за границей в 1930 г. рассмотрение коснулось, главным образом, первой системы этих сетей — американской, выполняемой

⁴⁾ Хашинский, ч. 1.

без предохранителей, с защитой, основанной на том, что авария самоликвидируется выжиганием поврежденного места вследствие большой величины притекающего тока короткого замыкания от большого числа соединенных участков сети.

По имевшимся в то время литературным данным для правильного действия такой самозащиты необходимо было, чтобы падение напряжения при коротком замыкании составляло в среднем 0,5 V на 1 m сети, так как в противном случае получающийся при повреждении ток не был бы достаточен к выжиганию поврежденного места, вследствие чего могли иметь место повторные зажигания дуги и опасность большого распространения аварии. Это требование ведет к определенной частоте взаимной расстановки сетевых подстанций, значительно меньшей экономически наивыгоднейшей для принятых в то время плотностей нагрузки. Частично по этой причине, а также вследствие того, что в районах Ленинграда первой категории с значительной плотностью нагрузки, для которых, главным образом, могла быть применена замкнутая сеть, имелась в основном старая однофазная сеть, которая остается и на первые годы второй пятилетки. Замкнутая сеть в первую пятилетку запроектирована не была.

В настоящее время вопрос обстоит несколько иначе. Предложенная в развитие американской германская модификация замкнутой сети, основанная на применении специальных низковольтных предохранителей значительной разрывной мощности, а также возрастающая плотность нагрузки привели к тому, что сейчас начаты работы по выявлению целесообразности применения в пределах второй пятилетки замкнутой сети для Ленинграда. Существенным стимулом в успешном разрешении этой задачи, несомненно, послужит участие в этом вопросе эксплуатационного управления Главэнерго и ведущие за последние годы опытные работы в Московской сети.

27/III 1934 г.

НОРМЫ И СТАНДАРТЫ

К вопросу об изменении классификации и норм испытания крановых электродвигателей

Инж. В. В. Додев
Москва, завод „Динамо“

Наряду с машинизми и аппаратами, освоенными нашей электропромышленностью за последние несколько лет, не последнее место занимают крановые электродвигатели. Опыт, накопленный по освоению этих машин, дает возможность критически подойти к некоторым положениям, фигурирующим в электротехнических правилах и нормах, одобренных электротехническим съездом.

Подвергнуть критике нормы, касающиеся электродвигателей, работающих при повторно-кратковременном режиме, необходимо и потому, что они целиком заимствованы из немецких норм и, таким образом, не отражают ни накопленного нами опыта, ни специфической особенности нашей социалистической экономики. А вопрос о нормах, как известно, есть не столько теоретический, сколько экономический, потому что в конечном счете речь идет о степени использования конструктивного и активного материала машины, т. е. об использовании черного и цветного металлов, являющихся, как известно, дефицитными.

Поскольку нормы ВЭС затрагивают ряд вопросов, касающихся как классификации машин, так и их испытания, прежде чем перейти к конкретным предложениям, будут рассмотрены следующие вопросы:

- 1) перегрев крановых электродвигателей постоянного тока при кратковременном и повторно-кратковременном режимах;
- 2) перегрев тех же машин при повторно-кратковременном режиме и продолжительности работы 8 час. и до достижения температуры:

3) сравнения перегрева машин постоянного тока при измерении температуры методом термометра и сопротивления;

4) перегрев крановых электродвигателей трехфазного тока, работающих при кратковременном и повторно-кратковременном режимах (продолжительность работы 8 час.).

Сначала остановимся на определении повторно-кратковременного режима, данном в нормах ВЭС.

Классификация повторно-кратковременного режима

В союзных нормах на испытание машин имеются два указания, касающиеся повторно-кратковременного режима. Указания гласят:

„При нерегулярно распределенных рабочих периодах и промежутках за относительную продолжительность (ED) принимается отношение суммарного времени всех рабочих периодов к продолжительности времени испытания. Длительность такого испытания не должна быть больше 8 час.“. И далее: „В машинах для повторно-кратковременной работы испытание на нагрев может начинаться как в холодном, так и в нагретом состоянии. Испытание продолжается до тех пор, пока не установится конечная температура. Измерение температуры машины производится по истечении половины времени последнего периода работы. Продолжительность одного периода работы с промежутком (т. е. остановкой, или работы

Таким образом для машин, работающих при повторно-кратковременном режиме установлены два „режима испытания“.

Разберем сначала режим работы с нерегулярным распределением периодов и промежутков. При этом будем иметь в виду машину постоянного тока серийного возбуждения. Принимая с достаточной для принципиальных соображений точностью, что полные потери машины приблизительно пропорциональны квадрату тока, каждый нерегулярный повторно-кратковременный режим можно привести к соответствующему длительному режиму. Его квадратичная мощность, если пренебречь изменением условий охлаждения за время пауз, выражается формулой

$$N = \sqrt{\frac{N_1^2 t_1 + N_2^2 t_2 + \dots + N_n^2 t_n}{T}}$$

где N — длительная мощность (средняя мощность на весь период работы T), N_1, N_2, \dots — мощность в отдельные периоды t_1, t_2, \dots — продолжительность включения.

Мощность двигателя при режиме 25% ED будет

$$N_{25} = \frac{N}{\sqrt{\frac{t}{T}}} = \frac{N}{\sqrt{\frac{25}{100}}} = 2 N.$$

На ряде расчетов нетрудно убедиться, что при чередовании нагрузки мотора в пределах 15÷25 и 40% ED мы получаем такую среднюю квадратичную мощность, которая получилась бы и при равномерной нагрузке.

Отсюда можно сделать вывод, что повторно-кратковременный режим работы при нерегулярном распределении рабочих периодов и промежутков и длительности работы не больше 8 час. равен одному из нормальных режимов (15, 25 или 40% ED) при равномерном распределении рабочих периодов и промежутков и длительности работы не более 8 час.

Эти два указания норм независимо от редакции отражают как особенности эксплуатации, так и особенности теплового режима машин, работающих при повторно-кратковременном режиме.

Прежде всего об особенности эксплуатации. Значительная часть машин повторно-кратковременного режима (крановые, подъемные) работает в одной смене, и другая большая часть (вспомогательные машины в металлургии) работает непрерывно круглые сутки. Исходя из этого обстоятельства, авторы немецких норм включили пункт о длительности испытания не более 8 час. для первой группы машин и длительность испытания до достижения конечной температуры — для второй группы машин. Эти два пункта совершенно правильно были включены в союзные нормы на испытание машин, хотя количество машин, работающих по первой группе (8 час.), за последнее время уменьшилось вследствие перехода большей группы предприятий Союза за трехсменный график работы, но абсолютная цифра этих двигателей еще очень велика.

Вторая причина, вызвавшая противоречие в указанных нормах на испытание машин, заключается в следующем. Конечная температура различных машин (машин различных мощностей) устанавливается: для мелких машин (до 12 кгт и 25% ED) после 4÷5 час. непрерывной работы при повторно-кратковременном режиме; для средних машин (12÷30 кгт и 25% ED) — после около 8 час. непрерывной работы, и для больших машин (30—120 кгт и 25% ED) конечная температура устанавливается после 8, 16 и 24 час. непрерывной работы. И это вполне понятно, так как „постоянная времени“ возрастает с увеличением мощности.

Разница между 8-часовым и установившимся режимами и при ED%

Как известно, значение конечной температуры определяется союзными нормами в зависимости от рода изоляции. Номинальной мощностью машины называется та мощность, при которой температура машины не превышает тем-

пературы, установленной нормами. Как было сказано выше, конечная температура для машин, работающих при повторно-кратковременном режиме, устанавливается после истечения 4, 8, 16 и 24 час. непрерывной работы. На рис. 1 построена кривая перегрева машины в зависимости от момента для обоих режимов. Из этой кривой видно, что с увеличением мощности разница все больше и больше увеличивается.

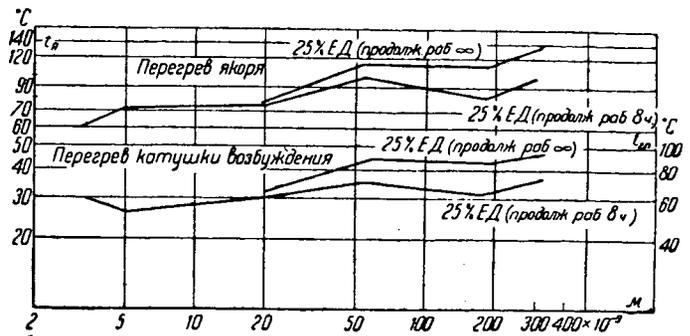


Рис. 1

Расхождение в перегреве между ED при 8-часовом и установившемся режимах объясняется тем, что для закрытой машины мощность возрастает не по уравнению $N_0 \approx kD^2l$, как для машины открытого типа, а пропорционально поверхности охлаждения, что видно из следующего:

Количество тепла, отводимого через поверхность охлаждения будет

$$W = aF\Delta t,$$

где a — коэффициент теплоотдачи, F — поверхность охлаждения, Δt — перегрев остова. С другой стороны, греющие потери приблизительно пропорциональны квадрату тока, а следовательно, и мощности, так что для закрытых машин мощность пропорциональна

$$N = a\Delta t \pi D l.$$

Часовой и повторно-кратковременный режимы 25% ED и при продолжительности работы не больше 8 час.

Если иметь в виду распространенный тип двигателя для повторно-кратковременной работы — закрытый тип, то его тепловой режим при ED различается от теплового режима того же мотора при кратковременной работе. Если время режима близко к тепловой постоянной времени машины (Zeitkonstante), то почти все тепло, создаваемое в машине, идет на повышение температуры, т. е. машина работает преимущественно за счет теплоемкости. Наоборот, при повторно-кратковременном режиме и установившейся температуре отдача тепла происходит исключительно через поверхности охлаждения, как и в машине, работающей при длительном режиме. Кроме того, распределение температуры внутри самой машины (закрытой машины) при повторно-кратковременном и кратковременном режимах неодинаково. В первом случае части машины, расположенные к поверхности охлаждения, значительно холоднее, чем при кратковременном режиме.

Несмотря на указанную разницу, всегда для повторно-кратковременного режима можно найти соответствующий кратковременный режим.

Если сравним перегрев якорей ряда машин одинаковой мощности при часовом режиме и режиме 25% ED и продолжительности испытания не более 8 час., то мы получим кривые, приведенные на рис. 2. На рис. 2 дана, точнее, не мощность, а момент. Из этих кривых видно, что для машин мелких мощностей температура перегрева якоря при часовом режиме выше соответствующей температуры при 25% ED и наоборот, для крупных машин перегрев при 25% ED выше, чем при часовом режиме. Из кривой дальше видно распределение температуры перегрева катушек возбуждения при

совом режиме и 25% ED. Из сравнения температуры перегрева якоря и катушек возбуждения видно, что если при часовом режиме якорь нагревается меньше, чем при 25% ED, то катушки нагреваются больше. Для мелких машин, как правило, наблюдается обратная картина.

Различные варианты распределения медных и железных потерь внутри машины оказывают некоторое влияние на температуры катушек при режимах часовом и 25% ED.

Результаты испытания крановых машин при обоих режимах показывают, кроме того, что преимущества повторно-кратковременного режима в смысле лучшего влияния на использование материала, которое Шибелер в своей книге „Крановые электродвигатели“ пытается доказать, является по меньшей мере не обоснованным. Из кривой рис. 2 видно, что соображения Шибелера обоснованы только для малых крановых двигателей, в пределах до 20 кгт. Для крупных электродвигателей кранового типа часовая режим дает пониженный перегрев и, следовательно, лучшее использование материала. Этим, собственно, можно объяснить то обстоятельство, что американцы и до сих пор не вводят повторно-кратковременный режим, а соразмеряют все крановые электродвигатели, идущие на вспомогательные механизмы металлургических предприятий и пр. при кратковременном режиме (часовой режим).

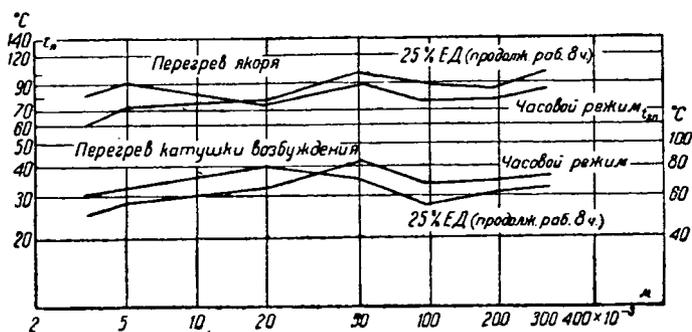


Рис. 2.

Сравнение перегрева крановых машин постоянного тока при измерении по методу термометра и методу сопротивления

Как известно, для определения температуры перегрева имеются два основных метода: метод термометра и метод сопротивления. Преимущества и недостатки каждого из этих методов с точки зрения точности, удобства измерения и пр. известны, и нужно сказать, что соображения за и против обоих методов настолько уравновешены, что нельзя дать преимущества ни одному, ни другому.

Иначе обстоит дело, если, принимая одно и то же значение перегрева, сравнить методы с точки зрения лучшего использования материала. Ряд работ, опубликованных за последнее время в заграничной литературе („ETZ“, Jacottet — Hilsbrand), показывает, что при измерении температуры по методу термометра электродвигатель используется лучше, поскольку термометр, прикладываемый к поверхности обмотки в доступном месте, показывает пониженную температуру по сравнению с измеренной методом сопротивления в среднем на 10—15°C для изоляции полюса класса А и 15—25°C для изоляций класса Б.

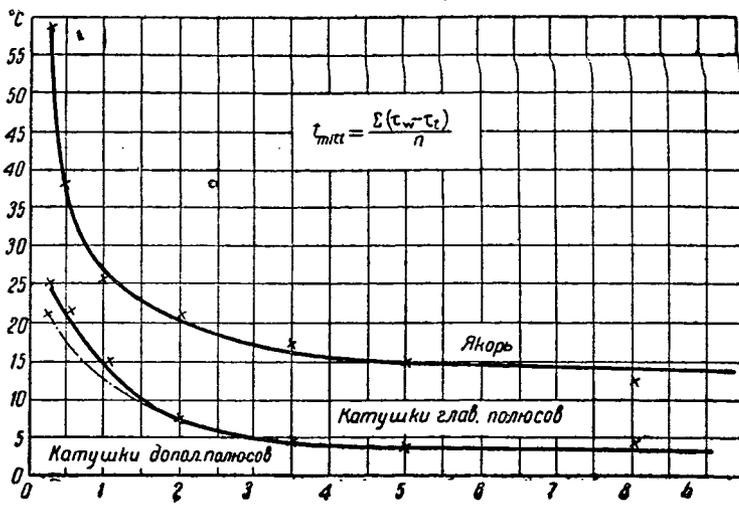


Рис. 4.

К сожалению, опубликованные сравнения относятся только к нормальным машинам, работающим длительно и в открытом исполнении. Сравнения, касающиеся закрытых электродвигателей и особенно, работающих при повторно-кратковременном режиме, до сих пор еще не опубликовывались.

В целях заполнения этого пробела на заводе „Динамо“ был подобран ряд материалов и построены кривые средней разницы нагрева по обоим методам измерения в зависимости от повторно-кратковременного (рис. 3) и кратковременного режимов (рис. 4). На рис. 3 показана разница между измерениями по методу сопротивления (t_w) и методу термометра (t_i), причем средние значения температуры из 10 измерений определены из формулы

$$t_{mitt} = \frac{\sum(t_w - t_i)}{n}$$

где n — число измерений. Значения t_{mitt} определялись для каждого режима работы, т. е. для 10% ED, 34% ED и 66% ED. Температуры обмоток измерялись для якоря на лобовых частях, приблизительно в месте выхода их из железа якоря. На кривой рис. 4 нанесено t_{mitt} в зависимости от кратковременного режима и продолжительности работы 1, 2, 3 1/2, 5 и 8 час.

Распределение температуры обмотки якоря закрытой машины независимо от режима работы (ED или кратко-



Рис. 5.

временный) происходит согласно кривой a рис. 5. Следовательно, самая высокая температура обмотки находится примерно в середине железного пакета и самая низкая температура у лобовых соединений обмотки. Такое распределение температуры обмотки закрытого двигателя объясняется тем, что, во-первых, железо якоря и особенно зубцы якоря сильно нагреты, и, во-вторых, тепло с якорной обмотки отводится через воздух, находящийся в машине, т. е. по пути: лобовые соединения — воздух — стенки крышек — наружная поверхность двигателя. При измерении температуры обмотки методом сопротивления определяется не максимальная, а средняя температура

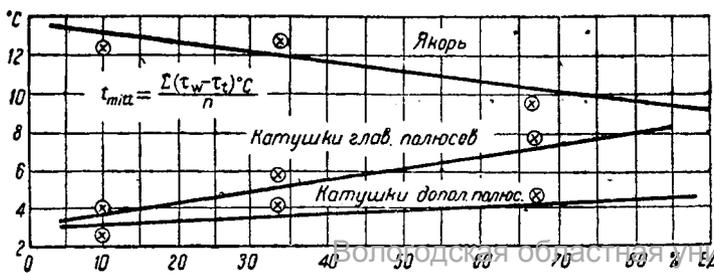


Рис. 3.

от места измерения определяем не температуру меди, а наружную температуру изоляции. На рис. 6 показан перепад тепла через многослойную изоляцию, из которого видно, что разница между внутренней ($t_{в}$) и внешней ($t_{н}$) температурами будет тем больше, чем толще изоляция и чем ниже коэффициент теплопроводности. Кроме того, перепад тепла зависит и от режима работы (длительный, кратковременный).

Из конфигурации кривой a рис. 5 видно, что при одинаковой изоляции разница между температурой измерения методом сопротивления и методом термометра будет зависеть, главным образом, от места установки термометра. Поэтому при измерении методом термометра последний ставится в самые доступные точки наивысшего нагрева.

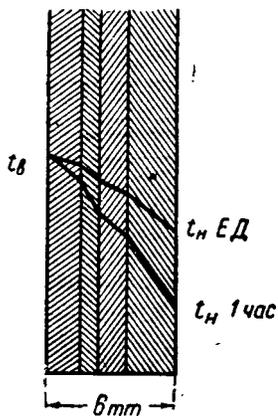


Рис. 6



Рис. 7

Распределение температуры катушки возбуждения закрытой машины показано на рис. 7. Отсчет температуры происходит через закладки термометров (со стороны железа и с внешней стороны).

Из приведенных кривых рис. 3 видно, что с точки зрения использования машины измерение методом термометра дает возможность поднять температуру машины в среднем на 15°C при 25% ЕД.

Как было сказано выше, по американским нормам измерение температуры производится по методу термометра. В табл. 1 даны сравнения перегрева по американским и союзным нормам.

Таблица 1

Сравнение американских и союзных норм перегрева электрических машин кранового и металлургического типов

| Предмет | Тип | Класс 0 | | Класс А | | Класс Б | |
|--|--|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | | Амер. | Союз. | Амер. | Союз. | Амер. | Союз. |
| 1. Обмотка якоря, поля и все остальные обмотки за исключением п. 2 | Все типы кроме вполне закрытых | 35 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| | Вполне закрытые | 40 | — | 55 | — | 75 | — |
| 2. Обмотки с голой неизолированной поверхностью | Все типы кроме закрытых | 45 | 45 | 60 | 60 | 70 | 80 |
| | Вполне закрытые | 45 | — | 60 | — | 80 | — |
| 3. Железо с уложенной в нем обмоткой | Все типы кроме вполне закрытых | 35 | 45 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| | Вполне закрытые | 40 | — | 55 | — | 75 | — |
| 4. Коллектор и контактные кольца | Все типы кроме вполне закрытых | 50 | 60 | 65 | 60 | 85 | 60 |
| | Вполне закрытые | 50 | — | 65 | — | 85 | — |

Сравнение перегрева кранового электродвигателя по американским и союзным нормам

Для примера возьмем двигатель постоянного тока мощностью около 100 kW и $n=520$. По американским нормам двигатель испытывается при часовом режиме; по союзным нормам — при 25% ЕД и продолжительности работ 8 час. Из кривой рис. 2 видно, что двигатель с моментом $190 \cdot 10^{-3}$ при часовом режиме имеет перегрев на 10°C менее, чем при 25% ЕД. Из кривой рис. 3 разница между температурами якоря, измеренными по обоим методам, в среднем составляет около 15°C .

По американским нормам (табл. 1) допустимый перегрев якоря при часовом режиме и измерении методом термометра при изоляции класса Б равен 75°C . Действительный перегрев мотора при измерении по методу сопротивления и работы при 25% ЕД будет $75 + 15 + 10 = 100^{\circ}\text{C}$. Из этой простой арифметики видно, что благодаря применению метода термометра и часового режима вместо 25% ЕД машины по американским нормам на 25°C холоднее, чем та же машина по союзным нормам. Такая же разница получается и по кривой рис. 4.

Заключение

Исходя из сказанного и принимая во внимание, что по условиям эксплуатации двигателей, работающих при повторно-кратковременном режиме на ряде установок, находящихся в эксплуатации в продолжение 8 час. (крановые, подъемные и пр.), на других приводах, наоборот, работают непрерывно (вспомогательные механизмы металлургии и пр.), нормы по испытанию следует формулировать так:

„В машинах для повторно-кратковременной работы испытание начинается в холодном или горячем состоянии. Испытание продолжается не больше 8 час. для тех двигателей, продолжительность работы которых не превышает 8 час. Для двигателей, продолжительность работы которых выше 8 час., испытание продолжается до тех пор, пока не установится конечная температура. Измерение температуры машины производится по истечении половины времени последнего периода работы. Продолжительность одного периода работы с промежутками, т. е. с остановками (или работы без нагрузок), должна составлять 10 мин.“

Дальше в отношении метода измерения союзные нормы следует формулировать так:

„1. Нормы перегрева для электродвигателей, работающих при повторно-кратковременном режиме (крановые, подъемные, на вспомогательных механизмах металлургии), устанавливаются согласно нижеприведенной таблице.

2. Определение температуры производится методом термометра. Этот метод состоит в определении температуры ртутным или спиртовым термометром или термопары, соединяющей возможно самые горячие точки машины с термометром.

3. Испытание машины, работающей при ЕД и продолжительностью работы не более 8 час., начинается с холодного состояния“.

| Предмет | Тип | Класс А | Класс Б |
|--|---------------------|---------|---------|
| 1. Обмотка якоря и обмотка возбуждения | Закрытый и открытый | 60 | 80 |
| 2. Железо с уложенной в нем обмоткой | Закрытый и открытый | 60 | 80 |
| 3. Коллектор и контактные кольца ¹⁾ | Во всех машинах | 65 | 85 |

¹⁾ Класс изоляции коллектора определяется по изоляции лобовых обмоток в месте лап с коллектором

Машины трехфазного тока

Приведенные выше кривые распределения температуры перегрева при повторно-кратковременных режимах и часовом режиме относятся к машинам постоянного тока. В машинах трехфазного тока распределение температуры внутри машины равно как и отдачи тепла через поверхности охлаждения, происходит не так, как в машинах постоянного тока. Разница в теплоотдаче между машинами постоянного и трехфазного тока объясняется тем, что „очаг нагрева“, т. е. наибольшие потери, в машинах трехфазного тока находится в статоре, т. е. ближе к поверхности охлаждения, тогда как „очаг нагрева“ в машинах постоянного тока, как известно, находится в якоре.

Нахождение „очага нагрева“ ближе к поверхности охлаждения в машинах трехфазного тока дает возможность конструктору путем искусственного увеличения поверхности охлаждения поднять мощность двигателя и тем самым изменить соотношение мощности между кратковременным и повторно-кратковременным режимами. На рис. 8 дана зависимость между повторно-кратковременным (ED) и кратковременными режимами (30, 45, 60 и 90 мин.).

Благодаря возможности получить усиленный отвод тепла путем развития наружной поверки конечная температура дости-

гается по истечении 8 час. непрерывной работы (для машин мощностью до 150 kW).

Что касается метода измерения температуры перегрева машины, то сказанное по отношению к машинам постоянного тока относится и к машинам трехфазного тока. Таким образом предложенные нормы можно распространить и на машины трехфазного тока.

4/VII 33 г.

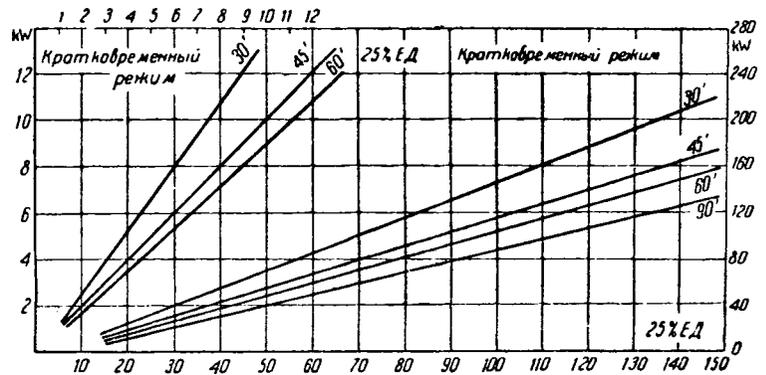


Рис. 8'

ХРОНИКА

Всесоюзный энергетический комитет рабочих, научной и инженерно-технической общественности

Работа Московского изоляционного Бюро в марте 1934 г.

8 марта было проведено совещание по сегнетоэлектрикам. Были заслушаны доклады проф. Н. С. Акулова и А. Н. Алфимова об общей теории сегнетоэлектриков и об открытом ими в лаборатории Института физики новом сегнетоэлектрике, могущем иметь большое применение в электротехнике. В обсуждении приняли участие Ф. А. Квитнер (ВЭИ), В. Т. Ренне (завод „Красная заря“, Ленинград), И. А. Алексеев (Наркомсвязь), Н. В. Александров (ВЭИ) и др.

Совещание приняло следующую резолюцию:

Расширенное совещание Московского изоляционного бюро при ВЭК-РНТО приветствует инициативу НИИФ, поставившего весьма интересную работу по сегнетоэлектрикам. Особая ценность работы заключается в том, что лаборатория проф. Акулова при изыскании новых сегнетоэлектриков исходила из определенных теоретических предположений, которые увенчались успехом, и был найден новый сегнетоэлектрик, свойства которого дают возможность предполагать возможность его практического применения в электротехнике, в то время как прежние исследователи не могли обнаружить других сегнетоэлектриков кроме известной ранее сегнетовой соли. Совещание считает, что необходимо дальнейшее продолжение работы как теоретическое, так и прикладное, главным образом, с двух сторон — для применения в конденсаторах связи и в конденсаторах для улучшения косинуса фи. Войти в НКС связь и в НКТП с ходатайством о выделении средств для обеспечения финансирования работ. Связать работу

с лабораторией завода „Красная заря“ и с другими предприятиями электропромышленности, оставив теоретическое руководство всей работой за лабораторией проф. Акулова. Принять меры к патентованию работы. Московскому изоляционному бюро взять вопрос под особое наблюдение.

20 марта проведено совещание по применению плавящихся горных пород (диабаз, базальт и др.) в электротехнике. Совещание заслушало доклады Я. О. Борухина (I Московский камнелитейный завод), Н. В. Гурьева (Институт прикладной минералогии), т. Осипова (Ленинградский филиал института Прикладной минералогии), т. Черныка (Институт стекла); в прениях высказывались П. В. Оленин и И. А. Алексеев. Выяснено, что в вопросе об использовании плавящихся горных пород в качестве диэлектриков имеется еще много неясного. Совещание отметило большую важность вопроса и отсутствие согласованности в работах отдельных предприятий и научно-исследовательских институтов и наметило докладчиков на III Всесоюзную конференцию по изоляционным материалам, которой поручается решение вопросов упорядочения организации.

Помимо названных совещаний проводилась работа по подготовке III Всесоюзной конференции, организована бригада для обследования опытной станции по новым пластмассам из дерева „Нилос-баркалаит“. Реорганизована магнитно-проводниковая секция бюро, ученым секретарем которой избран зав. магнитной лабораторией завода „Динамо“ П. П. Храмов.

Ученый секретарь бюро инж. Б. М. Тареев

Ленинградский электрофизический Институт (Лэфи)

Новые конструкции качающихся выпускающих и антивибрационных зажимов для линий электропередач

Стремление к удешевлению строительной части линий электропередач и освобождения от импорта арматуры заставило разработать новые оригинальные конструкции выпускающих зажимов для применения на линиях передачи Союза.

Группой исследования конструкций линии передач предложен для массового производства качающийся выпускающий зажим типа ЛЭФИ-2 (рис. 1). Зажим состоит из двух основных деталей: лодочки и подвески. Принцип работы зажима заключается в следующем:

В спокойном состоянии лодочка опирается на пальцы

Работы по исследованию вибрации проводов

Проводимая группой исследования конструкций линий передач работа по исследованию вибрации проводов линий передач имеет конечной целью дать способы, предохраняющие провод от повреждений, вызываемых вибрацией.

Для записи вибраций группой были запроектированы и построены вибрографы двух типов: 1) виброграф кратковременной записи и 2) виброграф длительной записи.

Виброграф кратковременной записи предназначен для записи кривой вибраций данной точки провода, по которой можно определить амплитуду, частоту и характер вибрации.

Рычажок вибрографа C_1 , соединенный с проводом посредством специального поводка, записывает отклонение провода на вращающемся диске. Приводным механизмом для вращения

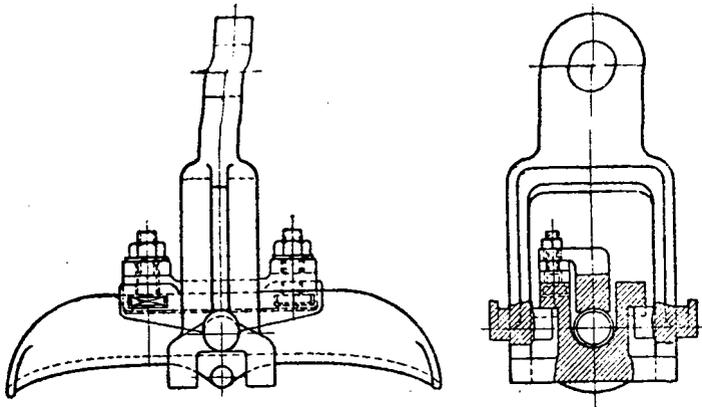


Рис. 1

в вертикальной плоскости. При обрыве провода гирлянда отклоняется, и лодочка поворачивается на пальцах подвески на угол, предусмотренный конструкцией для свободных колебаний. В дальнейшем пальцы лодочки упираются в развилку подвески, и образовавшаяся пара сил приподнимает лодочку, которая под действием тяжения провода выскальзывает из подвески. Выпускающий зажим имеет специальные приливы для подвески ловителя, назначение которого удержать провод от падения на землю или на конструкцию опоры.

Пробные экземпляры зажимов испытывались на опытной линии ЛЭФИ и показали хорошие результаты.

Дальнейшая работа над конструкцией выпускающего зажима привела к разработке нового типа — антивибрационного выпускающего зажима ЛЭФИ-5 (рис. 2).

У данной конструкции лодочка имеет возможность колебаться в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, что является преимуществом этого типа зажима, так как вибрации проводов на линии колебания не всегда возникают в вертикальной плоскости. Осуществление этих колебаний достигается следующим образом:

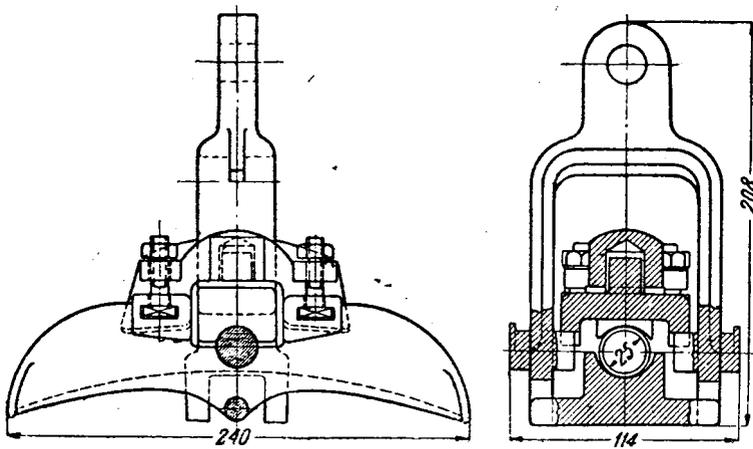


Рис. 2

Лодочка, несущая провод, скреплена болтами с продольной накладкой, сидящей на вертикальном пальце поперечной накладки, опирающейся на пальцы подвески. Это устройство даст возможность лодочке качаться в вертикальной плоскости вместе с продольной накладкой на угол $\pm 15^\circ$ и поворачиваться в горизонтальной плоскости на угол $\pm 5^\circ$. При обрыве провода зажим работает, как выпускающий по принципу действия, аналогичному с зажимом ЛЭФИ-2.

В настоящее время изготавливаются пробные экземпляры зажимов, которые будут подвергнуты детальным исследованиям. Выпускающие зажимы ЛЭФИ-2 приняты и изготовлены на заводах Союза. Группой уже получены контрольные образцы для периодических испытаний.

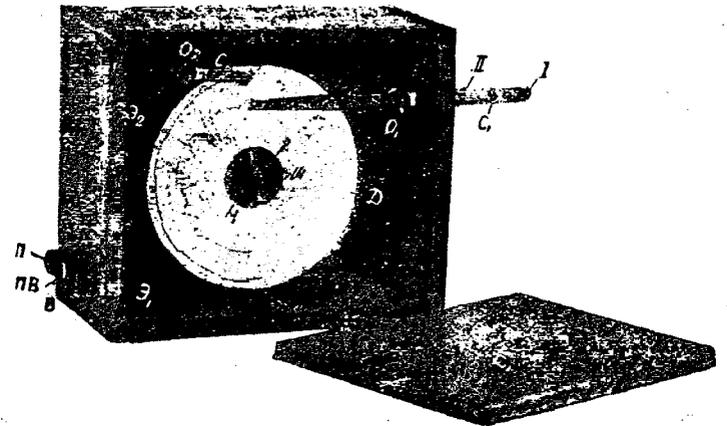


Рис. 1

диска D служит ключ для селекторного вызова, имеющий центробежный регулятор и сообщающий диску I оборот в течение 7 сек. При выбранных размерах окружная скорость под пером равна 40 mm/sec. Наибольшая возможная для записи амплитуда равна 20 mm. Пуск вибрографа производится включением электромагнита, освобождающего собачку, удерживающую механизм от вращения после завода. Концы электромагнита выведены на зажимы II .

Для регистрации времени одновременно на нескольких вибрографах служит стрелка C_2 , качающаяся под действием электромагнита, концы которого выведены на зажимы B , включаемого в цепь метронома, замыкающего контакты. Виброграф собран в деревянном ящике размера 235×200×100 mm и имеет вес 2,35 kg.

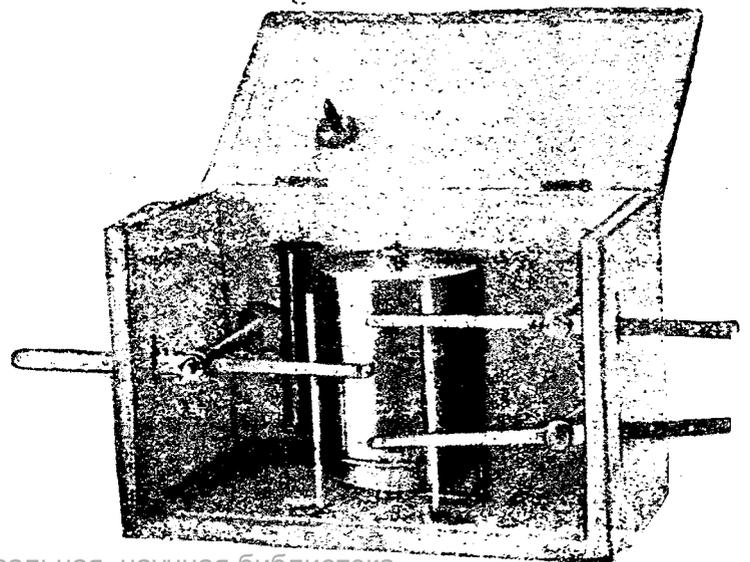


Рис. 2

Виброграф длительной записи предназначается для регистрации наличия вибрации на линии в течение суток, записывая амплитуды вибрации.

Виброграф имеет три стрелки, дающие возможность одновременной записи вибрации провода и зажима. Запись производится на ленте, наматываемой на барабан, дающий один оборот в сутки и приводимый часовым механизмом с восьмисуточным заводом. Окружная скорость бумаги под пером 12 мм/ч. Наибольшая записываемая амплитуда при

работе трех стрелок — 15 мм. При работе одной стрелкой — 50 мм.

Весь виброграф смонтирован в деревянном ящике размером 265×180×145 мм и имеет вес 35 кг.

Для искусственного возбуждения вибраций провода группой построена вибрационная машина, установленная на опытной участке линии. Вибрационная машина может сообщать проводу вибрации амплитудой от 0 до 40 мм и частотой от 0 до 40 пер/сек.

К. Тимофеев

БИБЛИОГРАФИЯ

За широкий обмен научно-техническим опытом

„Ежемесячный научно-технический бюллетень ВЭИ“. Отв. редактор акад. К. И. Шенфер. Редколлегия: проф. Б. А. Введенский, проф. А. Н. Ларионов, проф. С. О. Майзель, инж. В. Г. Прелков, проф. Л. И. Сиротинский, № 1, 1934., изд. ВЭИ, тираж 500.

В обращении „От редакции“ вновь вышедшего „Бюллетеня ВЭИ“ № 1 создание этого бюллетеня мотивируется „настоятельной необходимостью иметь такую форму технического общения между предприятием и исследовательским институтом, которая бы позволяла быстро проводить технические предложения и запросы между ними“.

Редакция своей первой задачей ставит организовать через „Бюллетень“ „нормальный порядок быстрого обмена техническим опытом между предприятиями, производящими электрооборудование, и предприятиями, где оно эксплуатируется“. Следующей основной задачей редакция „Бюллетеня“ считает организацию применения „в практике электрификации производства новых технических идей, новых типов машин и аппаратов, новых схем и т. п., которые возникают и разрабатываются в институте“.

В первом номере „Бюллетеня“ редакция уже приступила к реализации поставленных выше задач.

В разделе „Техника высоких напряжений“ среди ряда статей и сообщений следует отметить интересную статью С. А. Лебедева, „Влияние регуляторов паровых турбин на устойчивость параллельной работы“. Статья представляет собой основные итоги работы лаборатории высоковольтных сетей за 1933 г. по темам „поведение машин при выпадении из синхронизма“, „опыты по устойчивости в системе Ленэнерго“, „аварийное регулирование паровых турбин“.

В статье С. А. Лебедева отмечается, что „Исключительно широко поставленные в 1930—1931 гг. опыты в германских и американских объединениях показали, что во многих случаях имеется возможность восстановления синхронной работы без отключения выпавшей машины от сети вследствие соответствующего действия регуляторов турбины. Такие случаи в практике эксплуатации нередко проходят бесследно, так как персонал щита или машинного зала не в состоянии установить факт выпадения из синхронизма. Поэтому некоторые американские инженеры склонны считать, что нарушения устойчивости происходят чаще, чем это показывает статистика. Естественно, конечно, что непосредственная синхронизация машины без отключения от сети представляет большой практический интерес, поскольку это приводит к быстрейшей ликвидации аварии и в значительной мере смягчает последствие нарушения устойчивости“.

Далее автор описывает протекание процессов при выпадении из синхронизма, определяет условия, при которых возможна непосредственная синхронизация от руки путем уменьшения пуска пара в турбину (что эквивалентно переносу характеристики регулятора, примерно параллельно самой себе) и дает количественный анализ возможности непосредственной синхронизации.

Автор сообщает, что синхронизация генератора путем уменьшения пуска пара от руки проверена в опытах лаборатории в системе Ленэнерго с генератором 16,7 MVA.

„Генератор работал с низким возбуждением при значительной нагрузке. Внезапным выключением внешнего реактанта были вызваны качания. Машина первоначально осталась в синхронизме и выпала лишь на пятнадцатой секунде в связи с затуханием токов, наводимых в роторе. Таким образом выпадение носило характер статического нарушения устойчивости с характерным чередованием циклов синхронной и несинхронной работы. Вслед за выпадением из синхронизма дежурный машинист по сигналу закрыл регулирующие клапаны, чем был избежит уже второй цикл несинхронной работы. В дальнейшем машина продолжала работать синхронно“.

Говоря о задачах аварийного регулирования турбин и анализируя его, автор указывает на необходимость в целях получения существенного эффекта прибегать к специальным аварийным регуляторам и в заключение характеризует выбор критерия для такого регулирования.

Интересно также сообщение Д. Городского, „Стол для расчета токов короткого замыкания отдела высоких напряжений ВЭИ“. Автор кратко описывает три разработанных под его руководством основных модели столов (их сделано более двадцати). Из этих моделей третья, к выполнению которой будет приступлено в 1934 г., будет иметь 75 элементов, более удобное для производства и для работы на нем расположение деталей и несколько иную, более простую и рациональную схему соединения собранных панелей.

Автор сравнивает этот стол с американским, имеющимся в единственном экземпляре в СССР в Ленэнерго. Американский стол имеет 140 элементов и сконструирован весьма компактно. „Но конструкция его значительно сложнее; чем у стола ВЭИ, что не могло не отразиться на его стоимости, достигающей 20 000 долл., тогда как столы ВЭИ стоят всего около 7 000 руб. Что же касается точности, то как американский стол, так и столы ВЭИ представляются равноценными. Точность эта порядка $\pm 2\%$ “.

В этом же разделе помещены заметки Е. Г. Марквардта, „Новые трансформаторы напряжения“, С. А. Назарова, „Перенапряжения в реакторах при авариях и мероприятия, по защите от них“, А. Дубинина и Р. Кулакова, „Высоковольтные предохранители на 35 и 110 kV“.

Раздел „Электрические аппараты“ посвящен вопросам: „Телеметрические системы ВЭИ“ (А. В. Михайлов), „Фотореле прямого действия, работающее от прерывания светового луча“ (А. В. Михайлов и Н. В. Олехнович), — тема представляющая актуальный интерес для металлургии, где этот тип реле может быть применен в целях автоматизации ряда процессов проката, и „Фотометр“ для фотометрирования разноцветных источников света (проф. С. О. Майзель).

Третий, более обширный, раздел посвящен электротехническим материалам. Особенно заслуживают внимания заметки, посвященные изоляционным материалам — это:

проф. Б. В. Максорова, „Новые сырьевые источники для электроизолирующих лаков“, И. Мачина, „Плавленное дерево как изоляционный материал“ (с таблицей испытаний свойств плавленного дерева, представляющего собой спрессованные сильным гидравлическим давлением и термически обработанные древесные опилки). Ф. А. Квитнер, „Испытание изолирующих материалов на устойчивость против поверхностных разрядов“, а также Ф. А. Квитнера и Д. Н. Жохова, „Определение впитывающей способности бумаги и картона“.

Весьма ценные практические указания содержатся в заметке С. Т. Назарова, „Рентгеновский метод испытания сварных изделий“. Автор достаточно подробно характеризует рентгеновский метод просвечивания сварных изделий, говоря, что он является „единственным методом испытания сварных швов без разрушения, который можно считать на сегодняшний день имеющим серьезнейшее практическое значение“.

Из упомянутого выше материала видно, какой облик будет носить „Бюллетень ВЭИ“, ставящий задачу, как уже сказано, наладить обмен научно-техническим опытом и давать сжатую информацию о новых технических идеях и практическом их применении. „Бюллетень“ не имеет в виду дублировать такие журналы, как „Электричество“, „Электрические станции“ и др., и должен будет занять особое место в системе советской электроэнергетической периодической печати, как, главным образом, орган краткой научно-технической информации в пределах круга исследований, которыми занимается ВЭИ.

В связи с этим следует, безусловно, приветствовать создание „Бюллетеня ВЭИ“.

Инж. Я. А. Климовицкий

В. МАНГОЛЬДТ, Экономическая компановка городских сетей трехфазного тока. Изд. Ю. Шпрингера, Берлин, 1933 г., 76 стр., 22 рисунка, цена 5.50 марок.

За последнее время в германской технической литературе наблюдается повышенный интерес к вопросам проектирования и экономики городских электрических сетей. „Вслед за вышедшей в 1932 г. книгой W Speidel'я, „Экономическое распределение энергии в кабельных сетях трехфазного тока“ появляется рецензируемая здесь работа, посвященная тому же самому вопросу. Причины столь пристального внимания к той области электротехники, которая, как вполне сложившаяся, до последнего времени оставалась в тени, вполне понятны: с одной стороны, увеличение мощности и протяженности городских сетей, идущее в ногу с ростом электрификации населенных мест, потребовало пересмотра системы распределения энергии и конфигурации сетей, а также потребовало новых форм их защиты от сверхтоков и коротких замыканий, в связи с повышением надежности; с другой стороны продолжающийся экономический кризис заставил технические круги заняться вопросами более рационального использования существующих сетей и создания новых методов их проектирования в целях максимального снижения капиталовложений в вновь оборудуемые установки. Последний вопрос с большой остротой уже возникал на II Всемирной энергетической конференции в Берлине в июне 1930 г. и постановка его делается вполне понятной, если учесть те огромные средства и материальные ресурсы, которые до сих пор приходилось затрачивать на устройство сетей населенных мест. Недаром Mangoldt в предисловии к своей работе подчеркивает, что „из общей суммы расходов по оборудованию системы электроснабжения крупного города около двух третей приходится на устройство сети и только около одной трети — на самую генераторную станцию“.

Так как повышенные требования к надежности электроснабжения обусловили возникновение в новейшее время несколько новых форм сетей — в том числе и так называемой „сети“, то автор поставил себе задачу: сравнить в техническом и в экономическом отношении все эти системы сетей и электроснабжения и наметить границы для их рационального применения.

Решение этой задачи потребовало рассмотрения в отдельности с техно-экономической точки зрения таких вопросов как: определение сечения кабелей, выбор наиболее выгодного напряжения для низковольтной и высоковольтной сети, установление количества и мощности трансформаторных подстанций и т. п. При составлении своей работы автор в широкой мере использовал обширный материал и опыт отдела проектирования сетей фирмы Сименс-Шуккерт, сотрудником которой он является. Это обстоятельство чрезвычайно выгодно сказалось на форме изложения книги и на насыщенности ее содержанием, несмотря на кажущийся незначительным объем (76 страниц), автору удалось уместить весьма богатый и ценный материал, и притом на всем протяжении книги автор оперирует с так сказать „живыми“ цифрами и формулами, заимствованными из повседневной практики проектирования. Получаемые выводы снова проверяются на примерах из практики.

Общее направление книги Mangoldt также заслуживает быть отмеченным, как указывает сам автор в вступительной главе, он стремился не только к тому, чтобы дать руководство для соответствующих подсчетов, но, главным образом, к тому, чтобы надлежащим подбором цифровых показателей дать широкий охват основных величин, определяющих собой структуру сети. Благодаря этой тенденции книга Mangoldt'a позволяет при перенесении ее выводов на практику значительно облегчить проектирование систем электроснабжения населенных мест. В частности, в каждом отдельном случае становится возможным уже в начале проектирования многие вопросы решать *a priori*, сосредоточивая внимание лишь на деталях, естественным образом на охваченных книгой Mangoldt'a.

Содержание книги Mangoldt'a может быть охарактеризовано перечнем важнейших ее глав: 1) Конфигурации сетей и их развитие; 2) Техно-экономические основы структуры сетей. В этой главе рассматриваются такие важнейшие вопросы, как экономическое сечение кабелей, выбор наиболее выгодного напряжения для сетей высокого и низкого напряжений, величина трансформаторных подстанций и их размещение в сети.

Интересно отметить, что в вопросе о выборе напряжения для низковольтной сети Mangoldt решительным образом высказывается в пользу системы 380/220 V, обладающей наибольшими технико-экономическими преимуществами. Главную причину удешевления сетей при 380/220 V Mangoldt видит в получающемся при этом укрупнении трансформаторных подстанций по сравнению с мощностью таковых при более низких напряжениях 220 и 110 V. И хотя суммарная установленная мощность при всех трех напряжениях, по крайней мере — теоретически, остается постоянной, наиболее дешевой оказывается установка 380/220 V, так как удельный расход на 1 kVA подстанции весьма резко возрастает с понижением ее мощности. Особенно наглядно это представлено на кривых рис. 6 и 7 книги Mangoldt'a. В итоге автор делает вывод о том, что „испытанное применение четырехпроводной системы 380/220 общей для освещения и силовой нагрузки, отвечает предшествующей европейской практике, и потому система 380/220 V должна рассматриваться, как наиболее подходящая и для будущего времени“. После такого вывода автор ограничивает все свои дальнейшие расчеты исключительно напряжением 380/220 V и низковольтной сети, не рассматривая совершенно иных напряжений.

В третьей главе автор переходит к технико-экономическому сравнению сетей с тремя и с двумя напряжениями и притом при различной конфигурации и их — кольцевой и лучевой. Все характерные показатели здесь выводятся в функции плотности нагрузки, причем для небольших и средних городов автор отдает предпочтение системам с двумя напряжениями, отводя системам с тремя напряжениями область самых крупных городов. Во всех вариантах обнаруживается неоспоримое технико-экономическое превосходство новейшей системы сети, заимствованной из САСШ, именно — „сетки“ жесткими узлами.

Богатство содержания книги Mangoldt и высоко-квалифицированная и вполне современная трактовка рассматриваемых в ней вопросов заставляют считать перевод ее на русский язык весьма желательным.

Инж. Л. Б. Гейлер.

В. Т. РЕННЕ и К. Б. КАРАНДЕЕВ, „Электротехнические материалы техники слабого тока“, КУБУЧ, 1933, Ленинград, стр. 272, Тираж 3 200, цена 4 р. 50 к.

Книга В. Т. Ренне и К. В. Карандеева является первым трудом, детально освещающим электротехнические материалы техники слабого тока, если не считать вышедшей ранее небольшой брошюры А. А. Лапис, „Детали радиопередающих устройств“, качество которой определено нашими предыдущими рецензиями.

Материал книги разделен на две части: I. Электроизолирующие материалы или диэлектрики и II. Магнитные и проводниковые материалы.

Каждая часть содержит в себе помимо описания свойств определенных материалов методику их испытаний и физическую картину поведения материала в различных условиях. Здесь можно указать, что теория диэлектрических потерь авторами описана по Вагнеру, а ввиду того что книга предназначена и для радиоспециалистов, то необходимо было дать обзор теории потерь Дебая.

Дело в том, что в области силовых частот (50 Hz) мы имеем согласие теории Вагнера с опытными данными, но при радиочастотах такого совпадения уже нет. Наоборот, опыты хорошо согласуются с теорией Дебая. Это нужно особо отметить по той причине, что диэлектрические потери до сих пор являются для большинства специалистов, не материаловеда, очень „узким местом“.

На стр. 5 удельное поверхностное сопротивление измеряется в омсантиметрах (повидимому, здесь опечатка, так как в других местах книги дана правильная единица). Неудобно говорить „увеличение температуры от 20 до 90°C, т. е. в 4 раза“ (стр. 12). На диаграмме рис. 18 (стр. 21) отсутствует вектор тока омической проводимости. Необосновано требование того, чтобы расстояние между средним электродом и охранным кольцом при измерении удельного сопротивления было больше толщины образца (стр. 30). Как автор „ухитрился“ измерять поверхностное сопротивление „без охранного кольца“ (стр. 32)?

На стр. 50 авторы указывают на статические и электростатические вольтметры, когда всем и всюду известно, что такого разделения не существует.

Далее необходимо было отметить, чего не сделано, что пробойное напряжение при градуировке с помощью стандартных шаровых разрядников сильно зависит от давления и влажности воздуха.

Совсем слабо написан § 25 (о вязкости). Неточно дано определение абсолютной (динамической) вязкости; нет определения кинематической вязкости. Фраза „Так как абсолютная вязкость воды при 20°C равна 0,01004, то с достаточной для целей практики точностью можно считать, что удельная вязкость в 100 раз больше относительной“ — явная описка; надо считать „в 100 раз больше абсолютной“, но и

это будет неверно, так как удельную вязкость принято относить к абсолютной вязкости воды при 0°, а не при 20°, а надо иметь в виду, что абсолютная вязкость воды при переходе от 20° к 0° увеличивается почти в 2 раза. Формула Уббеллоде приведена с неточными значениями коэффициентов; она дает вовсе не удельную вязкость, а динамическую вязкость, и притом не в абсолютных единицах (паузах), о которых автор говорил ранее, а в сантипаузах.

Содержание серы и сернистых соединений в целом ряде „доброкачественных“ изолирующих материалов (резина, эбонит, чистая сера) вполне закономерно (стр. 86).

Микрометры, как известно, обладают точностью не 0,001 mm (стр. 92), а только 0,01 mm.

Замечание о том, что гигроскопичность фибры (стр. 101) зависит от ее толщины, является чересчур невразумительным, ибо это есть не свойство материала, в данном случае фибры, а неточность, вернее просто ошибочность методики. Кстати, в гл. III § 21 о гигроскопичности следовало бы остановиться на частых ошибках определения гигроскопичности.

Несколько странно отнести механическую прочность лакокрасочных слоев к сечению в см² (стр. 138) и нужно было отметить в направлении утка или основы существует такая прочность.

При обработке целлюлозы спиртами эфиры не получают (стр. 155). Формула C₅H₈ для каучука (стр. 162) не содержит указания на его высокомолекулярность, в то время как состав целлюлозы на стр. 87 дан правильно в форме полимера (C₆H₁₀O₅).

Примесь глета к резиновой смеси при вулканизации дает не белую окраску (стр. 163), а черную.

Реки Мама и Чупа не являются притоками Лены. Чупа находится примерно на расстоянии 7 000 km от Лены. Мусковит на Мурмане не добывается (стр. 187). Правда, ошибка эта свойственна почти всем авторам, употребляющим слово „слюда“.

Алюминий добывается электролизом расплавленного глинозема, как верно сказано на стр. 256, строчки 14—15, но отнюдь не „исключительно путем электролиза расплавленных естественных солей“ (строчка 5 той же страницы.). На той же странице указание на то, что „всех прочих металлов“ (кроме железа и алюминия) в земной коре около 1%, совсем не верно (достаточно вспомнить о таких металлах, как кальций, натрий и калий).

В обзоре развития теории магнитных материалов (стр. 206) авторами не указан Вейс — создатель теории магнетонов, не отмечены наряду с Эйнштейном и Гаазом, Н. Бор и М. Планк.

Неверно, что алмаз по электрическим свойствам не уступает алюминию (стр. 257).

В заключение можно указать на положительные качества книги: 1. Довольно полное освещение методики испытания и свойств материалов. 2. Подробное описание наших отечественных материалов. 3. Хорошее, простое и ясное изложение.

Об оформлении книги приходится пожалеть; ибо литографированное издание весьма плохо выглядит, неудобно для чтения и утомляет пользующегося книгой. Следует надеяться, что книга выйдет следующим изданием в печатном виде.

Инж В. А. Баев и инж. Б. М. Тареев.

ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ

Письмо в редакцию журнала „Электричество“

Мы ознакомились с интересной статьей инженеров Л. Е. Машкиллейсон и проф. Г. Т. Третьяк и в дополнение к ней сообщаем вам следующее:

С самого начала разработки конструкции высоковольтных экспансионных выключателей Акц. о-во Сименс-Шуккерт уже руководствовалось мыслями, высказанными в вышеупомянутой статье о последовательном соединении низковольтных

выключателей для получения высоковольтного, и как видно из прилагаемой фотографии и статьи д-ра инж. Кессельринга¹⁾ наш экспансионный выключатель на 220 kV построен по этому принципу.

Общая высота выключателя 5 м. Вес трехполюсного выключателя 18 т, причем количество жидкости для гашения

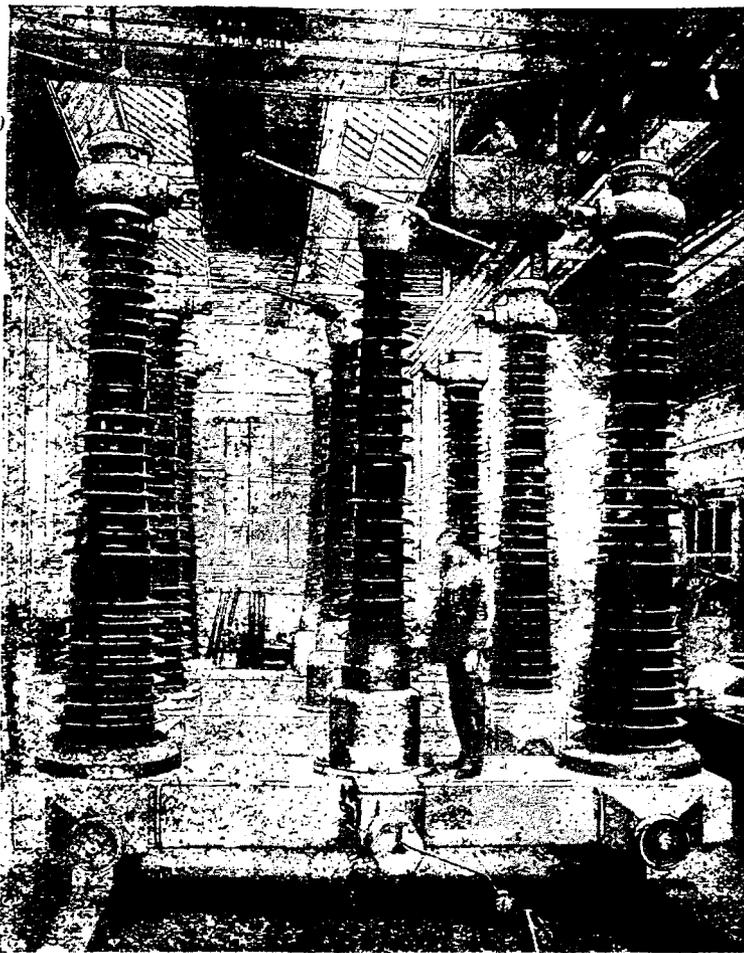


Рис. 1. Экспансионный выключатель 220 kV, 600 А для открытых установок с пневматическим приводом.

дуги не превышает 350 kg. Выключасмый ток, соответственно отключаемой мощности в 3 000 MVA, равен 8 000 А.

Дальнейшее развитие экспансионных выключателей и переход к напряжению в 380 kV не представляет никаких трудностей и такой выключатель может быть построен, как только в нем окажется надобность, так как в противоположность к масляным выключателям размеры экспансионных выключателей растут только пропорционально напряжению.

С совершенным почтением
Сименс-Шуккерт РОДЭ

Электромашиностроение

R. POHL, Процессы при коротком замыкании синхронного генератора, „ETZ“ № 6, 1933, стр. 127—130.

Автор рассматривает внезапное короткое замыкание на примере синхронного генератора с цилиндрическим ротором, имеющего одинаковые двухфазные обмотки на статоре и на роторе. Исходя из физических представлений, автор разбирает расщепление потока в межжелезном пространстве на поток, связанный с обмоткой статора, и на поток, связанный с обмоткой ротора, и появление в связи с этим постоянной и переменной составляющих тока. В конце статьи автор останавливается на реактивностях и приводит введенное в американской литературе деление реактивности на мгновенную и переходную. Под синхронной реактивностью в американской литературе (а также в AIEE Standards) понимается реактивность, соответствующая ненасыщенной машине, т. е. величина отношения номинальной э. д. с. E_n к величине установившегося тока короткого замыкания i_{sn} при возбуждении, соответствующем э. д. с. E_n , отложенной на прямой части характеристики холостого хода (рис. 1): $x = \frac{E_n}{i_{sn}}$. Эта величина

постоянна для данной машины. Действительное значение установившегося тока короткого замыкания при возбуждении, соответствующем номинальной э. д. с. при холостом ходе, всегда больше, чем определяется по вышеприведенному значению синхронной реактивности. Оно может быть определено по величине приведенной синхронной реактивности (в тексте — *verminderte Synchroreaktanz*), которая равна отношению номинальной э. д. с. E_n к величине установившегося тока короткого замыкания i_{sn} при возбуждении, соответствующем E_n на характеристике холостого хода с учетом насыщения

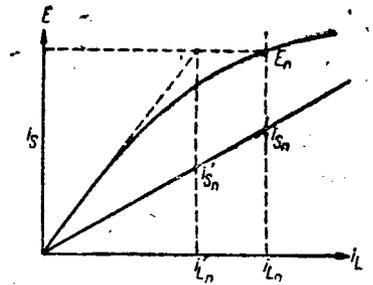


Рис. 1.

(рис. 1): $x = \frac{E_n}{i_{sn}}$. Приведенная синхронная реактивность не является постоянной для данной машины, а изменяется с изменением тока возбуждения.

В. И. Иванов

Новый метод расчета электрических цепей, „Electrical Engineering“, 1933, ноябрь

Авторы называют предлагаемый ими метод методом коротких замыканий (*short-circuit current solution*). Метод применим как для цепей постоянного, так и переменного тока, а также для радиочепей. Метод коротких замыканий особенно удобен в применении к цепям, содержащим два или более источников тока, работающих параллельно на внешнюю нагрузку.

Этот метод состоит в определении совершенно фиктивных токов короткого замыкания, получающихся в результате замыкания источников э. д. с. на их собственные импедансы. Все определенные токи короткого замыкания суммируются

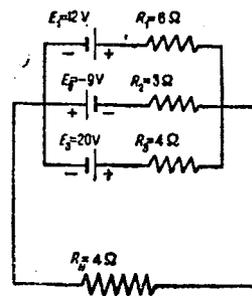


Рис. 1.

векторно, и полный ток короткого замыкания умножается на эквивалентный импеданс параллельных ветвей цепи (включая и ветвь нагрузки). Результат дает эффективное напряжение на цепи, и тогда просто получить ток в каждой ветви делением этого напряжения и э. д. с. в данной ветви на сопротивление ветви.

Рассмотрим для примера схему, приведенную на рисунке. Три источника постоянного тока соединены, как показано на схеме. Указаны их

внутренние сопротивления и дана нагрузка (в омах).

Решаем согласно методу коротких замыканий:

$$I_{1s} = \frac{E_1}{R_1} = \frac{12}{6} = +2 \text{ А,}$$

$$I_{2s} = \frac{E_2}{R_2} = -\frac{9}{3} = -3 \text{ А,}$$

$$I_{3s} = \frac{E_3}{R_3} = \frac{20}{4} = +5 \text{ А.}$$

Полный ток короткого замыкания равен

$$I_s = I_{1s} + I_{2s} + I_{3s} = 2 - 3 + 5 = +4 \text{ А.}$$

Эквивалентное сопротивление четырех параллельных ветвей равно

$$R_s = 1 \Omega.$$

Падение напряжения во всей цепи составляет

$$E = (I_{1s} + I_{2s} + I_{3s}) R_s = 4 \text{ В.}$$

Отсюда определяются токи в отдельных ветвях:

$$I_H = \frac{E}{R_H} = \frac{4}{4} = 1 \text{ A};$$

$$I_1 = \frac{E_1 - E}{R_1} = \frac{12 - 4}{6} = 1\frac{1}{3} \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{E_2 - E}{R_2} = \frac{-9 - 4}{3} = -4\frac{1}{3} \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{E_3 - E}{R_3} = \frac{20 - 4}{4} = +4 \text{ A}.$$

В статье приводится также пример расчета для цепи переменного тока. Авторы указывают, что этот метод дает в ряде случаев, подобных приведенному, значительную экономию времени по сравнению с общим методом Кирхгофа.

Инж. В. Матюхин

Техника высокого напряжения и линии электропередач

Г. VOERSTE, Изменение формы волн перенапряжений от короны „ETZ“ № 19, 1933

В статье дается описание изменения формы блуждающих волн на линиях передачи благодаря короне. Все опыты подтверждены осциллограммами. Автор применял для исследования волны, имеющие начальное напряжение, в несколько раз

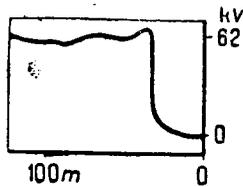


Рис. 1. Практически бесконечно длинная волна.

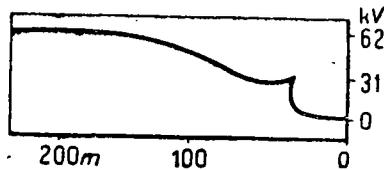


Рис. 2. Волна рис. 1 через 140 м после движения ($U = U_c$)

большее, чем коронное напряжение линии передачи. Провода для опытной линии передачи были взяты двух размеров: диаметром 0,2 мм и 0,4 мм. Во избежание воздействия внешних условий они подвешивались в высоковольтном зале Дрезденского технического училища. Места подвеса проводов автором были выполнены таким образом, что он считает их практически беземкостными. Это делалось для того, чтобы избежать явления сглаживания фронта волны от емкости изоляторов. Длина линии передачи могла изменяться в широких пределах, при-

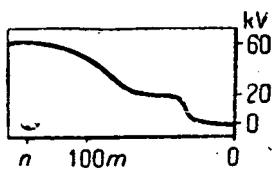


Рис. 3. Волна рис. 1 через 140 м после движения ($U = 3U_c$)

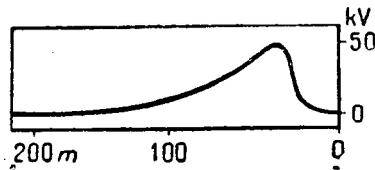


Рис. 4. Волна, типичная для грозных разрядов

чем достаточно быстро. Импульсные волны для исследований были применены двух видов: 1) волны с практически бесконечно длинным хвостом (рис. 1) и 2) волны, типичные для грозных разрядов (рис. 4). Результаты исследований с волнами первого вида получились следующие: на рис. 2 показана волна через 140 м после ее движения. Начальная волна имела напряжение $U = 2U_c$ (где U_c — коронное напряжение линии передачи). На рис. 3 показана волна тоже через 140 м после ее движения, но начальная волна была взята напряжением $U = 3U_c$.

Как видно из рис. 2 и 3, часть волны, находящаяся ниже коронного напряжения линии передачи, не изменяет своей

формы. Та часть волны, которая обладает напряжением, значительно большим, чем коронное напряжение, сильно изменяет свою форму. Благодаря затрате энергии на образование короны происходит снижение напряжения волны до коронного напряжения. Далее волна имеет опять повышенное напряжение. Это явление автор объясняет тем, что часть волны, лежащая выше коронного напряжения, распространяется медленнее, чем нижняя часть волны. Автор указывает, что в зависимости от величины волны перенапряжения для верхней части волны, лежащей выше коронного напряжения, скорость составляет от 50 до 70% скорости волны, лежащей ниже коронного напряжения.

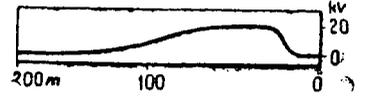


Рис. 5. Волна рис. 4 через 140 м после движения

При опытах с волнами, типичными для грозных разрядов, получились следующие результаты. На рис. 5 показана волна через 140 м после ее движения. Начальная волна имела вид, показанный на рис. 4. Из рис. 5 ясно видно, что волна через 140 м имеет напряжение, не превосходящее коронного, в то время как начальное напряжение было в несколько раз больше коронного. Таким образом часть волны, лежащая выше коронного напряжения, затухает гораздо быстрее, чем остальная. Автор приходит к выводу, что потери на корону значительно снижают напряжения волны, причем на сравнительно коротком участке линии передачи волна затухает до напряжения, равного коронному напряжению. Для полного затухания волны необходимая длина пробега ее приблизительно пропорциональна квадрату отношения $\frac{U}{U_c}$. Далее автор указывает, что для исследования волн с напряжением выше коронного необходимо различать две области: 1) до коронного напряжения линии передачи, 2) выше коронного напряжения. Кроме того, нельзя говорить только о затухании волн, необходимо считать также с изменением их формы.

Инж. К. И. Пятман

Г. МААГ, Аварии от гололеда и ветра на высокогорной линии передачи.

Доклад на мировой конференции по высоким напряжениям.

Автор описывает аварии от атмосферных осадков, наблюдавшиеся на 35-kV высокогорной линии передачи Puerto Nuevo-Segovia в Испании. Эта линия передачи особо подвержена воздействию гололеда и ветра на участке длиной примерно 6 км. Линия передачи трехфазная с проводами из алдрея сечением 70 мм², расположенными горизонтально. Кроме рабочих проводов высокого напряжения на тех же самых опорах были подвешены два стальных телефонных провода сечением каждый 20 мм² и сопротивлением на разрыв 80 кг/мм². Опоры линии передачи металлические, рассчитаны были на давление ветра в 125 кг/м². Пролет между опорами составил в среднем 170 м. При пересечении горного хребта Sierra de Guadarrama линия передачи проходит на высоте 1600 м над уровнем моря. В этой части линии передачи в декабре месяце 1930 г. при температуре — 25°C и густом тумане на проводах выпал гололед диаметром 28 см, и, таким образом, нагрузка на каждый метр провода оказалась равной 15 кг. Решетка опор настолько покрылась гололедом, что поверхность давления ветра увеличилась в 3 раза. Одновременно с этим начался шторм (при котором температура упала до — 10°C), в результате чего были сломаны 22 опоры. Анкерные опоры на этом участке не были повреждены (к сожалению, не дано описание их конструкции).

Провода из алдрея и стальные, а также и изоляторы выдержали такие нагрузки. Точно так же выдержали нагрузки и бетонные фундаменты. Только в некоторых закрепительных болтах появились трещины.

Автор указывает, что в дальнейшем было решено идти не по пути плавления гололеда, а увеличения механической прочности линии передачи. Пролет между опорами был уменьшен с 180 до 70—80 м. Применен новый тип опор с увеличенным размером основания в плоскости, перпендикулярной к направлению линии передачи. В качестве расчетных величин приняты гололед диаметром 15 см (что соответствует нагрузке 9 кг/м) при одновременном ветре с давлением 50 кг/м². На линии передачи провода из алдрея заменены бронзовыми тоже сечением 70 мм². Кроме того, на этом участке телефонные провода перенесены на отдельные деревянные опоры с пролетом между ними в 35 м. Зимой 1932-1933 г., несмотря на очень тяжелые атмосферные условия, линия передачи работала без аварий опор. Все же гололед оказывает влияние на работу некоторых частей конструкции линии передачи. Так, например, при внезапном сбросе гололеда с проводов получают обрывы арматуры гирианд и соединительных частей ее, а также повреждение оттяжек опор.

Инж. К. И. Пяртман

Электрификация транспорта

Область применения дизель-электрических автомотрисс

„Revue de l'électricité et de Mécanique“ № 31, 1933, p. 32—33.

Пассажирское движение на подъездных путях магистралей и на второстепенных железнодорожных линиях считается (во Франции) убыточным, и часто вместо пассажирских поездов для подвоза пассажиров к магистрали пускают автобусы, следующие по шоссе. Однако подсчет показал, что применение автомотрисс с электрической передачей более целесообразно, чем поезда и автобусы. Для сравнения были подсчитаны варианты:

1) пассажирский поезд весом 371 т с паровозом Пасифик 2С1;

2) автобус на 40 мест;

3) автомотрисса на 80 мест.

Как поезд, так и автобус и автомотрисса развивают на площадке скорость 80 км/ч. Подсчет показывает, что вес подвижного состава на одно пассажиро-место в автобусе составляет 215 кг; в автомотриссе 450 кг и в поезде 1020 кг.

Если необходимую мощность на одного пассажира автомотриссе принять за единицу, то для поезда получим соответственно 1,40; для автобуса 1,83.

Несмотря на меньшую мощность, автомотрисса развивает большую среднюю скорость, чем автобус, так как железнодорожное полотно имеет более легкий профиль, чем шоссе, и на нем нет препятствий от автогрузового транспорта. Экономичность автомотриссы обусловлена:

1) снижением расхода на поездные бригады;

2) малым расходом топлива;

3) незначительным расходом на ремонт и на амортизацию капиталовложений;

4) интенсивным использованием подвижного состава.

Особенно значительны преимущества автомотрисс при неравномерном пассажиропотоке, когда основная масса пассажиров должна перебрасываться за 2—3 интенсивных часа.

Во Франции наиболее распространенными являются два типа автомотрисс:

1) на 50 сидячих мест, тара 15 т;

2) на 80 " " " " 35 т.

Первый тип автомотриссы целесообразен при малом расстоянии между остановками, второй — при большом. Мощность двигателя Дизеля для малой автомотриссы, идущей с частыми остановками, равна 5—6 л. с./т брутто при большом расстоянии между остановками и автомотриссах тяжелого типа, развивающих максимальные скорости, допустимые по условиям пути, 9—10 л. с./т брутто.

Что касается эксплуатационных расходов, то опыт Франции показывает, что себестоимость одного пассажиро-места на

километр в тяжелой автомотриссе (35 т) на 23% меньше, чем в легкой (15 т).

Преимущества автомотрисс весом порядка 35 т поставили на очередь разработку двух нормальных типов автомотрисс:

1. Тара 36—38 т (43—46 т брутто) на 90 сидячих мест мощностью 200—275 л. с., максимальная скорость 100—110 км/ч для подъездных путей и линий второстепенного значения.

2. Автомотриссы 40—42 т (48—50 т брутто), также на 90 мест мощностью 400—450 л. с. с максимальной скоростью 120—130 км/ч.

Каждая из этих автомотрисс может работать индивидуально и в поездах, управляемых по системе многих единиц, или с прицепкой.

Для автомотрисс выбрана электрическая передача от вала Дизеля к сцепным осям, так как не существует ни одной системы механической передачи, которая удовлетворяла бы всем требованиям эксплуатации.

Основные преимущества электрической передачи:

1) гарантия двигателя Дизеля от перегрузки;

2) простота управления (всего одна ручка) и возможность применения системы многих единиц;

3) простота установки Дизеля, так как между сцепными колесами и валом Дизеля нет механической связи;

4) возможность реостатного торможения, что облегчает механическое оборудование и увеличивает срок службы ходовых частей;

5) возможность разогрева и пуска двигателя без всяких затруднений.

Инж. В. Соловьев

Электроматериалы

J. LAHOUSE, Диэлектрические потери в промышленных изоляционных материалах

„Bulletin de la Société française de Physique“ 17 Février, 1933 и „Rapport sur la question des diélectriques, industriels“, „RGE“, 1933.

В связи с большим вниманием, которое уделяется в настоящее время исследованию диэлектриков, известный интерес имеет сообщение Ж. Лагусса, предложенное им Лионской секции французского физического общества. Оснавившаяся на вопросе о диэлектрических потерях, автор особо выделяет тот интерес, который представляет преимущественно для конденсаторной промышленности методическое изучение влияния различных факторов на эти потери.

Изучение остаточных явлений в диэлектриках, в настоящее время основательно заброшенное физиками, по сообщению Ж. Лагусса интересно для промышленности тем, что оно ведет к познанию механизма диэлектрических потерь. Эти потери имеют следствием нагревание изолирующих материалов, которые при переменном высоком напряжении разрушаются от локального повышения температуры. Впрочем, за последние годы достигнуты значительные успехи в деле удаления влажности и газообразных осадков в электронизолирующих материалах, что значительно повысило их качества. Пропорциональность потерь квадрату напряжения представляется теперь весьма вероятной, по крайней мере пока ионизация газообразных осадков не происходит во всем объеме. Таким же образом интерпретируется существование резкого перегиба на кривой коэффициента мощности. Надо заметить, что изолирующее сопротивление на промышленном языке (отношение напряжения к зарядному току через минуту после его наложения) есть не что иное, как способ обозначения диэлектрического последствие, потому что истинное сопротивление гораздо выше. С другой стороны, легко себе представить, что действительные потери от эффекта Джоуля в диэлектрике могут составлять лишь весьма малую часть всех потерь в целом, которые, кроме того, возникают от остаточных явлений, рассматриваемых по истечении весьма короткого

Предложенные в этой области теории недостаточны, и в настоящее время самыми поучительными остаются все еще опыты Ж. Кюри и Варбурга и Тегетмейра¹⁾. Последние авторы показали, что даже в кварце явления последействия и наиболее важные из них — параллельные оптической оси, весьма вероятно происходят вследствие переноса ионов Zi и Na , но не K ; Ж. Кюри, с другой стороны, воспроизвел общий ход явлений с помощью неглазированной фарфоровой пластинки, помещенной во влажную атмосферу. Наконец, исследования со стеклянным электродом для измерения P_h обнаружили проницаемость стекла только для ионов H .

Итак, есть основание представлять последействие в виде электроосмотического механизма с полупроницаемостью. Пригодная теория должна будет объяснить: 1) закон наложения, 2) весьма большое влияние температуры, 3) влияние ударов, которые как будто ускоряют наступление окончательной поляризации и 4) интенсивную поляризацию, которую сохраняет затвердевший диэлектрик в электрическом поле. Эта теория должна также дать выражение для диэлектрических потерь с возможностью оценить часть их, вызванную остаточной влажностью. В производственную задачу входит необходимость избавиться от выделяемого тепла. Теплопроводность должна, повидимому, войти в расчет при оценке диэлектрика, чем до сего времени достаточно пренебрегали.

В заключение своего сообщения Ж. Лагусс рассматривает предложенные в последние годы промышленные диэлектрики, как-то: ацетат целлюлозы, бакелит, полимеризованный стирол, глиптал, продукт конденсации мочевины с формальдегидом, ореа (гель окроленна), различные амиды, нитробензин, хлоронафталины, трихлорэтилен, дифенил, некоторые пластификаторы из ацетата, целлюлозы и ряд других.

А. П. и Г. С.

Е. Н. FRITZ, **Паечные соединения фарфора и стекла в электротехнике.** „Ceramic Industry“ декабрь 1932, стр. 279

При конструировании электрических приборов, какковы бушинги, ртутные выпрямители, различные лампы, катодные приборы, кабельные муфты, химическая аппаратура, приборы защиты от перенапряжений и т. п. нередко приходится решать вопрос о герметически плотном соединении металлических частей с фарфоровыми или стеклянными. Вопрос этот решается не так легко; хрупкость и недостаточная прочность стекловидных керамических материалов затрудняет устройство уплотнений. Вплавление в стекло металлических проводочек возможно лишь при малом сечении последних (например, в лампочках накаливания).

Разработанный Westinghouse El. Mfg. Co процесс испытан в производственном масштабе на большом количестве изделий. Соединяемая поверхность стекла или глазурированного фарфора покрывается специальной эмалью с высоким содержанием мегаллов; существенными компонентами ее являются хлориды золота и платины. Эта эмаль наносится на керамический материал (глазурированный фарфор или стекло) кистью или пульверизацией и обжигается в электрической (предпочтительнее) или газовой печи в окислительной атмосфере. Эмаль чрезвычайно прочно приплавляется к керамическому материалу; в то же время внешняя поверхность эмалевого слоя может лудиться и паяться обычными способами. Практически для припаивания эмалированных таким образом керамических деталей к металлическим пользуются припоем из 50% свинца и 50% олова. Перед спайкой керамические детали подогреваются во избежание растрескивания при местном перегреве при пайке; температура этого подогрева, равно как и температура припоя при пайке, не должна никоим образом превосходить 225°С во избежание растворения слоя эмали в припое.

Инж. Б. М. Тареев

О. FEUSSNER, **Новые термоэлементы для весьма высоких температур** „ETZ“ № 31, 1933

В целом ряде случаев производственной и лабораторной практики встречается необходимость измерять температуры порядка 2000°. Эти измерения проводятся специальными термопарами. Вольфрам, молибден и тантал весьма тугоплавки, но недостатком их является легкая окисляемость. Для температур до 1600°, как известно, употреблялись преимущественно термопары платина — сплав платины и родия. Для измерений температур до 2000° наиболее правильный путь — выбор компонентов термопар из платиновых металлов. Температуры плавления платины 1764°, родия 1920°, иридия 2420°, осмия и рутения даже более 2500°. Некоторое применение нашли себе термопары иридий — сплав 90% иридия и 10% рутения, однако, благодаря летучести рутения концентрация его в сплаве меняется и такие термопары приходится часто заново градуировать; далее эти термопары очень дороги и в то же время благодаря хрупкости требуют исключительно внимательного обращения.

В результате работ заводов Гереус в Ганеу предложена термопара иридий — сплав 40% иридия и 50% родия, надежно работающая при 2000°, не нуждающаяся в повторной градуировке и прочная механически. Защитные оболочки могут делаться из корунда (до 1700°), шпинели (до 1950°) или магнезии (до 1500°); кроме этих более дешевых материалов могут применяться материалы более дорогие, но позволяющие использовать нацело теплостойкость самой термопары, а именно окиси циркония, бериллия и тория.

Инж. Б. М. Тареев

КАНТАЛ — НОВЫЙ СПЛАВ С ВЫСОКИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, „ETZ“ № 34 от 24/VIII 1933 г., стр. 829

В тех случаях, когда приходится работать при умеренных температурах, а именно не выше 500°С, пользуются различными сплавами меди с никелем и марганцем, какковы, например, константан, содержащий около 40—45% никеля и обладающий очень малым (близким к 0) коэффициентом расширения, а также манганин, содержащий около 84% меди, 12% марганца и 4% никеля и обладающий таким же малым коэффициентом расширения. Удельное сопротивление первого 0,49 и второго 0,42.

Для частей, работающих при более высоких температурах, например, для нагревательных печей, применяются хромо-никелевые сплавы с содержанием около 80% никеля и 20% хрома, которые хорошо выдерживают работу при температуре в 1000°С. Удельное сопротивление такого сплава около 1,07.

Опыт показал, что сплавы такого рода тем лучше сопротивляются коррозии при высоких температурах, чем больше содержание хрома. Так, например, обыкновенная углеродистая сталь в этом отношении устойчива только до 550°С, сталь с 1% хрома выдерживает уже нагрев до 800°С, а с содержанием хрома около 24% — около 1000° и т. п.

В настоящее время на рынке появился новый сплав — кантал, еще более высоких качеств. Он изготовляется фирмой А. В. Kanthal в Hallstahammer (Швеция). В состав его входят хром, алюминий, кобальт и железо. Температура плавления у него около 1660°С (железа около 1500°, а хромо-никелевой стали — около 1450°С), а удельное сопротивление от 1,4 до 1,6. Сплав этот дает возможность работать при еще более высоких температурах, чем до сих пор известные, а именно около 1300° и является, таким образом, одним из самых лучших материалов для конструкции элект-

¹⁾ Curie, „Bulletin de la Société française de Physique“, 1892. Oeuvres de Curie, p. 220.

РАЗНОЕ

Психология и техника электрооглушения¹⁾, „ETZ“ № 31, 1933, стр. 1

Поражения электрическим током влекут за собой серьезные последствия лишь в случаях прохождения тока через сердце или центральную нервную систему, если не считать ожогов от джоулевого эффекта.



Рис. 1

Влияние тока на сердечную деятельность показано на оциллограммах рис. 1 и 2.

На верхних кривых показано биение сердца собаки, передняя и задняя нога которой присоединены к источнику переменного тока в 42 Hz, 58 V (рис. 1) и 380 V (рис. 2).

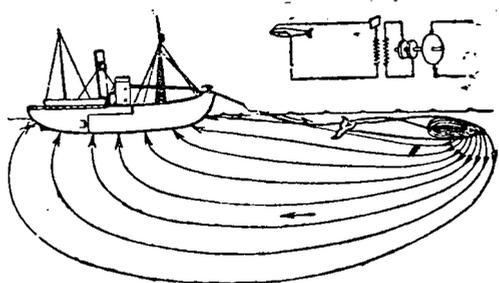


Рис. 1а

Нижние кривые изображают дыхание при тех же условиях. Как видно из кривых, дыхание восстанавливается при размыкании тока. Сердечная же работа в случаях поражения 380 V не возобновляется, и ток в 600 mA оказывается для собаки смертельным.

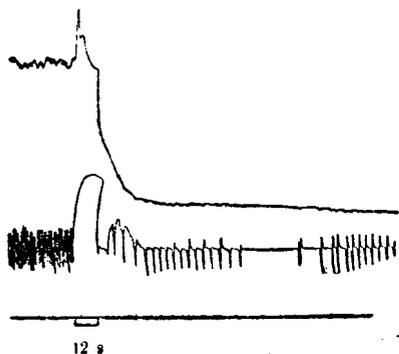


Рис. 2

Смерть человека наступает уже при 100 mA. Это подтверждается аварийной практикой. Потеря сознания имела место при 40 mA 50-периодного тока, прошедшего через сердце. Имеет значение не только частота, но и фор-



Рис. 3

ма кривой. Действие электрического тока разное отражается на мужчинах и женщинах, а также на работниках физического и

¹⁾ Доклад был прочитан главным инж. берлинских скотобоев Альвенслебеном на очередном заседании Союза инженеров электриков.

В прениях оспаривалась безболезненность электрооглушения. Из дальнейших прений выяснилось, что электроубой китов (рис. 1а) применяется норвежцами уже в течение 3 лет. Оглушение кита происходит уже при 50 mA.

умственного труда. В общем 20 mA еще безвредны для отдельных лиц. Минимальный ощущаемый человеком ток равен 1 mA. Токи свыше 3 A влекут за собой временное прекращение сердечной деятельности, которая возобновляется, однако, в случае непродолжительного действия тока порядка нескольких минут.

Более сильное влияние ток оказывает на центральную нервную систему. При малых токах наступает уже оглушение, сопровождающееся полным параличом всех мышц. По прекращении тока через промежуток времени, не превышающий нескольких минут, восстанавливается нормальная деятельность организма. Для мозга же электрооглушение проходит бесследно. Это подтверждено многочисленными вскрытиями электрооглушенных животных.

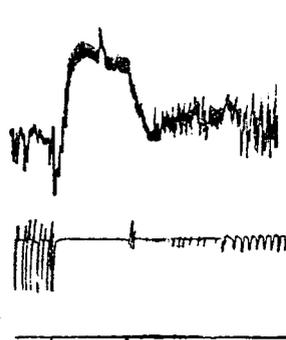


Рис. 4

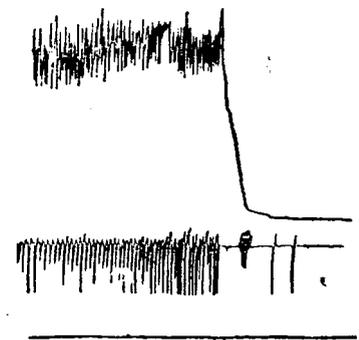


Рис. 5

Вполне убежденный в безвредном действии электронаркоза проф. Ледюк испытал указанный наркоз на себе. Его ассистенты не рискнули, однако, довести ток до указанных профессором 5—7 mA и остановились на 4 mA, при которых Ледюк потерял способность движения, но не лишился сознания. Никаких вредных последствий Ледюк не испытал. Указанные опыты были повторены в Лейпциге.

Наилучшие результаты получаются при кривой тока, изображенной на рис. 3, и при синусоидальной.

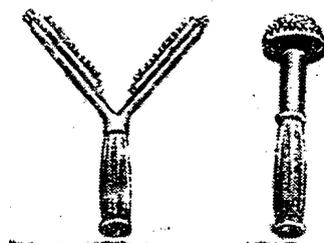


Рис. 6



Рис. 7

Сердечная деятельность и дыхание электрооглушенной собаки показана на рис. 4. При напряжении в 1 080 V и токе

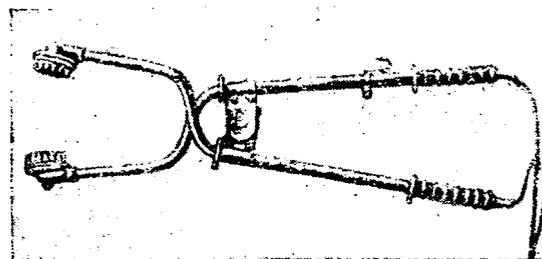


Рис. 3

до 385 mA сердце работало нормально. Дыхание также восстанавливалось при длительности тока, не превышающей 35 сек. При прохождении столь больших токов через сердце смерть наступала уже через 5 сек. (рис. 5).

Причина электрооглушения та же, что и при эпилепсии — прекращение притока крови в головной мозг. Потеря сознания не сопровождается поэтому никакими болезненными ощущениями. Последнее обстоятельство можно использовать для безболезненного убоя животных, предсмертные мучения которых значительно ухудшают качество мяса. В особенности

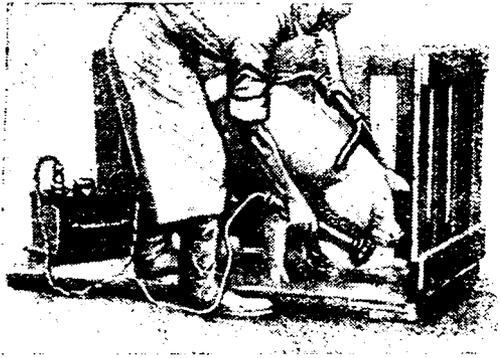


Рис. 9

портится обычным убоем мясо свиней, которым приходится сначала простреживать мозг, а затем по пршествию двух секунд докальвать. Вместо этого мучительного убоя можно сперва пропустить через голову ток, лишить животное сознания, а затем обескровить. Опыты показали, что для полного обескровления (за которым следует вполне безболезненная смерть) достаточно 12 сек. При этом следует отметить, что

обычным способом убоя (как, например, перерезывание горла и закалывание) удается обескровить животное на 80—85%. Смерть от обескровления абсолютно безболезненна. Для оглушения свиньи достаточно 70 V синусоидального тока. Для небольших боен можно применять электроды, изображенные на рис. 6. Недостаток их — необходимость держать навесу. На больших бойнях следует применять самозажимающийся трехполюсный бюгельный держатель, изображенный на рис. 7, или зажимающие клещи, изображенные на рис. 8. Электроды должны быть присоединены к низковольтной обмотке трансформатора 120/70 или 220/70 V. При этих условиях обслу-

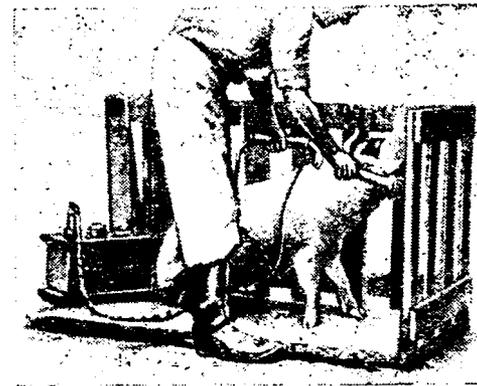


Рис. 10

живающий персонал полностью гарантирован от несчастных случаев. Оглушение происходит мгновенно по замыкании тока. Свиньи молча закрывают глаза (рис. 9 и 10) и вытягивают голову вверх. Полное обескровление объясняется нормальным сердцебиением в начале оглушения.

Инж. Н. Тейтель.

„Сильноточная Электропромышленность на рубеже второй пятилетки“.

Сборник под ред. КАПЛАН, GERMAN И ИВАНОВА, Энергоиздат. Москва, 1933 г. 372 стр. Тираж 3 500.

Блестящие победы, с которыми пришел СССР к XVII партийному съезду могут быть иллюстрированы и на примере нашей электропромышленности. Меньше чем в 3 года электропромышленность выполнила свою первую пятилетку в 7,5 раз увеличила она объем своей продукции за четыре года первой пятилетки, при этом ведущая часть электропромышленности — электромашиностроение — также далеко перевыполнила свой первоначальный план.

Нашей электропромышленности пришлось преодолеть в короткий срок громадные трудности по освоению всех достижений мировой техники, создать и наладить бесчисленный ряд новых производств, организовать массовое производство ряда электротехнических изделий, различных моторов, генераторов, трансформаторов, аппаратуры (особенно автотракторного электрооборудования) ламп, изоляторов и т. п. Пришлось освоить производство целого ряда материалов особенно изоляционных и добиться таким образом почти полного освобождения нашей электропромышленности от импорта. С восьмого места в мире в 1925 г. наша электропромышленность к 1933 г. передвинулась на второе в мире и первое в Европе по объему своего производства.

Этим достижениям нашей электропромышленности, полученным ею в результате упорной борьбы под руководством партии, и посвящен рецензируемый сборник. К первой группе статей, в которых подводятся технико-экономические итоги первой пятилетки и 1933 г. и эти итоги сравниваются с динамикой электропромышленности в крупнейших капиталистических странах, относятся статьи гг. Иванова, Каплана и

Николаева. В одной из статей приводятся весьма интересные данные, показывающие, как стремительно растет наше производство даже по сравнению с промышленностью самой передовой капиталистической страны США а именно:

Производство электротехнических изделий в СССР и США в 1929 г. и 1932 г.

| | 1929 г. | | 1932 г. | |
|----------------------------------|----------|-------|---------|--------|
| | США | СССР | США | СССР |
| Турбогенераторы (в тыс. kW) | 1580,0 | 137,3 | 460,0 | 630,0 |
| Гидрогенераторы (в тыс. kW) | 1440,0 | — | 135,0 | 254,0 |
| Силовые трансформаторы (тыс. kW) | 12 200,0 | 791,1 | 4700,0 | 3572,0 |
| Норм. моторы (тыс. kW) | 3 800,0 | 344,7 | 1250,0 | 1761,6 |
| Электролампы (млн. шт.) | 405,0 | 16,4 | 240,0 | 36,4 |

Если даже сделать скидку на то, что в 1932 г. капиталистическая промышленность проходила через самую низшую точку кризиса, то все же итоги достаточно ясно говорят сами за себя. Остальные разделы сборника посвящены характеристике роста отдельных отраслей промышленности и в первую очередь турбогенераторостроения (тг. Лютера, Алексеева и Шибакина), трансформаторостроения (Рубинштейна), высоковольтной аппаратуры (Гольдмерштейна), реле и автоматики (Аронова), а также в вопросах электрификации промышленности и транспорта (статьи Борисенко и Шевченко, Харина, Вильнера, Александрова, Перевозского, Стуканова, Крапивина и др.). В этих случаях особенно отмечены достижения нашей электропромышленности по постройке мощных гидро- и турбогенера-

торов, освоившей типы машин до 50 тыс. kW включительно (турбо) и 62 тыс. kW (гидро), постройку мощных высоковольтных трансформаторов (20 тыс. kW в единице и напряжении в 220 kV), масляные выключатели на 2,5 млн. kVA и 220 kV, крупные мотор-генераторы для алюминиевой промышленности и транспорта, электропечи до 10t емкостью, электровозы для рудничных, заводских и магистральных путей, ртутные выпрямители РВ-5, РВ-10, РВ-20 на силы тока вплоть до 2000 А.

Красноречивей слов говорят о наших достижениях сухие таблицы в статье т. Алотарцева об электроламповом производстве: начав с 7400 ламп в 1921 г. наша промышленность дошла уже к началу первой пятилетки до 14,5 млн. штук.

К сожалению автор не показал, как рос выпуск ламп за годы первой пятилетки, дошедший к 1934 г. до цифры в 33 млн. штук. Последний раздел заключает в себе статью т. Прелкова о работах Всесоюзного Электротехнического института (ВЭИ) за годы первой пятилетки. За эти годы институт проделал большую работу как в области электромашиностроения, высокого напряжения аппаратуры, электро-материаловедения, так и в области вакуумной техники, источников света, телемеханики, связи.

Сборник развернул величественную картину творческой работы коллектива рабочих и ИТР нашей социалистической электропромышленности. Однако сборник не лишен и серьезных недостатков работы коллектива. Авторы сборника, дав показ наших достижений, очень мало, лишь вскользь, коснулись неизжитых еще недостатков, прежде всего недостаточно хорошего качества ряда электротехнических изделий и материалов, плохого освоения производства некоторых точных приборов и аппаратуры (в частности, реле) нестандартность ряда материалов и полуфабрикатов, иногда высокую стои-

мость их. Не отгеенно отставание сырьевой базы электропромышленности, в частности, медной.

Авторы сборника не подняли его на уровень программного документа, не поставили перед читателем основных задач и проблем электропромышленности, а также не наметили и путей их разрешения. Все это не позволяет нам поставить сборник по электропромышленности на один уровень с другим сборником, составленным группой работников нашего энергохозяйства, под ред. Кржижановского и посвященный вопросам строительства и эксплуатации наших энергосистем. В „Энергетике СССР“ не только дан показ наших достижений но поставлены очередные задачи и сделаны наброски возможных путей их решения.

К отдельным недочетам следует отнести слабое освещение работы и достижений различных видов нашей изоляционной и кабельной промышленности. Непонятно почему в достижениях ленинградского з-да „Электросилы“ не фигурирует электропривод к первому советскому блюмингу? Вся страна знает об этом, следила за его постройкой, а авторы сборника его не заметили. Имеется и ряд досадных опечаток, например, в статье Рубинштейна о трансформаторостроении упорно значится в ряде мест kWA, вместо тыс. kW A (стр. 89 и др.) и т. п.

Несмотря на эти недостатки, все же книга является очень своевременной и неплохо пропагандирует достижения нашей социалистической промышленности. Издана книга великолепно, снабжена богатым иллюстрационным материалом. Остается пожалеть об ограниченности тиража (3500), не позволяющей рассчитывать на ее широкое распространение.

И. С. Палицын.

19 мая 1934 г.

ПОПРАВКИ

По вине автора и технической редакции в статью инж. Х. М. Новик „К расчету фабрично-заводских кабельных силовых сетей трехфазного тока напряжением до 50 V², помещенную в № 4 ж. „Электричество“ 1934 г. вкрались следующие опечатки:

| | Напечатано: | Следует: | | Напечатано: | Следует: |
|--|---------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|
| стр. 31 табл. 1 последн. столб. 2-й форм. | $\frac{173 \rho l l}{qE}$ | $\frac{173 \rho l l k}{qE}$ | „ 33 формула 14 | $K_3 \frac{\dots}{\dots}$ | $T_{ж. x.} = \frac{\dots}{\dots}$ |
| „ 31 „ 1 обознач. форм. 5 | $\rho \rho$ | $\frac{\rho \rho}{\rho E}$ | „ 34 1-й столб. 1 строка после формулы 10' | Значения для различных | значения K_n для различных |
| „ 31 „ 2 столб. 26 строка снизу | $x = 2\pi f(\dots) 10^2$ | $x = 2\pi f(\dots) 10^{-2}$ | „ 34 16 строка сверху | $T_{ж.} = 17^\circ C$ | $T_{ж.} = 47^\circ C$ |
| „ 32 „ 2 предпоследн. столб. | S | L | „ 35 табл. 6 графа 17 | 1,06 | 1,07 |
| „ 33 „ 3 моменты для $3 \times 220 V \cos \varphi$ | 1,95 | 0,95 | „ 35 „ 6 „ 18 | $\rho \rho$ | $\rho \rho$ |
| | | | „ 35 „ строка 21 сверху | является повторением | является повторением |
| | | | „ 35 „ 7 столб. 3 | K | K_3 |

ОНТИ — ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Технический редактор В. Н. Шипов

РЕДКОЛЛЕГИЯ: инж. Е. С. Аватков, проф. В. И. Вейц, инж. В. Н. Глазнов, инж. М. Н. Грановская, инж. Я. А. Климовицкий, акад. Г. М. Кржижановский, инж. И. С. Палицын, М. И. Рубинштейн, инж. Н. А. Сазонов, проф. М. А. Шателен, проф. Я. Н. Шпильрейн.

ОТВ. РЕДАКТОР: инж. Н. А. Сазонов.

Сдано в набор 23/IV 1934 г. Подписано к печати 1/VI 1934 г. Бумага 62x94. Печатных листов 8. Печатных знаков в листе 78 900.

Москва, Валовая, 28. Заказ 2074. Тираж 10 000 + 300 экз.

О Н Т И**Энергоиздат****ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1934 ГОД**

на ежемесячный научно-технический журнал Главэнерго

ТЕПЛО и СИЛА

ГОД ИЗДАНИЯ 10-й**ЗАДАЧИ ЖУРНАЛА:**

Борьба за создание советского энергооборудования, борьба за освоение энергоустановок и рациональную постановку их эксплуатации, помощь ИТР в деле повышения своей квалификации и помощь студентам вузов, основанная на увязке работ научно-исследовательских институтов, работы заводов-изготовителей и опыта эксплуатации станций и промстановок.

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА:

Советское энергооборудование и пути его развития. Освоение оборудования и нормальные режимы его эксплуатации. Эксплуатация энергоустановок, ее организация и обмен эксплуатационным опытом. Оценка конструкций оборудования с точки зрения надежности, экономичности и удобства эксплуатации. Потребление энергии и тепла в промышленности и разрешение проблемы теплоэлектроснабжения промкомбинатов. Комбинированное производство тепла и энергии, теплоэлектроцентрали и тепловые сети. Топливо СССР и особенности его сжигания. Освоение местных топлив. Вопросы экономии топлива. Аварии, их предупреждение и ликвидация.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год—18 р., на 6 мес.—9 р., на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

Подписку на журнал и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „Техперидина“.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗ'а, всеми почтовыми отделениями и письмоносками.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ 1934 года: с 1-го января 1934 г. Главной конторой Техперидики ОНТИ организована специальная экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам.

С жалобами на неаккуратное получение журнала 1934 г. обращайтесь непосредственно в адрес конторы. В 1934 году все журналы ОНТИ будут экспедироваться по ярлычной (адресной) системе.

ОНТИ**ЭНЕРГОИЗДАТ****ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА 1934 ГОД**

на ежемесячный научно-технический журнал

Электрические станции

ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО

5-й ГОД ИЗДАНИЯ**12 НОМЕРОВ В ГОД**

ПРОГРАММА ЖУРНАЛА: Общие технико-экономические проблемы планирования. Освещение отдельных планов электрификации наиболее характерных районов Союза. Общий план электрификации. Технические проблемы электрификации. Критический анализ отдельных проектов крупного электростроительства. Стандартизация и типизация. Описание и критический разбор строительных и монтажных работ. Новые типы и конструкции оборудования. Описание аварий и методы их ликвидации. Организация эксплуатации. Подготовка кадров. Организация ремонтного хозяйства. Режим работы станций. Распределение нагрузки. Регулирование напряжений. Распределение энергии в крупных городах. Вопросы расхода на собственные нужды. Обеспечение надежности параллельной работы станций. Организация диспетчерской службы и опыт ее работы. Централизация управления и применение автоматических приборов. Статистика, информация, библиография, хроника.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН: на инженеров, квалифицированных техников, учащихся вузов, научно-исследовательские институты, проектирующие организации.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

на год—18 р., на 6 мес.—9 р., на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер 1 р. 50 к.

ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ и ДЕНЬГИ НАПРАВЛЯЙТЕ ПО АДРЕСУ: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „Техперидина“.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ: отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗ'а, всеми почтовыми отделениями и письмоносками.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ 1934 г.: с 1 января 1934 г. Главной конторой Техперидики ОНТИ организована специальная экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам.

С жалобами на неаккуратное получение журнала 1934 года обращайтесь непосредственно в адрес конторы. В 1934 году все журналы ОНТИ будут экспедироваться по ярлычной (адресной) системе.

ОНТИ ЭНЕРГОИЗДАТ

ОТКРЫТА ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ на 1934 год

ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СЛАБОГО ТОКА

Орган Всесоюзного объединения электро-
слаботочной промышленности (ВЭСО).

Рассчитан на инженеров, техников, студентов
и высококвалифицированных рабочих.
ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—12 р.,
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—1 р. 20 к.

10 номеров в год

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Главэнергопрома
ВЭНИТО и Энергетического
института академии наук СССР

Рассчитан на квалифицированных работников
электропромышленности и электрохозяйства.
ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—25 р., на 6 мес.—
12 р. 50 к., на 3 мес.—6 р. 25 к.
Отдельный номер—1 р. 25 к.

20 номеров в год

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ОРГАН
ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров-энергетиков и учащихся втузов.
ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—18 р., на 6 мес.—9 р.,
на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

12 номеров в год

ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

имени
Ф. Дзержинского
Орган ВТИ имени Ф. Дзержинского.

Рассчитан на инженеров, техников, студентов втузов.
ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—20 р.,
на 6 мес.—10 р. Отдельный номер—2 р.

10 номеров в год

ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЕ

Орган Всесоюзного дизельного
объединения, научно-исследова-
тельского института дизеле-
строения и научно-технических обществ дизелестроителей.

Рассчитан на ИТС заводов, сотрудников институтов, препода-
вателей втузов и техникумов и инженерно-технический
персонал дизельных установок и судов.
ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—10 р. 80 к.,
на 6 мес.—5 р. 40 к. Отдельный номер—1 р. 80 к.

6 номеров в год

ТЕПЛО и СИЛА

ОРГАН
ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров-энергетиков, инженерно-техни-
ческих работников электростанций и студентов втузов.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—18 р., на 6 мес.—
9 р., на 3 мес.—4 р. 50 к.
Отдельный номер—1 р. 50 к.

12 номеров в год

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Орган Гидроэлектропроекта, Сектора водных ресурсов Госплана
СССР, Гидронта, Института гидротехники и гидроэнергетики,
исследовательского института строительной гидротехники и
инженерной гидрологии, Союзводстроя и Средволгостроя

Рассчитан на инженерно-технических работников, занятых произ-
водством и эксплуатацией гидротехнических сооружений.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—15 р.,
на 6 мес.—7 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

10 номеров в год

ВЕСТНИК КОЧЕГАРА

Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального
бюро по обучению рабочих теплосилового хозяйства.

Рассчитан на кочегаров стационарных и судовых
котельных установок, на машинистов, на низший и
средний административно-технический персонал.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—3 р. 60 к., на 6 мес.—
1 р. 80 к., на 3 мес.—90 к. Отдельный номер—30 к.

12 номеров в год

ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА

Рассчитан на инженерно-технический персонал
заводов ВЭТ и инженеров электротехников.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—18 р., на 6 мес.—9 р.,
на 3 мес.—4 р. 50 к. Отдельный номер—1 р. 50 к.

12 номеров в год

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ Выпуск ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ РЕФЕРАТНЫЙ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров и техников.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—12 р.,
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—1 р. 20 к.

10 номеров в год

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ и ЭЛЕКТРОМОНТЕР

Орган Глав-
энергопрома
Рассчитан на квалифицированного электромонтера,
младший и средний техперсонал и прорабов.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—8 р. 40к., на 6 мес.—
4 р. 20к., на 3 мес.—2р. 10к. Отдельный номер—70к.

12 номеров в год

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ Выпуск ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РЕФЕРАТНЫЙ ЖУРНАЛ ГЛАВЭНЕРГО.

Рассчитан на инженеров-теплотехников.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—12 р.,
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—1 р. 20 к.

10 номеров в год

ВЕСТНИК КОТЛОТУРБИННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Орган Всесоюзного научно-исследовательского института тепло-
гидротехнического оборудования, Центрального котельного кон-
структорского бюро МТУ и заводов Главэнергопрома.

Рассчитан на инженерно-технический персонал заводов и
научно-исследовательских институтов котлотурбостроения
ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—12 р.,
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—2 р.

6 номеров в год

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Орган Главэнергопрома и постоянного бюро с'ездов
по электрификации жел. дорог.

Рассчитан на квалифицированного рабочего, техника, студента,
мастера и инженера, работающих по электрической тяге.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—12 р.,
на 6 мес.—6 р. Отдельный номер—2 р.

6 номеров в год

СВЕТОТЕХНИКА

Орган Главэнергопрома и Светотехнической секции ЭНИА

Рассчитан на инженеров, техников, студентов,
квалифицированных рабочих и мастеров.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:
на год—8 р., на 6 мес.—3 р. Отдельный номер—1 р.

6 номеров в год

МАШИНИСТ

Ежемесячный массовый журнал государственного центрального
бюро по обучению рабочих теплосилового хозяйства.

Рассчитан на машинистов стационарных и подвиж-
ных теплосиловых установок.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА: на год—4 р. 20 к.,
на 6 мес.—2 р. 10 к., на 3 мес.—1 р. 05 к.
Отдельный номер—35 к.

12 номеров в год

Подписку на журналы и деньги направляйте по адресу:

Москва, Центр, Ильинка, проезд Владимирова (Юшков пер.), 4, Главной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“.

Подписка принимается отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостове-
рениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗ'а, всеми
почтовыми отделениями и письмоносцами.

Вниманию подписчиков 1934 г.: С 1-го января 1934 г. Главной конторой „Техпериодика“ ОНТИ организована специальная
экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассылки журналов подписчикам.

С жалобами на неаккуратное получение журнала 1934 г. обращайтесь непосредственно в адрес конторы.

В 1934 г. все журналы ОНТИ будут экспедироваться по ярлычной (адресной) системе.

ПОДПИСКА МЕНЬШЕ ЧЕМ НА 3 МЕС. НЕ ПРИНИМАЕТСЯ.