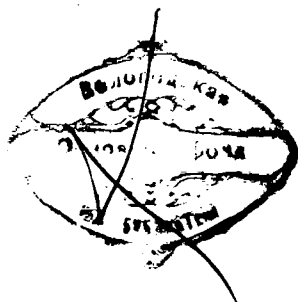


ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

541175



100000, ул. М. И. Ульянова, 10. 1
Вологодская областная
библиотека им. Н. Е. Баумана



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1949

5

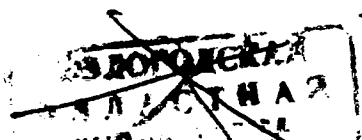
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5
1949
МАЙ

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

СОДЕРЖАНИЕ

Б. П. Петров — Основные принципы автоматического управления электроподвижным составом постоянного тока	3
Г. П. Хализев — О методах автоматического управления ускорением электродвигателей	9
П. А. Рубцов — Электропривод молочных сепараторов	14
В. А. Карасев — Моделирование вихревого магнитного поля	20
С. С. Чугунов — Нелинейный элемент расчетного стола переменного тока	24
М. А. Бабинов и Н. С. Комаров — Применение дифференциальных уравнений длинных линий к расчету протяженных заземлителей	29
Д. В. Голубев — Выбор наиболее выгодного воздушного зазора в магнитной цепи катушки	39
А. А. Соколов — Пути усовершенствования логометров	43
Ю. М. Элькинд — Детекторный стрелочный частотомер резонансного типа	48
Э. В. Зелях и Я. И. Великин — Пьезоэлектрические фильтры	52
С. А. Ключев — Экономия осветительных установок с люминесцентными лампами	56
АВТОРЕФЕРАТЫ	
В. П. Никитин и Н. П. Куницкий — Оптимальный переходной процесс потока шунтового двигателя при регулировании скорости выше основной	59
Г. И. Шерман — Определение эксплуатационных характеристик синхронных генераторов с учетом насыщения	61
Г. Е. Цухов — Об устойчивости установившегося режима серийного синхронного компенсатора	65
Н. И. Коновалов — Дальнейшее развитие характеристик асинхронных двигателей в системе относительных единиц	67
Е. С. Кухаркин — О разбросе времени разряда длинных стержневых промежутков	69
А. П. Беляков — Расчетные соотношения к определению величин емкости и сопротивления растеканию тока между электродами, находящимися в неоднородных средах	71
Л. Ф. Куликовский — Прибор для непосредственного измерения удельного сопротивления электролитов	73
Л. И. Иванов — Частный случай устранения индуктивных помех при измерении импульсного падения напряжения на активном сопротивлении	74
И. И. Гроднев — Экранирование коаксиальных и симметричных кабелей	76
ДИСКУССИИ	
К статье А. А. Глазунова и С. А. Геликонского „Экономически целесообразная шкала стандартных напряжений в диапазоне 10 — 220 кв“	79
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ	
Н. Р. Шукюров и М. С. Трифель — К составлению электротехнических правил и норм	82
ХРОНИКА	
В Комиссии по светотехнике при Отделении технических наук АН СССР	84
Днепропетровский горный институт им. Артема. Диссертации.	85
В Азербайджанском отделении ВНИТОЭ	86
В институте автоматики и телемеханики АН СССР	86
Профессор Л. И. Сиротинский	87
Профессор Г. Н. Петров	88
БИБЛИОГРАФИЯ	
Книга М. А. Шателена „Русские электротехники второй половины XIX века“	89
Д. А. Городский — Книга П. С. Жданова „Устойчивость электрических систем“	92
В. А. Изъюров — Книга М. П. Кутыловского и А. И. Федотова „Подвижной состав трамвая“	93
Б. М. Тареев, А. В. Нетушил, М. А. Архангельский и Е. П. Парини — Книга И. П. Берлинских „Сушка и склейка древесных материалов в электрическом поле высокой частоты“	94
В. И. Фейгин — Сборник „Электротермия“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-**
зунов, член-корр. АН СССР **М. П. Костенно**, академик **В. Ф. Миткевич**,
канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**.

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

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

Адрес для телеграмм: Москва Электричество

Да здравствует 1 мая — день смотра боевых сил трудящихся мира, день братства рабочих всех стран!

(Из призывов ЦК ЕКП(б) к 1 мая 1949 г.)

Основные принципы автоматического управления электроподвижным составом постоянного тока

Кандидат техн. наук **Б. П. ПЕТРОВ**

Московский энергетический институт им. Молотова

Автоматизация управления. Во время автоматического пуска и торможения электроподвижного состава осуществляется регулирование тягового и тормозного усилий двигателей по заданному закону. Например, на рис. 1 кривая *abv* показывает типичную зависимость $F=f(v)$ при пуске, а кривая *где* — зависимость $B=f(v)$ при электрическом торможении для одной какой-либо уставки системы управления. Если изменить уставку, то кривые сместятся (*a'b'v'* и другие). Водитель поезда начинает или прерывает процесс пуска или торможения и простейшими манипуляциями меняет уставку системы управления в границах от начального усилия (F_1 ; B_1) до предельного по сцеплению.

Автоматизация управления осуществляется преимущественно при помощи автоматической аппаратуры, изменяющей сопротивление реостатов в цепи якорей и обмоток возбуждения двигателей. Возможно регулирование большими ступенями — прерывистое управление, или малыми ступенями — непрерывное управление.

Системы машинной автоматизации мало распространены ввиду их дороговизны, сложности и значительной мощности управляющих машин. Наиболее совершенно автоматический пуск и торможение могут быть осуществлены при многоступенчатом — непрерывном управлении. Эта система — наиболее сложная среди аппаратных систем и наименее изученная. В статье рассматриваются некоторые основные вопросы работы этой системы с целью, прежде всего, выявления зависимости между процессами ускорения и замедления поезда и процессами в системе управления, что является главным для разработки системы непрерывного управления.

Реостатный пуск и торможение. В процессе пуска и торможения используются следующие приемы: изменение сопротивления в цепи якорей двигателей (реостатный пуск и торможение) и изменение сопротивления в схеме обмоток возбуждения двигателей (пуск и торможение изме-

Рассматриваются основные соотношения, характеризующие процессы пуска и торможения электроподвижного состава, и устанавливаются их связи с процессами в системе автоматического управления, которые позволяют выяснить требования, предъявляемые к этой системе.

нением поля). Рассматривая эти способы, остановимся в первую очередь на установившихся процессах (участки *бв* и *де* на рис. 1). Тогда для ре-

статного пуска и торможения [Л. 1] справедливо соотношение

$$\frac{dR}{dt} = \mp \frac{c_1 \Phi}{I} \cdot \frac{dv}{dt} = \mp \frac{c_1 \Phi}{I} \left[\frac{F - (\omega + i)}{M} \right], \quad (1)$$

где F — тяговое (тормозное) усилие;
 ω — сопротивление движению;
 I — ток в якоре двигателя;
 i — сопротивление от подъема;
 M — приведенная масса поезда;
 R — сопротивление реостата в цепи якоря;
 Φ — поток возбуждения.

В серийных двигателях всегда и компаундных при неизменном токе в шунтовой обмотке I , Φ и F связаны однозначно и в данном случае постоянны. Поэтому можно утверждать, что при некоторых M , ω и i каждому установившемуся значению тока соответствует одно единственное значение скорости выключения сопротивления dR/dt , а следовательно, и скорости

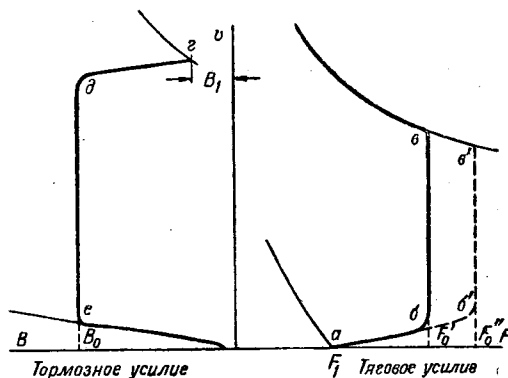


Рис. 1. Оптимальный характер изменения тягового (тормозного) усилия в процессе автоматического пуска (торможения).

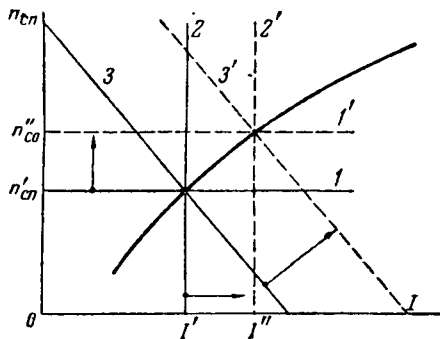


Рис. 2. Характеристики системы управления:
1, 1' — независимая от тока; 3, 3' — зависящая от тока;
2, 2' — при неизменном токе.

вращения вала реостатного контроллера или сервопривода n_{cn} , так как обычно

$$R = k_r \varphi \text{ и } \frac{dR}{dt} = k_{cn} n_{cn}, \quad (2)$$

где φ — угол поворота вала контроллера, а k_r — сопротивление, выключаемое при повороте контроллера на 1 оборот.

Изменяя скорость вращения вала реостатного контроллера, можно устанавливать в тяговых двигателях любую необходимую величину тока, а следовательно, и тягового усилия.

Зависимость n_{cn} от установившегося значения тока назовем характеристикой пуска и торможения. Для некоторых значений M , ω и i она построена на рис. 2 и показывает, какой должна быть скорость выключения реостатов, чтобы получить заданное установившееся значение тока.

В свою очередь система управления, включающая и сервопривод реостатного контроллера, может создать определенного вида зависимость скорости вращения сервопривода от тока в тяговых двигателях. Эта зависимость, называемая характеристикой системы управления, может иметь вид прямой, параллельной оси абсцисс (прямая 1, рис. 2), что соответ-

ствует при соблюдении в точке пересечения следующего условия:

$$\left(\frac{dn_{cn}}{dI} \right)_{\text{пуск}} > \left(\frac{dn_{cn}}{dI} \right)_{\text{управление}}. \quad (3)$$

Для изменения скорости вращения реостатного контроллера (например, n'_{cn} на рис. 2) необходимо характеристики системы управления сдвинуть в ту или иную сторону, что достигается, например, изменением натяжения пружины регулятора ускорения.

Представленная на рис. 2 характеристика пуска и торможения справедлива только для некоторых частных условий движения (M , ω , i) и для определенного вида кривой $c_1 \Phi = f(I)$ двигателя. В других сочетаниях этих величин она изображается более сложными кривыми, форма которых может быть установлена аналитически только для некоторых простейших зависимостей $c_1 \Phi$ от I .

Например, для ненасыщенного серийного двигателя можно принять:

$$\Phi = aI \quad (4)$$

и

$$F = c_2 \Phi I = c_2 a I^2. \quad (5)$$

Подставляя уравнения (4) и (5) в уравнение (1), получим характеристику пуска и торможения в виде параболы, причем в зависимости от M , ω и i точка перегиба ее перемещается по оси ординат:

$$n_{cn} = \frac{c_1 c_2 a^2 I^2 - c_1 a (\omega + i)}{k_{cn} \cdot M}. \quad (5')$$

Для ненасыщенного компаундного двигателя, пренебрегая изменением реакции якоря, можно принять:

$$\Phi = (\Phi_0 + bI) \quad (6)$$

и аналогичным приемом получить следующее аналитическое выражение для характеристики реостатного пуска и торможения

$$n_{cn} = \frac{I^3 c_1 c_2 b^2 + I^2 2 c_1 c_2 d \Phi_0 + I [c_1 c_2 \Phi_0^2 - c_1 b (\omega + i)] - c_1 \Phi_0 (\omega + i)}{I M k_{cn}} \quad (7)$$

ствуется независимой от тока хронометрической системе управления или прямой, параллельной оси ординат (прямая 2, рис. 2), что соответствует пуску (торможению) со строго фиксированным током при любых условиях движения, или наконец, иметь вид прямых или кривых, наклонных к осям (кривая 3 на рис. 2), что свойственно зависимости от тока хронометрической системе управления.

Пересечением характеристики пуска и торможения с характеристикой системы управления определяется установившаяся скорость вращения вала реостатного контроллера и ток в двигателях.

Очевидно, что они будут устойчивыми только

Дифференцируя это уравнение по току и приравнявая затем нулю, находим многочлен, характеризующий условия нахождения максимума и минимума для уравнения (7):

$$I^3 + I^2 \frac{\Phi_0}{b} + \frac{\Phi_0 (\omega + i)}{2 c_d b} = 0. \quad (8)$$

Из этого уравнения следует, что характеристика пуска и торможения в данном случае может иметь в общем до трех максимумов и минимумов. В реальных условиях зависимость $n_{cn} = f(I)$ более сложна, но может быть для каждого конкретного двигателя установлена расчетом.

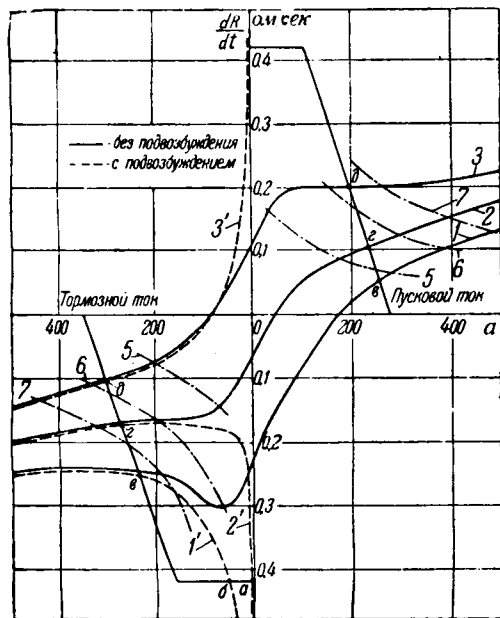


Рис. 3. Характеристика реостатного пуска и торможения для серийного двигателя ДК-102В (1 и 1' — для подъема 50%/00; 2 и 2' — для площадки; 3 и 3' — для уклона 50%/00) и характеристики системы управления. Кривая 5 — $\frac{dv}{dt} = 0,4$ м/сек²; 6 — $0,8$ м/сек²; 7 — $\frac{dv}{dt} = 1,2$ м/сек².

На рис. 3 приведены характеристики пуска и торможения серийного двигателя типа ДК-102В мотор-вагона типа Г метрополитена, построенные для площадки, подъема и уклона при подвозбуждении и без подвозбуждения двигателя во время торможения. Для реостатного пуска и торможения компаундного двигателя типа ДК-201А троллейбуса ЯТБ-4 аналогичные характеристики построены на рис. 4 также для площадки и разных подъемов и уклонов. Эти кривые позволяют в известной мере оценить изменения формы характеристик пуска и торможения, возможные в реальной действительности, и подойти к выбору оптимальной формы характеристик системы управления. При проектировании конкретных систем автоматического управления построение подобных характеристик пуска и торможения для заданного типа двигателя должно явиться начальным этапом всей работы.

Не вдаваясь в рассмотрение способов получения той или иной формы характеристики системы управления, так как это не входит в задачу данной работы, установим на основании рассмотрения кривых рис. 3 и 4, какая из характеристик управления, представленных на рис. 2, в наибольшей степени удовлетворяет требованиям реостатного пуска и торможения.

Прежде всего характеристики управления должны удовлетворять требованию устойчивости, выраженному неравенством (3). Ему в полной мере удовлетворяет характеристика управления 2-го вида. Характеристика управления 3-го вида может быть всегда подобрана в соответствии с условием (3). Характеристика же независимого от тока хронометрического управления удовлетворяет требованию устойчивости (3) только в не-

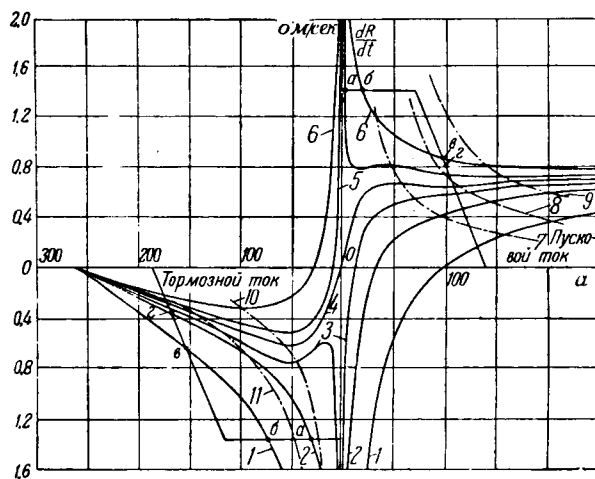


Рис. 4. Характеристики реостатного пуска и торможения для компаундного двигателя ДК-201а (1 — подъем 50%/00; 2 — площадка; 3, 4, 5 и 6 — соответственно для уклонов 170%/00, 250%/00 и 500%/00) и характеристики системы управления, кривые 7; 10 — $\frac{dv}{dt} = 0,4$ м/сек²; 8, 11 — $\frac{dv}{dt} = 0,8$ м/сек²; 9 — $\frac{dv}{dt} = 1,2$ м/сек².

которых случаях пуска и торможения, а именно, когда (dn_{cn}/dI) на характеристике пуска больше нуля. Во всех остальных случаях, а их большинство, особенно в режиме торможения компаундного двигателя, характеристика 3-го вида непригодна.

Обычно эта характеристика сочетается с другими, так как максимальная скорость сервопривода всегда ограничена и при малых токах характеристики 2-го и 3-го видов переходят в характеристику 1-го вида (рис. 3 и 4).

Вторым критерием для выбора вида характеристик системы управления является степень сохранения постоянства ускорения и замедления при изменении условий движения (M , ω и i). Для соблюдения графика движения поездов целесообразно, чтобы изменение ускорения и замедления было наименьшим. Однако, при этом должны быть учтены ограничения по току и сцеплению.

Рассмотрим прежде всего, какова должна быть характеристика у системы управления, чтобы она поддерживала ускорение и замедление неизменным при заданной уставке, но меняющихся M , ω и i .

Этому условию может удовлетворить при определенной форме только характеристика 3-го вида. Форму характеристики для этого случая можно установить из уравнения (1), если положить в нем $dv/dt = \text{const}$. Тогда зависимая от тока хронометрическая система будет иметь характеристику, повторяющую в некотором масштабе кривую $c_1 \Phi I$. На рис. 3 и 4, например, эти характеристики для ускорений и замедлений в $0,4$ — $0,8$ и $1,2$ м/сек² нанесены пунктиром с точкой.

Отсюда следует, что все другие характеристики со сравнительно меньшим наклоном к оси абсцисс, в частности и характеристика 1-го вида, приводят к увеличению ускорения при возрастании сопротивления движения. Характеристики, имеющие больший угол наклона, особенно ха-

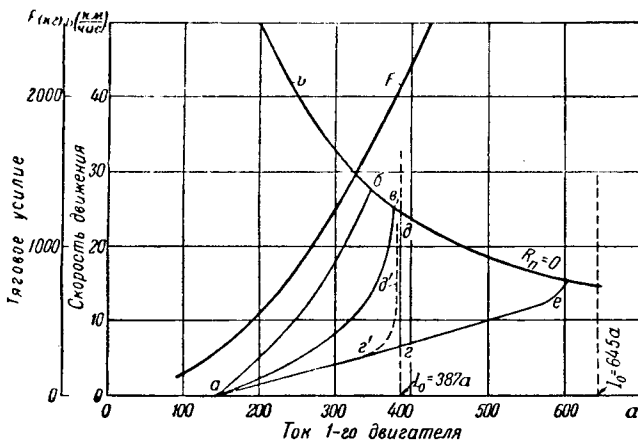


Рис. 5. Изменение тока от начального значения, равного 140 а, до установившегося значения 387 а во время реостатного автоматического пуска серийного ненасыщенного двигателя при разных характеристиках системы управления.

Кривая а б — для независимой от тока хронометрической системы; а в — для зависимой от тока системы; а г д — для сочетания характеристик форсированного независимого от тока хронометрического пуска с зависимой от тока характеристикой; а з д — для сочетания характеристик 1-го и 2-го видов. (исходные данные на 1 двигатель: $k_0 = 0,5$; $k_1 = 100 \cdot 10^{-8}$; $k_2 = 0,0138$; $k_3 = 0,00078$; $k_4 = 0,2$ для $I_0 = 387$ а; $k_1 = 0,5$ для $I_0 = 387$ а; $U = 375$ в; $\omega = 75$ кг; $M = 1,275$ кг · сек²/м).

характеристика 2-го вида, приводят к уменьшению ускорения в тех же условиях.

При торможении влияние формы характеристики системы управления обратное.

Наконец, форма характеристики системы управления существенно влияет на процесс изменения тока от начального I до установившегося I_0 значения (см. участки а—б и др. на рис. 1).

Покажем это на примере независимого хронометрического пуска ненасыщенного серийного двигателя. Для этого решаем с учетом формул (4) и (5) систему уравнений

$$U = IR + c_1 v \Phi, \quad (9)$$

$$R = R_1 - k_1 t, \quad (10)$$

$$v = \int \left(\frac{F - w}{M} \right) dt, \quad (11)$$

где R_1 — первоначальное сопротивление пускового реостата.

Решение дает следующее выражение для функции $t = f(I)$ при независимой от тока хронометрической системе управления (приложение 1):

$$t = -\frac{U}{2k_2 k_3 I_0^3} \cdot \ln \left[\frac{e^{\frac{2I_0}{I}} (I_0^2 - I^2)}{e^{\frac{2I_0}{I}} (I_0^2 - I_1^2)} \right]. \quad (12)$$

Для случая пуска при зависимой от тока характеристике системы управления уравнение (10) следует заменить следующим уравнением:

$$R = R_1 - \int (k_0 - k_4 I) dt, \quad (13)$$

где

$$k_0 = \left(\frac{dR}{dt} \right)_{\max} \text{ и } k_4 = \frac{k_0}{I_{\max}}. \quad (\text{рис. 2})$$

Решение для этого случая будет:

$$t = \ln \left[\frac{e^{\frac{\alpha I}{I_1}} \left(\frac{I_1 - D_1}{I - D_1} \right)^{\beta} \left(\frac{I_1 - D_2}{I - D_2} \right)^{\gamma}}{e^{\frac{\alpha I}{I_1}} \left(\frac{I_1 - D_1}{I_1 - D_1} \right)^{\beta} \left(\frac{I_1 - D_2}{I_1 - D_2} \right)^{\gamma}} \right], \quad (14)$$

где $D_1, D_2, \alpha, \beta, \gamma$ — постоянные (приложение 2). Уравнения показывают, что в обоих случаях пуска $I = I_0$ при $t = \infty$.

Более подробно удобно их сравнить на конкретном примере. На рис. 5 показаны кривые $I = f(t)$ и $v = \psi(I)$, построенные по формулам (11), (12) и (14) для серийного ненасыщенного двигателя, имеющего при $I = 300$ а и $U = 375$ в те же параметры, что и двигатель ДК-102. Из рассмотрения этих кривых следует, что при независимом от тока хронометрическом пуске $dR/dt = k_1 = 0,2$ ом/сек ток увеличивается очень медленно и к моменту выхода на безреостатную характеристику еще не достигает установившегося значения ($I_0 = 387$ а). При зависимой от тока характеристике ($k_0 = 0,5$ ом/сек; $k_4 = 0,0078$ ом/сек) ток увеличивается быстрее, но также к моменту выхода на автоматическую характеристику не достигает установившегося значения. И только применяя в начале форсированный хронометрический пуск ($k_1 = k_0 = 0,5$ ом/сек) и переходя затем на зависимую от тока характеристику или характеристику 2-го вида (рис. 2), получаем наиболее быстрый переход к установившемуся току двигателя.

Кривые рис. 5 полностью соответствуют данным экспериментов. Верхний предел скорости сервопривода при форсировании ограничен, так как: 1) скорость нарастания ускорения по данным опыта не может быть больше 2 м/сек² и 2) вследствие запаздывания возбуждения двигателей при переходе на реостатное торможение возможны забегания реостатного контроллера, приводящие к значительным толчкам тока. Следовательно, зависимая от тока хронометрическая система в сочетании с независимой в наибольшей степени удовлетворяет требованиям автоматического управления электроподвижного состава при реостатном пуске и торможении.

Пуск и торможение изменением поля возбуждения. Необходимо предварительно рассмотреть, каким требованиям должна удовлетворять система управления, если пуск и торможение осуществляются изменением поля. В данном случае имеется в виду пуск серийных двигателей шунтированием их обмоток сопротивлением и индуктивным шунтом, а также пуск и торможение компаундного двигателя изменением его шунтового возбуждения.

Для установления связи между процессами ускорения и замедления поезда и процессами в системе управления с некоторыми допущениями воспользуемся соотношением

$$v = \frac{c_2}{c_1} \frac{U I_x}{F}, \quad (15)$$

где I_x — ток в якоре двигателя;

U — напряжение сети. Рассмотрим два слу-

чая пуска и торможения: при неизменном токе в якоре и при неизменном тяговом (тормозном) усилии.

Если $I_x = I_0 = \text{const}$, тогда уравнение (9) примет вид:

$$v = \frac{c_2 U I_0}{c_1 F} = \frac{F_0 v_0}{c_1 F}, \quad (15')$$

где v_0 — скорость движения при токе I_0 в момент начала изменения поля. Из этого уравнения прежде всего следует, что одновременно с изменением скорости будет существенно меняться тяговое (тормозное) усилие. Поэтому такой способ пуска и торможения, который, очевидно, будет иметь место при характеристике системы управления 2-го вида, мало пригоден, особенно при глубокой регулировке поля, которую имеют современные тяговые двигатели. Дифференцируя уравнение (15') по времени и заменяя ускорение в соответствии с уравнением движения поезда, находим соотношение

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{dv}{dt} \cdot \frac{c_1 F^2}{v_0 F_0} = \left[\frac{F - (\omega + i)}{M} \right] \frac{c_1 F^2}{v_0 F_0}, \quad (16)$$

которое показывает, что при данных начальных условиях (M, ω, i) каждому значению F , начиная от начального $F = F_0$, соответствует определенная величина dF/dt , которая является некоторой функцией скорости вращения сервопривода. Поэтому вследствие изменения тягового усилия в процессе пуска и торможения должна также меняться скорость вращения сервопривода.

Сложен в осуществлении, но значительно более благоприятен для управления поездом второй частный случай пуска и торможения при неизменном пусковом (тормозном) усилии $F = F_0 = \text{const}$ и меняющемся токе. Из уравнения (15), дифференцируя его по времени при $F = F_0$, получим:

$$\frac{dI_x}{dt} = \frac{c_1 F_0 dv}{c_2 U dt} = \frac{c_1 F_0}{c_2 U} \left[\frac{F_0 - (\omega + i)}{M} \right], \quad (17)$$

т. е. при данных начальных условиях (M, ω, i) каждому значению F_0 соответствует совершенно определенная скорость изменения тока в якоре двигателя. Если последнюю сделать функцией скорости сервопривода, то, меняя ее, можно получить любое необходимое установившееся значение тягового (тормозного) усилия. Увеличение скорости движения при этом способе пуска связано с увеличением тока в якоре. В этом его недостаток, который, однако, компенсируется преимуществами пуска при $F = \text{const}$.

Для выяснения зависимости между током в якоре и скоростью движения используем уравнение (15), обозначив v_0 и I_0 — начальными, а v и I_x — текущие значения скорости движения и тока в якоре.

Тогда получим соотношение

$$I_x = v \frac{I_0}{v_0}. \quad (18)$$

Рассмотрим теперь при некоторых упрощениях, каким образом может быть осуществлена связь между скоростью изменения тока в якоре и скоростью вращения сервопривода.

Примем первоначально, что серийный двигатель ненасыщен и, воспользовавшись уравнениями (4) и (5), а также соотношением

$$\alpha = I_s / I_x = \frac{r_{ш}}{r_{o.s} + r_{ш}}, \quad (19)$$

напишем:

$$F_0 = c_2 \cdot \alpha \cdot I_s \cdot I_x = c_2 \alpha a I_s^2, \quad (20)$$

где I_s — ток в обмотке возбуждения;

$r_{o.s}$ — сопротивление обмотки возбуждения;

$r_{ш}$ — сопротивление реостата, шунтирующего обмотку возбуждения;

α — коэффициент ослабления поля.

Имея в виду, что в начале ослабления поля $I_s = I_0 = I_0$, т. е. $F_0 = c_2 a I_0^2$, а также используя уравнения (18), (19), (20), получаем уравнение для изменения шунтирующего сопротивления:

$$r_{ш} = \frac{r_{o.s}}{\left(\frac{v}{v_0} \right)^2 - 1}. \quad (21)$$

В свою очередь скорость

$$v = v_0 + \frac{dv}{dt} \cdot t. \quad (22)$$

Кроме того, чтобы удовлетворить требованию

$$\frac{dI_x}{dt} = n_{cn} = \text{const}, \text{ угол поворота контроллера}$$

$$\varphi = n_{cn} \cdot t. \quad (23)$$

Из уравнений (21), (22), (23) получим закон изменения сопротивления при повороте вала контроллера

$$r_{ш} = \frac{r_{o.s}}{2A\varphi + A^2\varphi^2}, \quad (24)$$

где

$$A = \frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{v_0 \cdot n_{cn}}. \quad (25)$$

При любых условиях пуска уравнение (24) должно сохранять свою силу, так как оно дает распределение сопротивления по окружности коллекторного контроллера, которое, естественно, остается неизменным. Это возможно только при $A = \text{const}$. Для этого необходимо, чтобы скорость вращения контроллера при изменении условий движения следовала соотношению

$$n_{cn} = \frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{A \cdot v_0} = \frac{F_0 - (\omega + i)}{M \cdot A \cdot v_0}. \quad (26)$$

Последнее уравнение выражает характеристику пуска при изменении поля, аналогичную характеристике реостатного пуска [уравнение (1)]. Очевидно, если характеристику системы управления в этом случае также построить в функции F_0 или обе характеристики в функции I_0 , что в принципе одно и то же, то пересечение обеих характеристик определит установившееся тяговое усилие и соответствующую ему скорость вращения сервопривода.

Для насыщенного серийного двигателя зависимость $r_{ш} = f(\varphi)$, выбранная по одному какому-нибудь режиму пуска, не будет полностью подходить для других условий пуска. Поэтому

в процессе пуска скорость вращения сервопривода или тяговое усилие должны несколько меняться. Однако, расчеты, проведенные для существующих тяговых двигателей, показывают, что эти изменения незначительны. Аналогичные зависимости могут быть сделаны для компаундного двигателя.

Примем первоначально, что двигатель не насыщен:

$$\Phi = a (i_{ш} w_{ш} + I_{я} w_c), \quad (27)$$

где $i_{ш}$ и $w_{ш}$ — ток и число витков шунтовой обмотки;

w_c — число витков серийной обмотки.

Тогда тяговое усилие, которое должно быть постоянным, определится из уравнения

$$F_0 = c_2 \Phi I_{я} = c_2 a (i_{ш} w_{ш} + I_{я} w_c) I_{я}. \quad (28)$$

В начале установившегося пуска или в конце торможения

$$I_{я} = I_0 \text{ и } i_{ш} = i_0, \text{ т. е. } F_0 = c_2 a (i_0 w_{ш} + I_0 w_c) I_0.$$

Учитывая уравнения (18), (27) и (28), найдем закон изменения сопротивления в цепи шунтовой обмотки двигателя

$$R_{ш} = \frac{U_{ш} w_{ш} \frac{v}{v_0}}{i_0 w_{ш} + I_0 w_c \left[1 - \frac{v^2}{v_0^2} \right]}, \quad (29)$$

где $U_{ш}$ — напряжение питания шунтовой обмотки.

Из уравнения (29) следует, что если распределение сопротивления $R_{ш}$ по ступеням реостата будет выполнено по какому-нибудь одному режиму, то при других I_0 в процессе пуска или торможения F и $n_{сн}$ уже не останутся постоянными. Однако, отклонения их от среднего значения не будут велики, так как $I_0 w_c \ll i_0 w_{ш}$. Во всяком случае уменьшение усилия при увеличении скорости будет меньшим, чем при пуске или торможении с током $I_{я} = \text{const}$.

Для осуществления пуска и торможения изменением поля в случае соблюдения условия $F = F_0 = \text{const}$ нужно, чтобы при увеличении тока в якоре скорость вращения сервопривода $n_{сн}$ была постоянной или незначительно уменьшалась. Поэтому удобны будут хронометрические и близкие к ним характеристики системы управления. Однако, имея в виду, что эти системы не обеспечивают быстрый переход от одного режима к другому, а также, что увеличение тока, имеющее место при сохранении $F = F_0 = \text{const}$, не всегда допустимо, следует использовать зависимость от тока характеристику, сочетая ее, как и в других случаях, с независимой от тока. Тогда пуск и торможение будут осуществляться при одновременном ограниченном изменении усилия и тока в якоре.

Заключение. Сочетание зависимой и независимой от тока характеристик системы автоматического управления позволяет наиболее полно обеспечить все требования, вытекающие из разнообразных условий автоматического пуска и торможения электрического подвижного состава постоянного тока.

Приложение 1.

Из уравнений (4), (5), (9), (10), (11) получим:

$$U = I(R_1 - k_1 t) + \frac{caI}{M} \int (c_2 a I^2 - w) dt. \quad (A)$$

Введем обозначения $k_2 = \frac{c_1 a}{M}$, $k_3 = c_2 a$, тогда

$$U = I(R_1 - k_1 t) + k_2 I \int (k_3 I^2 - w) dt. \quad (B)$$

Решение относительно t будет:

$$t = -\frac{U}{2k_2 k_3 Z^3} \ln \left[\frac{e^{\frac{2Z}{I} (Z^2 - I^2)}}{c} \right]. \quad (B)$$

Постоянный член c находим из условия: $I = I_1$ при $t=0$:

$$c = (Z^2 - I_1^2) e^{\frac{2Z}{I_1}}. \quad (Г)$$

Кроме того, принимая в уравнении (B) $\frac{dI}{dt} = 0$, находим, что $Z = I_0$. После подстановки приходим к уравнению (12).

Приложение 2.

Из уравнений (4), (5), (9), (11), (13) с учетом введенных в приложении 1 обозначений

$$U = I[R_1 - \int (k_0 - k_4 I) dt + k_2 I \int (k_3 I^2 - w) dt]. \quad (A)$$

Делим на I и дифференцируем по времени

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I^2}{U} \left[k_3 k_3 I^2 + k_1 I - (k_0 + k_2 w) \right] = -\frac{k_2 k_3}{U} I^2 \left[I^2 + \frac{k_1}{k_2 k_3} I - \frac{k_0 + k_2 w}{k_2 k_3} \right]. \quad (B)$$

Обозначим: $A = \frac{k_0 + k_2 w}{k_2 k_3}$, $B = \frac{k_1}{k_2 k_3}$, $c = \frac{k_2 k_3}{U}$.

Решение (B) дает:

$$t = \ln \left[\frac{e^{\alpha I} \cdot k}{(I - D_1)^{\beta} \cdot (I - D_2)^{\gamma}} \right],$$

$$D_{1,2} = -\frac{B}{2} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4} + A}$$

$$\alpha = \frac{1}{c D_1 D_2}; \quad \beta = \frac{1}{c D_1^2 (D_1 - D_2)}; \quad \gamma = \frac{1}{c D_2^2 (D_2 - D_1)}. \quad (Г)$$

Постоянную находим из условия $I = I_1$ при $t = 0$:

$$K = \frac{(I_1 - D_1)^{\beta} \cdot (I_1 - D_2)^{\gamma}}{e^{\alpha I_1}}. \quad (Г)$$

Отсюда получим уравнение (14).

Литература

1. Б. П. Петров. Автоматическое регулируемое управление трамвайными вагонами. Электричество, № 3, 1947.

[30. 10. 1948]



О методах автоматического управления ускорением электродвигателей

Доц. Г. П. ХАЛИЗЕВ

Всесоюзный заочный политехнический институт

Классификация методов управления ускорением. При проектировании релейно-контакторных схем управления для электродвигателей постоянного тока или асинхронных двигателей с фазным ротором в первую очередь приходится решать вопрос о методе автоматического управления ускорением двигателя — о закономерности, по которой совершается включение контакторов ускорения, выводящих ступени пускового сопротивления (речь идет о системах пуска помощью ступенчатых реостатов с относительно небольшим числом ступеней).

В современной технической литературе классификация методов управления ускорением проводится чаще всего с точки зрения электрических факторов, непосредственно воздействующих на управляющее реле ускорения. В. К. Попов¹ различает пять принципов автоматического управления ускорением электродвигателей: а) принцип обратной э. д. с. (только для двигателей постоянного тока); б) ограничения тока; в) независимой выдержки времени; г) зависимой от тока выдержки времени; д) частотный принцип. Этот перечень, однако, не является исчерпывающим и мог бы быть дополнен следующими: е) принцип падения напряжения на пусковом сопротивлении (для двигателей постоянного тока) и ж) э. д. с. ротора (для асинхронных двигателей с фазным ротором). Кроме того, следует отметить, что принцип ограничения тока в приводах с асинхронными двигателями может применяться как к статорной, так и к роторной цепи.

Другие авторы стремятся оградить в классификации методов управления ускорением параметры, характеризующие работу электропривода. Попытки такой классификации были впервые сделаны автором настоящей статьи в его книге

Анализ существующих методов автоматического управления ускорением электродвигателей с точки зрения поведения электропривода при изменении статических моментов сопротивления и моментов инерции системы приводит к возможности установить два независимых метода: управление ускорением с заданным моментом двигателя и управление с заданным временем ускорения. Второй метод при неизменном моменте инерции привода характеризуется постоянством динамического момента. Предложенный ранее метод управления в функции ускорения привода характеризуется тем, что большие нагрузки ускоряются быстро, а малые — медленно. Такая характеристика всегда нежелательна, вследствие чего этот метод не сможет найти применения в промышленности.

«Пускорегулирующая аппаратура», МЭИ, 1937. Этот способ классификации нашел некоторое развитие у А. Я. Лернера (книга «Автоматическое управление промышленными электроприводами»), который различает следующие основные принципы автоматизации управления электроприводами: а) управление в зависимости от величины

протекающего по обмоткам двигателя тока; б) в зависимости от скорости электропривода; в) в функции времени; г) управление в зависимости от величины ускорения. Однако, и эта классификация недостаточно четко отражает параметры электропривода. Так, управление в функции тока и управление в функции времени непосредственно не определяют параметров электропривода. В дальнейшем будет предложена классификация методов управления ускорением, учитывающая параметры, характеризующие работу электропривода в процессе пуска. Однако, предварительно необходимо установить важнейшие критерии, могущие служить для принципиальной оценки того или иного метода ускорения. Таким критерием является поведение электропривода при отклонении статического момента сопротивления и момента инерции привода от значений, принятых при расчете. Под поведением электропривода будем понимать изменение:

- а) момента двигателя $M = f_1(M_c, J)$;
- б) динамического момента электропривода $M_d = f_2(M_c, J)$;
- в) времени ускорения $t_y = f_3(M_c, J)$.

Ускорение с заданным моментом двигателя. Проанализируем различные методы управления ускорением с точки зрения этих принципиальных критериев. Будем полагать, что напряжение питающей сети, ее частота, а также уставки реле ускорения стабильны.

¹ В. К. Попов. Элементы электроавтоматики. Машгиз, 1947.

На рис. 1 представлена пусковая диаграмма некоторого привода. Предположено, что пусковой момент двигателя по ступеням колеблется в пределах от M_1 до M_2 . Используя принцип обратной э. д. с., мы должны включить катушки реле

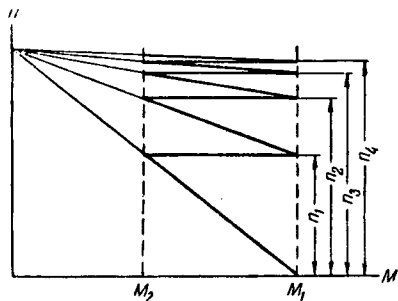


Рис. 1.

ускорения параллельно якорю двигателя (рис. 2). Напряжение на катушке реле ускорения в этом случае

$$U_p = E + IR_{\text{я}} = c\Phi n + IR_{\text{я}}.$$

При принятых допущениях U_p является однозначной функцией скорости, и включение оче-

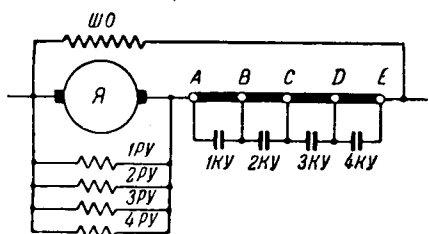


Рис. 2.

редного контактора ускорения будет происходить только тогда, когда скорость двигателя достигнет определенных значений n_1, n_2, n_3, n_4 (рис. 1).

Если включить реле ускорения между точками А и Е (рис. 2), мы осуществим ускорение в функции падения напряжения на пусковом

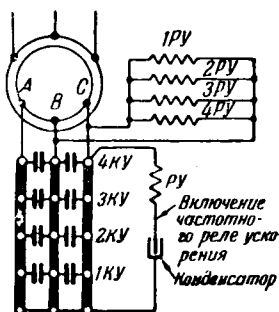


Рис. 3.

сопротивлении. В этом случае напряжение на катушках реле

$$U_p = U_c - (c\Phi n + IR_{\text{я}}),$$

т. е. также является однозначной функцией скорости.

Если использовать для управления ускорением асинхронных двигателей с фазным ротором принцип изменения э. д. с. ротора, реле ускорения должны быть включены на кольца ротора так, как это показано на рис. 3. Напряжение на катушке реле, пренебрегая падением напряжения в обмотках ротора можно вычислять по формуле

$$U_p = sE_2,$$

пропорционально скольжению, которое в свою очередь является однозначной функцией скорости.

Переходя к частотному принципу, заметим, что частота тока в роторе прямо пропорциональна скольжению и также является функцией скорости. Катушка реле ускорения, обладающая индуктивностью, включается последовательно с конденсатором на напряжение ротора, либо на часть этого напряжения. Реле срабатывает, когда скорость двигателя достигнет значения, при котором наступает резонанс. Если обозначить X_L — индуктивное сопротивление катушки реле при частоте сети и X_C — емкостное сопротивление конденсатора при частоте сети, то при резонансе $sX_L = \frac{X_C}{s}$. Одна из возможных схем

включения частотного реле показана на том же рис. 3. Ясно, что количество частотных реле должно быть равно числу ступеней ускорения.

Все четыре рассмотренных способа управления ускорением принципиально ничем не отличаются один от другого. Все они базируются на методе управления ускорением в функции скорости. Использование этого метода означает, что включение очередного контактора ускорения происходит только тогда, когда скорость двигателя достигнет заданного значения, определяемого установкой реле ускорения.

Переходим к рассмотрению способа управления ускорением в функции тока. При применении любого из вариантов этого метода включение очередного контактора ускорения происходит только в том случае, если ток двигателя, уменьшаясь в процессе разгона на данной пусковой ступени, достигает заданного значения, определяемого уставкой реле ускорения. Например, согласно рис. 1 включение контакторов ускорения будет происходить тогда, когда ток двигателя в процессе его ускорения снизится до значения, соответствующего M_2 .

В качестве реле ускорения обычно применяются сериесные реле, катушки которых включаются последовательно в цепь якоря постоянного тока или в цепь статора или ротора асинхронного двигателя. Могут применяться и шунтовые реле, катушки которых включаются на сопротивление последней пусковой ступени (например, между точками D и E, рис. 2). В этом случае напряжение на катушке реле в процессе ускорения двигателя пропорционально только току двигателя.

Если вспомнить принятое раньше допущение, что напряжение сети остается стабильным в процессе пуска и что при этих условиях момент

двигателя является однозначной функцией тока, то легко можно установить, что оба рассмотренных метода ускорения в функции скорости и тока, по существу, представляют единый метод управления ускорением, при котором включение контакторов ускорения происходит при достижении моментом двигателя определенного наперед заданного значения. При этом совсем необязательно, чтобы моменты переключения были одинаковы на всех ступенях. На рис. 4 в качестве примера представлена такая диаграмма. Тем не менее и в этом случае значения моментов двигателя в процессе пуска целиком определяются уставками реле ускорения. Таким образом, рассмотренные методы могут быть объединены и названы методом автоматического управления ускорением с заданным моментом двигателя. Момент двигателя в этом случае не зависит ни от статического момента сопротивления, ни от момента инерции привода и определяется только уставками реле ускорения. Отключение статического момента сопротивления привода от расчетного будет сказываться на величине динамического момента

$$M_d = M - M_c \quad (1)$$

и времени ускорения

$$t_y \equiv \frac{J}{M_d} = \frac{J}{M - M_c} \quad (2)$$

С увеличением статического момента динамический момент уменьшается и время ускорения возрастает. Уменьшение статического момента приводит к обратным результатам.

Изменение момента инерции системы не оказывает влияния на величину динамического момента. Время же ускорения будет изменяться пропорционально моменту инерции. Из выражения

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

следует, что при рассматриваемом методе ускорения и неизменном статическом моменте величина ускорения привода $\frac{d\omega}{dt}$ меняется обратно пропорционально моменту инерции.

Управление с заданным временем ускорения. Перейдем к анализу метода управления ускорением в функции времени. Этот метод характеризуется тем, что контакторы ускорения после подачи пускового импульса закрываются, закорачивая секции пусковых сопротивлений через определенные заданные интервалы времени. Эти интервалы не зависят ни от скорости, ни от тока; их длительность обусловлена только уставками реле ускорения.

Проанализируем, как ведет себя эта система при изменении статического момента. На рис. 5 представлена пусковая диаграмма $abvde\delta z\eta$ некоторого привода, статический момент сопротивления которого при пуске равен M_c . Ускорение осуществлено в функции времени, и выдержки времени, пренебрегая запаздыванием

контакторов, определялись по общеизвестной формуле

$$t = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{d1} - M_{d2}} \ln \frac{M_{d1}}{M_{d2}} \quad (4)$$

Допустим теперь, что статический момент сопротивления изменился, увеличившись до M'_c .

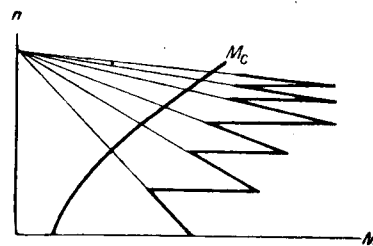


Рис. 4.

При неизменных выдержках времени реле ускорения контакторы ускорения будут закрываться теперь при меньших скоростях, и пусковая диаграмма примет вид: $ab'b's'd'd'e'e'ж'ж'z'z'u'$. Новые значения скоростей переключения могут быть найдены по формуле

$$n_2 = n_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + n_1 e^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$$

где n_2 — искомая скорость переключения данной ступени;

n_y — установившаяся скорость ступени — скорость привода при статическом моменте M'_c , например для первой ступени эта скорость будет n_{δ} ;

n_1 — начальная скорость;

T — постоянная времени, определяемая для каждой ступени по формуле

$$T = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_y - n_1}{M_{d1}} \quad (6)$$

В этой формуле M_{d1} — динамический момент при начальной скорости. Все входящие в формулу скорости исходные величины могут быть найдены непосредственно из пусковой диаграммы.

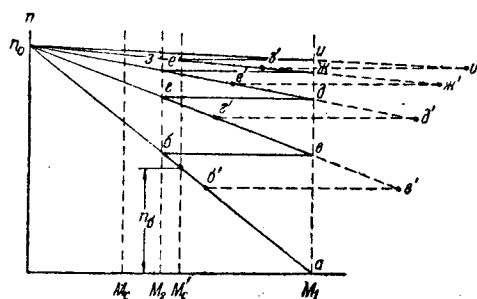


Рис. 5.

Из формулы (2) со всей очевидностью вытекает, что средний динамический момент должен остаться неизменным, так как остается неизменным время ускорения t_y . Следовательно, средний пусковой момент двигателя $M_{cp} = M_d + M'_c$ должен увеличиться. Это отчетливо видно на рис. 5.

Заметим, что некоторое искажающее влияние вносит то обстоятельство, что начальный момент на первой ступени определяется величиной пускового сопротивления и не зависит от величины момента статического сопротивления. При уменьшении статического момента уменьшится средний пусковой момент двигателя с сохранением неизменным среднего динамического момента и времени ускорения.

Изменение момента инерции привода вызывает пропорциональное изменение динамического момента. Момент двигателя при пуске будет изменяться так, чтобы обеспечить требуемый динамический момент. Если новое значение момента инерции $J' = kJ$, то новое значение динамического момента будет $M'_d = kM_d$ и новое значение момента двигателя $M' = kM_d + M_c$.

Таким образом, метод управления ускорением в функции времени может быть назван методом управления с заданным временем ускорения. Если рассматривать изменение только статического момента, предполагая, что момент инерции привода при всех пусковых режимах остается постоянным, то этот метод дополнительно может быть охарактеризован, как метод пуска с заданным средним динамическим моментом.

Управление в функции ускорения. Осталось рассмотреть последний из основных методов — метод управления в функции величины ускорения привода. Как уже было упомянуто, этот метод впервые предложен А. Я. Лернером. Принципиальная сущность метода управления в функции ускорения заключается в том, что после пуска двигателя по характеристике 1 (рис. 6)

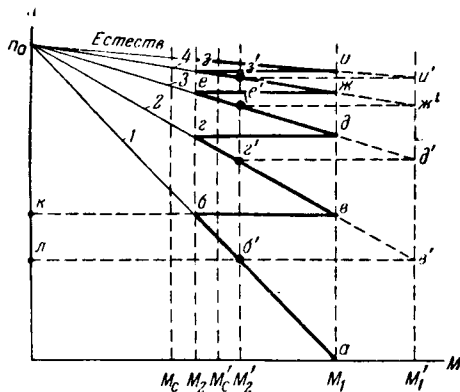


Рис. 6.

включение первого контактора ускорения I/U произойдет тогда, когда ускорение привода уменьшится до определенной, заданной аппаратурой управления величины. Это значит, что при неизменном моменте инерции системы переключение на следующую ступень будет происходить при уменьшении динамического момента $M_{d2} = J \frac{d\omega}{dt}$

до определенной величины, равной (рис. 6) $M_{d2} = M_2 - M_c$ (здесь M_c — расчетный момент статического сопротивления; M_2 — момент переключения). Если уставки реле ускорения одина-

ковы для всех ступеней, то и момент переключения M_2 будет одинаковым для всех ступеней, и расчетная пусковая диаграмма получает вид *абвгдежзи*.

Не касаясь здесь вопросов сложности, громоздкости и ненадежности аппаратуры, предлагаемой А. Я. Лернером для реализации рассматриваемого метода управления ускорением, ограничимся принципиальным анализом его, рассмотрим поведение системы при изменении статического момента сопротивления и момента инерции привода.

Для расчетной диаграммы обозначим:

$$M_{d2} = M_2 - M_c = \alpha M_c, \quad (7)$$

$$M_1 = \beta M_c, \quad (8)$$

$$M_2 = M_c + M_{d2} = M_c (1 + \alpha). \quad (9)$$

Средний момент двигателя при пуске

$$M_{cp} = \frac{M_1 + M_2}{2} = M_c \frac{1 + \alpha + \beta}{2}. \quad (10)$$

Средний динамический момент

$$M_{d,c} = M_{cp} - M_c = M_c \frac{\alpha + \beta - 1}{2}. \quad (11)$$

Предположим теперь, что статический момент изменился и стал равным $M'_c = kM_c$. По сущности рассматриваемого метода динамический момент переключения должен остаться прежним, т. е. $M'_{d2} = M_{d2} = \alpha M_c$, и пусковая диаграмма примет вид: *аб'в'г'д'е'ж'з'и'* (рис. 6). Новый момент переключения

$$M'_2 = M'_c + M'_{d2} = M_c (k + \alpha). \quad (12)$$

Новый пиковый момент будет одинаковым для всех ступеней, в чем легко убедиться следующим образом:

$$\text{из треугольников } обг \text{ и } об'г': \frac{об}{об'} = \frac{ог}{ог'};$$

$$\text{из треугольников } обв \text{ и } об'в': \frac{об}{об'} = \frac{бв}{б'в'};$$

$$\text{из треугольников } огд \text{ и } ог'д': \frac{ог}{ог'} = \frac{гд}{г'д'}.$$

Из этих пропорций получаем:

$$\frac{бв}{б'в'} = \frac{гд}{г'д'}$$

Так как $бв = гд = M_1 - M_2$, то и $б'в' = г'д'$.

Приняв во внимание, что M_2 одинаков для всех ступеней, приходим к выводу, что точки $в'_1, д'_1, ж'_1, и'_1$ лежат на одной вертикали, т. е. пиковые моменты M'_1 одинаковы на всех ступенях.

Из сравнения треугольников *овк*, *ов'л'* и *обк*, *об'л* получаем:

$$\frac{M'_1}{M_1} = \frac{M'_2}{M_2},$$

откуда

$$M_1' = M_c \beta \frac{k+\alpha}{1+\alpha}. \quad (13)$$

Средний момент двигателя

$$M_{cp}' = \frac{M_1' + M_2'}{2} = M_c \frac{1+\alpha+\beta}{2} \cdot \frac{k+\alpha}{1+\alpha} = M_{cp} \frac{k+\alpha}{1+\alpha}. \quad (14)$$

Из этого выражения видно, что при увеличении статического момента ($k > 1$) средний момент двигателя возрастает; при его уменьшении ($k < 1$) средний момент уменьшается.

Средний динамический момент двигателя

$$M_{\partial.c}' = M_{cp}' - M_c' = M_c \frac{\alpha(1+\alpha+\beta) + k[\beta - (1+\alpha)]}{2(1+\alpha)}. \quad (15)$$

Это выражение не дает возможности непосредственно выявить характер изменения динамического момента при изменении момента статического сопротивления. Поэтому воспользуемся следующим приемом. Найдем разность

$$D = M_{\partial.c} - M_{\partial.c}' = M_c \frac{(1-k)[\beta - (1+\alpha)]}{2(1+\alpha)}. \quad (16)$$

Выражение в квадратных скобках представляет разность $M_1 - M_2$ и всегда больше нуля. Точно так же всегда больше нуля знаменатель $2(1+\alpha)$. Поэтому знак D определяется знаком скобки $(1-k)$.

При $k > 1$

$$D < 0 \text{ и } M_{\partial.c}' > M_{\partial.c}.$$

При $k < 1$

$$D > 0 \text{ и } M_{\partial.c}' < M_{\partial.c}.$$

Таким образом, при увеличении момента статического сопротивления динамический момент $M_{\partial.c}'$ возрастает, а время ускорения [см. (2)] уменьшается. Уменьшение статической нагрузки при-

водит к снижению динамического момента и возрастанию времени ускорения.

Эти соотношения особенно просто выявляются, если принять, что момент переключения мало отличается от статического момента, т. е. положить $\alpha = 0$. Тогда формула (11) примет вид:

$$M_{\partial.c} = M_c \beta \frac{\beta-1}{2}, \quad (11')$$

а формула (15)

$$M_{\partial.c}' = M_c k \beta \frac{\beta-1}{2}, \quad (15')$$

и мы получаем следующее соотношение между $M_{\partial.c}$ и $M_{\partial.c}'$:

$$M_{\partial.c}' = k M_{\partial.c}. \quad (17)$$

Аналогичными приемами можно доказать, что при $M_c = \text{const}$ и $J = \text{var}$ время ускорения будет возрастать при увеличении момента инерции привода; оно будет уменьшаться при убывании момента инерции.

Полученные соотношения крайне неблагоприятно характеризуют систему автоматического управления в функции ускорения привода. Действительно, при этой системе малым нагрузкам будет соответствовать медленный разгон, большим — быстрый. В практике никогда не встречается надобность в подобных соотношениях. Время ускорения желательно либо сохранить постоянным, независимо от величины нагрузки (ускорение в функции времени), либо изменять его в обратном отношении к пусковой нагрузке (ускорение с заданным моментом двигателя). Поэтому надо считать, что последний из трех рассмотренных нами методов управления, а именно метод управления в функции величины ускорения, не получит промышленного применения.

[11. 10. 1948]



РОСТОВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ВНИТОЭ сообщает,
что по решению Министерства электропро-
мышленности СССР научно-техническая сессия
по электровозостроению состоится в городе
Новочеркасске

5—10 июля 1949 г.

Электропривод молочных сепараторов

Кандидат техн. наук П. А. РУБЦОВ

МИМЭСХ

В сельском хозяйстве СССР имеется свыше миллиона сепараторов и центрифуг разного назначения с ручным приводом. В это пятилетие число их значительно возрастет.

Наряду с этим успешно выполняется задача широкой электрификации сельского хозяйства страны. Следует поэтому ожидать в ближайшей перспективе перевода на электропривод этого огромного парка машин. Перевод на электропривод только полумиллиона сепараторов при мощности электродвигателей до 120 вт позволит ежедневно экономить не менее 1,5 млн. чел.-час при улучшении качества работы и повышении износоустойчивости машин. Жидкостные сепараторы, в том числе и молочные, применяются также в пищевой, химической, нефтяной, парфюмерной, фармацевтической, лакокрасочной, текстильной, коммунальной и многих других отраслях промышленности. Несмотря на такое широкое распространение жидкостных центрифуг, литература по электроприводу этих машин скудна.

Рациональный электропривод, как известно, может быть создан на базе совершенного сочетания механических свойств рабочей машины и

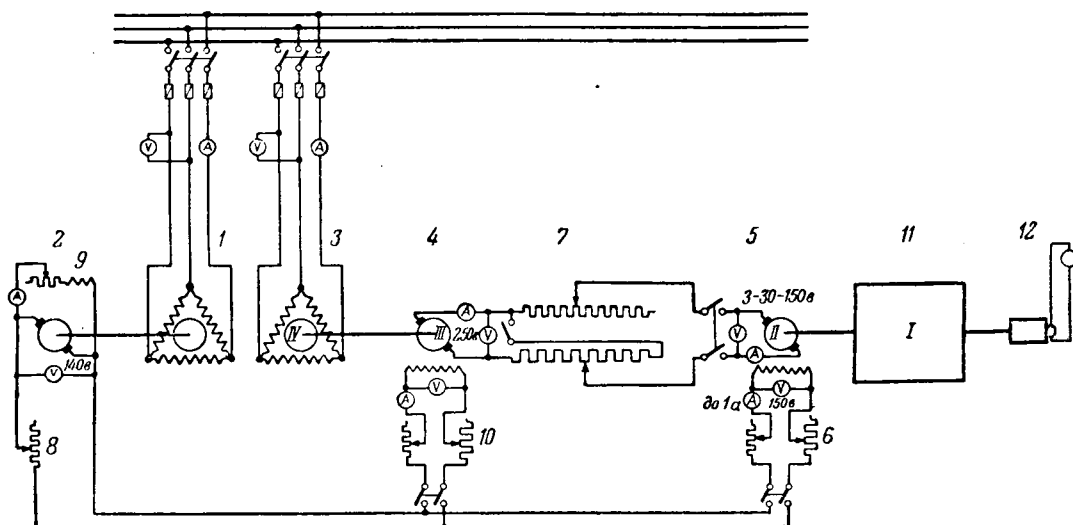
Указаны методика получения и анализ закона изменения статического момента исполнительных механизмов, имеющих относительно большой маховой момент и работающих с высоким числом оборотов. Исследование проведено на примере жидкостной непрерывно действующей высокооборотной центрифуги молочного сепаратора.

электродвигателя. Механические характеристики существующих типов электродвигателей хорошо изучены; механические характеристики молочных сепараторов и других

жидкостных центрифуг еще недостаточно выяснены. Жидкостные сепараторы относятся к числу машин с относительно большими маховыми массами и высоким числом оборотов.

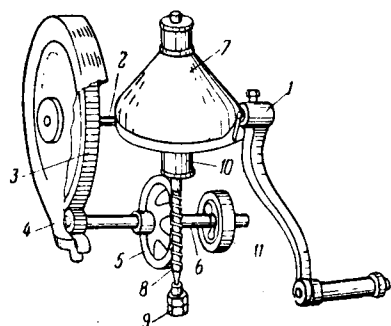
Электропривод молочных сепараторов может быть отнесен к типу нерегулируемого привода с запуском вхолостую. Но он имеет свою специфику — длительный период пуска (2—3 мин.), что характерно для всех машин с относительно большим маховым моментом и высоким числом оборотов.

Для подобного типа привода особенно необходимо знание механической характеристики рабочей машины. Для создания рационального электропривода основным является получение данных для углубленного изучения закона изменения статического момента сепараторов, как одного из главных элементов, характеризующих механические свойства рабочей машины.



1 — асинхронный короткозамкнутый двигатель; 2 — генератор постоянного тока; 3 — асинхронный короткозамкнутый двигатель; 4 — генератор постоянного тока; 5 — генератор постоянного тока; 6 — регуляровочный реостат в цепи возбуждения машины II; 7 — вспомогательное устройство из активных сопротивлений в цепи якоря машины II; 8 — вспомогательный регуляровочный реостат в цепи независимого возбуждения машины II; 9 — вспомогательный регуляровочный реостат в цепи независимого возбуждения машины II; 10 — регуляровочный реостат в цепи возбуждения машины II; 11 — испытуемая машина; 12 — таходинамо.

Рис. 1. Электрическая схема агрегата для определения статических моментов.



1—рукоятка; 2—валик ручного привода; 3—большая шестерня; 4—малая шестерня; 5—винтовое колесо; 6—вал механического привода; 7—барабан; 8—вал барабана (веретено); 9—пятник вала барабана; 10—горловой подшипник; 11—шкив для механического привода.

Рис. 2. Общий вид кинематической схемы привода сепаратора.

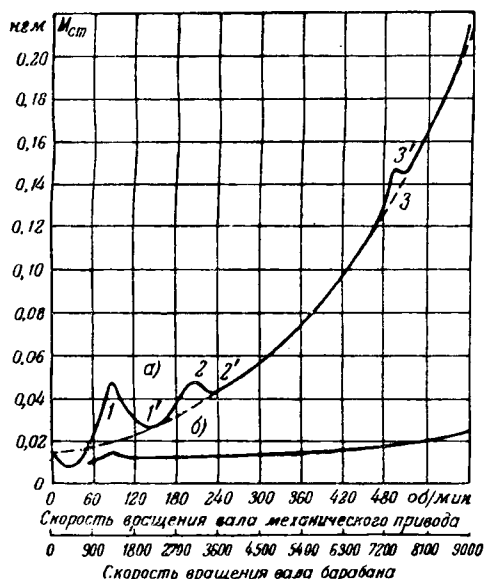


Рис. 3. $M_{cm} = f(n)$ на валу механического привода сепаратора Урал-6, производительностью 600 л в час.

a — с барабаном; б — без него.

Методика определения статического момента.

Среди различных способов экспериментального определения статического момента лучшим следует признать способ нагрузочной машины постоянного тока, в основу которой положена схема Леонарда (рис. 1). С помощью этой схемы можно определять статический момент любой машины и вращающий момент асинхронных двигателей. При этом вал испытуемой машины соединяется непосредственно с валом тарированной нагрузочной машины постоянного тока с помощью эластичной муфты. Основным свойством этой схемы является возможность получить устойчивую работу исследуемой машины почти на любой требуемой скорости при любом режиме (в нашем случае от 2 до 800 об/мин) и, стало быть, снять всю характеристику как непрерывную кривую, кроме начального момента. Начальный момент трогания удобнее всего снимать с помощью пружинного динамометра.

Статический момент сепараторов (рис. 2). С помощью только что изложенного способа автор получил кривые статического момента в

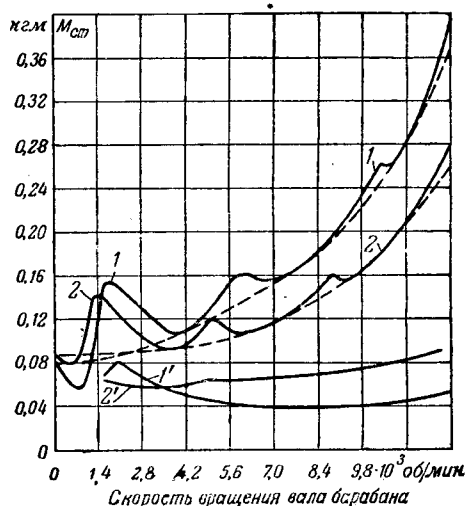


Рис. 4. $M_{cm} = f(n)$ на валу ручного привода сепараторов Держинцев производительностью 50 л в час (кривые 1, 1') и Урал-1 производительностью 100 л в час (2, 2'). Кривые 1, 2 — с барабаном, 1', 2' — без него.

зависимости от числа оборотов $M_{cm} = f(n)$ для различных конструкций молочных сепараторов. Полученные опытные данные обработаны по методу наименьших квадратов (рис. 3, 4, 5). Если отбросить на кривой статических моментов пики, обусловленные резонансом колебаний системы, то эти кривые можно выразить следующей формулой:

$$M_{cm} = a_0 + a_1 n^2, \quad (1)$$

которая дает кривые, изображенные пунктиром. Формула действительна только при средней интегральной скорости барабана не более 65 м/сек,

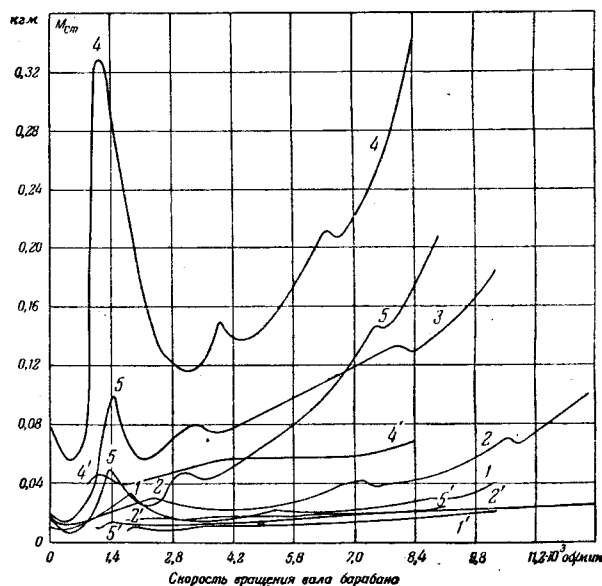


Рис. 5. $M_{cm} = f(n)$ на валу механического привода сепараторов.

1, 1' — сепаратор Милька (производительность 250 л в час); 2, 2' — Альфа-Лаваль (производительность 100 л в час); 3, 3' — «Звезда» завода «Смичка» (производительность 50 л в час); 4, 4' — «Звезда» завода Молмашстрой (производительность 500 л в час); 5, 5' — Урал-6 (кривые с индексом штрих — без барабана).

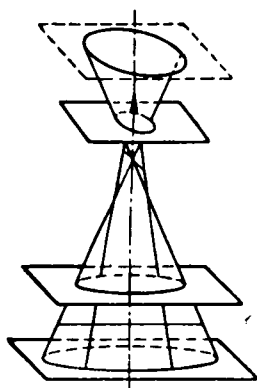


Рис. 6. Схема сложного движения вала барабана сепаратора.

M_{cm} зависит от ряда параметров: от качества обработки и сборки кинематической схемы, массы барабана, величины и степени шероховатости поверхностей барабана и, наконец, от скорости вращения. Практически значение коэффициента a можно принять равным моменту трогания M_0 , и тогда статический момент может быть представлен в виде вентиляторной зависимости

$$M'_{cm} \approx M_0 + a_1 n^2. \quad (1')$$

Анализ опытных данных. Значения $M_{cm} = f(n)$ от скорости, равной нулю, до начала области первого пика на кривой моментов при совершенно одинаковых условиях привода получаются различными, в особенности при малых оборотах, сохраняя при этом общий характер изменения. Этому явлению можно дать следующие объяснения. Практически центр тяжести барабана вместе с валом лежит вне геометрической оси. Поэтому при вращении системы вал-барабан, имеющей возможность перемены положения оси вращения, вращающаяся ось описывает конус вращения с вершиной примерно в центре между обоими подшипниками, если оба подшипника имеют эластичное укрепление. Когда этого нет, как в сепараторе, конус вращения будет примерно таким, как это показано на рис. 6. Вследствие этого в опорном защемлении вала создаются изгибающие моменты, в особенности в начале пуска, и тем более высокие, чем дальше точка защемления расположена от центра тяжести.

Внимательное изучение этого явления показало, что при данной конструкции оно в основном зависит от неудовлетворительной работы горлового подшипника и в этой связи от различного положения винта вала барабана относительно винтового колеса в зависимости от начального положения и последующего смещения пяты вертикального вала в гнезде подпятника, обусловленного сложным движением вала барабана. Резкое проявление этого явления приводит к заклиниванию вала барабана. Распространим некоторые детали этого явления (см. табл. 2).

Увеличение подводимых напряжения и мощности к тарированному двигателю в некоторых

Таблица 1

Тип сепаратора	K_3 балл	Характеристика
Дзержинец	1	Частое заклинивание вала. Колебание момента до $\pm 38\%$
Урал-1	2	Частое заклинивание вала. Колебание момента до $\pm 33\%$
Милька № 25	3	Редкое заклинивание вала.
Альфа-Лаваль № 4	4	Колебания момента еще весьма заметны—до $\pm 25\%$
Звезда (завод Молмашстрой)	5	
Звезда (завод „Смычка“)	6	Очень редкое заклинивание вала. Колебание момента до $\pm 12\%$
Урал-6	7	Очень редкое заклинивание вала. Колебание момента до $\pm 7\%$

точках вызывает очень малое увеличение числа оборотов сепаратора. Затем увеличение скорости, несмотря на повышение подводимого напряжения, вовсе прекращается. Описанное явление сопровождается очевидным возрастанием механической вибрации системы сепаратор—стенд. Подводимая мощность при этом идет на поддержание колебаний и лишь преодолевает сопротивление. При дальнейшем осторожном увеличении напряжения замечается, что при определенном его значении скорость, как бы срываясь, стремительно и самопроизвольно нарастает до определенной величины. Этому явлению соответствуют пики и провалы на кривой статических моментов. Чтобы затем увеличить скорость, требуется вновь повысить подводимое напряжение.

Точки на кривой момента, соответствующие срыву оборотов, располагаются в определенной узкой зоне (табл. 2).

Кривая $M_{cm} = f(n)$ всех сепараторов имеет три пика, при которых замечались заметные механические вибрации системы, и три провала. При этом можно установить определенную закономерность их размещения на кривой статических моментов (табл. 3).

Происхождение этих явлений объясняет теория колебаний. Под воздействием внешнего крутящего момента вследствие статической неуравновешенности системы в сепараторе при вращении барабана возникает периодическая возмущающая сила в виде центробежной силы неуравновешенной вращающейся массы, действующей резкими толчками, и пропорциональ-

Область критических скоростей

Таблица 2

Тип сепаратора	K_3 (балл)	Первая область	Вторая область	Третья область
Дзержинец	2	1 260 — 1 820 (560)	5 470 — 6 000	10 000 — 10 503
Урал-1	4	1 361 — 1 848 (487)	5 360 — 3 850	8 560 — 9 240
Милька № 25	1	1 280 — 2 050 (770)	4 740 — 5 500	8 260 — 8 970
Альфа-Лаваль	3	2 000 — 2 500 (500)	6 750 — 7 250	10 200 — 10 700
Звезда (завод Молмашстрой)	5	1 114 — 1 460 (346)	3 140 — 3 470	7 600 — 7 940
Звезда (завод „Смычка“)	6	1 096 — 1 315 (219)	3 860 — 3 470	6 500 — 6 700
Урал-6	7	1 200 — 1 350 (150)	2 920 — 3 060	7 150 — 7 300

Таблица 3

Тип сепаратора	Номинальное число оборотов в минуту	Первое критическое число оборотов вала барабана	$\frac{n_1}{n_2}$	Второе критическое число оборотов вала барабана	$\frac{n_2}{n_3}$	Третье критическое число оборотов вала барабана
Дзержинец . . .	9 800	1 680	3,5	5 885	1,75	10 480
Урал-1	10 080	1 428	3,5	5 040	1,75	10 290
Милька № 25 . . .	8 820	1 795	3,2	5 255	1,6	8 655
Альфа-Лаваль . . .	8 830	1 333	3,0	7 000	1,5	10 500
Звезда (завод Молмашстрой)	7 183	1 416	2,33	3 280	2,33	7 795
Звезда (завод "Смычка") . . .	7 183	1 166	3,38	3 940	1,69	6 648
Урал-6	7 250	1 350	2,33	3 145	2,33	7 350

ной массе и квадрату скорости. Такую периодическую функцию можно представить в виде ряда гармоник с убывающей амплитудой. В соответствии с принципом суперпозиции каждая из гармонических составляющих будет вызывать такой эффект, как если бы другие составляющие отсутствовали. В данном случае колебания можно рассматривать гармоническими с одной степенью свободы. Такие колебания могут быть выражены дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, составленному с учетом сил инерции и затухания:

$$X'' + 2\rho X' + \omega^2 X = f(t). \quad (2)$$

При малом трении и линейном законе трения решение этого уравнения дает следующую величину смещения колеблющейся системы:

$$X = e^{-\rho t} (A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t) - (C \sin(\omega t - \alpha)). \quad (3)$$

Второй член дает вынужденные колебания. Если возмущающую силу или соответствующий момент представить в виде тригонометрического ряда, тогда уравнение колебаний будет:

$$X'' + 2\rho X' + \omega_0^2 X = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_2 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) ω_0 — угловая скорость свободных колебаний; ω — угловая скорость вынужденных колебаний; $\omega_0^2 = \frac{kg}{G}$ коэффициент гибкости, где k — коэффициент упругости; β — коэффициент затухания; $A = \frac{X'_1}{\omega_0}$; $B = X_0$ — составляющие начальные значения амплитуды свободных колебаний;

$$C = \frac{G}{g} \sqrt{\frac{F}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2 + 4 \frac{\omega^2 \rho^2}{\omega_0^2}}} \quad (5)$$

— амплитуда вынужденных колебаний, где $\gamma = \frac{2\rho}{\omega_0}$; F — возмущающая сила; g — земное ускорение; G — вес вращающейся системы; α — угол между

возмущающей силой и вынужденными колебаниями; $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2}$; $\rho = \frac{ag}{2G}$, где a — коэффициент трения.

$$C_{\max} \approx \frac{F}{2\rho\omega \frac{G}{g}} = \frac{F}{\rho T \frac{k}{\pi}}. \quad (6)$$

Из формулы (4) видно, что резонанс колебаний возникает тогда, когда период одного из членов этого ряда станет равным или кратным периоду свободных колебаний системы, что вполне согласуется с опытом.

Явление, представленное данными табл. 2, можно объяснить следующим образом. Совершенно определенные точки критической скорости, соответствующие условиям резонанса системы, могут иметь место только в том случае, когда жесткость k системы является постоянной. Если же k зависит от перемещения X или от времени t , то явление усложняется. В этом случае вместо определенных критических скоростей существуют определенные области критических скоростей, в пределах которых могут наблюдаться сильные колебания системы. Такое явление в нашем случае обусловлено тем, что упругость пружины горлового подшипника зависит в некоторой степени от перемещения при вращении вала барабана. Известно, что в системах с переменной упругостью, например $k=f(X)$ для случая гармонического колебания, амплитуда колебаний остается всегда конечной (даже при отсутствии сил затухания) и резонанс не наблюдается. В этом случае степень увеличения амплитуды колебания зависит от величины коэффициента упругости, а период свободных колебаний определяется величиной амплитуды.

Из опытных данных видно, что для 6 машин (из 7 исследовавшихся) относительная величина первого пика резонанса на кривой статических моментов оказалась меньше у тех машин, области критических скоростей которых шире. С увеличением веса барабана сепаратора снижается первое критическое число оборотов, увеличивается первый пик резонанса на кривой статических моментов и расширяются близлежащие к нему области биения.

Это явление можно объяснить, опираясь на следующие положения. Максимум кинетической энергии колеблющейся системы при резонансе пропорционален произведению квадратов амплитуды и частоты вынужденных колебаний $C^2 \omega^2$ при неизменной массе. При увеличении веса барабана критическая скорость и соответственно этому критическая частота уменьшаются, как это следует из формулы

$$n_{kp} = 301 \frac{l}{l_1} \sqrt{\frac{k}{G_0}} \text{ или } \omega_{kp} \approx 31 \frac{l}{l_1} \sqrt{\frac{k''}{G_0}}. \quad (7)$$

Сопоставляя эти два положения, можно заключить, что увеличение кинетической энергии колеблющейся системы с повышением веса барабана может произойти только за счет такого увеличения амплитуды вынужденных колебаний C , которое компенсирует явление уменьшения

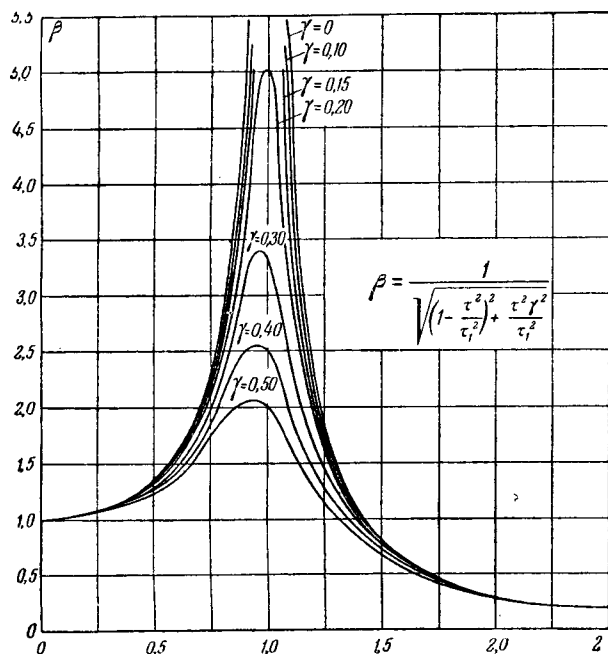


Рис. 7. Коэффициент нарастания амплитуды колебаний в функции отношения периода свободного и вынужденного колебания при различных значениях затухания.

частоты колебаний, соответствующей критическому числу оборотов.

Как видно из формулы (6), $C_{\text{макс}}$ зависит от величины затухания. Величина же затухания, с одной стороны, обратно пропорциональна массе и прямо пропорциональна частоте колебаний, с другой стороны, известно, что в пределах отношения $T_0/T_1 = 0,75 - 1,25$ затухание имеет очень большое влияние на амплитуду вынужденных колебаний (рис. 7). Успокаивающее же действие, связанное с эффектом волчка, при уменьшении скорости проявляется слабее.

Обобщая, можно физическую сущность явления кратко сформулировать так: с увеличением веса барабана в условиях первого резонанса колебаний системы вал — барабан — горловой подшипник уменьшается коэффициент затухания, а возмущающая сила остается без изменения. В результате амплитуда колебаний сильно увеличивается. На кривой статических моментов сепаратора это обуславливает возрастание пиков статических моментов.

Выводы и предложения. Общепринятое представление, что энергия, поступающая на вал привода сепаратора, расходуется только на трение в подшипниках, в зубчатой передаче, вращающихся частей о воздух и жидкость и на процесс, связанный с сепарированием молока, является неполным. Опыт показывает, что энергия расходуется также на механическую вибрацию системы. В процессе разгона сепаратора этот расход энергии в период резонанса колебаний системы и в близлежащих к нему областей биений может оказаться по величине равным или больше суммы всех остальных видов расхода энергии. Наряду и в соответствии с

этим следует принять, как практически доказанное весьма интересное положение о том, что нельзя удовлетвориться существующими представлениями о статическом моменте вообще и статическом моменте сепаратора — в частности. Опыт, подтверждаемый положениями из теории колебаний, показывает, что к существующим в классификации В. К. Попова статическим моментам пяти зависимостям статического момента необходимо добавить еще две зависимости:

1. $M_{\text{см}} = f(\gamma)$ есть функция механических колебаний системы. Примером могут служить применяемые для размешивания бетона электровибраторы и электроустановки для испытания прочности металла при вибрациях.

2. Для всех машин, имеющих относительно большие маховые массы и высокую скорость (к числу которых прежде всего могут быть отнесены все жидкостные сепараторы и родственные им другие центрифуги), статический момент $M_{\text{см}} = f(V, \gamma)$ есть функции скорости и механических колебаний системы.

В условиях неустановившегося режима момент, создаваемый в результате механических колебаний, в период резонанса колебаний системы и в близлежащих к нему областях биений может быть больше суммы всех остальных составляющих статического момента сепараторов в 2 и более раза.

Влияние механической вибрации в данном случае имеет в определенной мере гармонический характер. Оно повторяется в процессе разгона сепараторов 2—3 раза, уменьшаясь по величине с ростом числа оборотов.

Из изложенного следует, что при проектировании электроприводов машин с относительно большим маховым моментом и высоким числом оборотов рабочих органов нельзя пренебрегать моментом, создаваемым механической вибрацией системы, в особенности в период неустановившегося режима работы.

Нами проведен сравнительный анализ кривой статических моментов сепараторов и кривой вращающих моментов асинхронных двигателей малой мощности в функции скорости с учетом возможных различных видов промежуточной связи между двигателем и сепаратором. Результат этого сравнения в обобщенном виде приводится на рис. 8. Как видно из рисунка, наибольшая величина статического момента сепараторов, обусловленная первым резонансом колебания системы машины, приходится как раз на область падения пускового момента и провалов от высших гармоник на кривой вращающих моментов асинхронных короткозамкнутых двигателей, в диапазоне от 0 до 30% и синхронной скорости. В значительной мере именно этим можно объяснить тот факт, что в некоторых типах импортных сепараторов массового выпуска применены однофазные двигатели 330 вт с постоянно включенной емкостью при потребной мощности на валу сепаратора во время работы 45 вт. Наши заводы ставят трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели мощностью

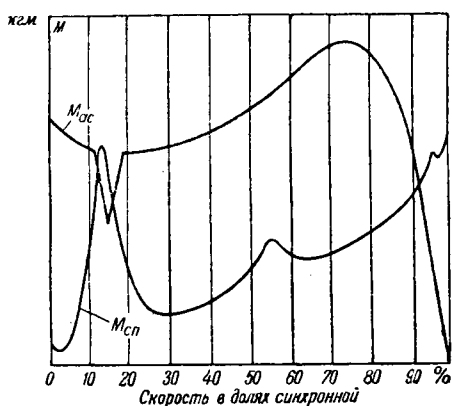


Рис. 8. Обобщенные кривые моментов асинхронных двигателей и сепараторов (M_{cn}).

250—800 вт при потребной мощности на валу сепаратора во время установившегося режима работы 80—120 вт. При этом из условий прочности наиболее слабого звена сепараторов, производительностью до 600 л/час, разгон их до пускается в течение 2—3 мин. Установленные же двигатели разгоняют сепараторы в течение 0,6—1,5 мин. Это влечет за собой преждевременный выход из строя машин и работу электродвигателей при плохих эксплуатационных показателях.

Изложенное приводит к заключению о необходимости сдвинуть вправо первый пик, обусловленный резонансом колебаний системы, на кривой $M_{cm} = f(n)$ сепараторов, т. е. увеличить первую критическую скорость. Однако, это приводит также к заключению о необходимости снижения веса барабана сепаратора, что противоречит установившемуся в сепараторостроении направлению на снижение критической скорости путем увеличения веса барабана. Конструкторы утверждают, что это обеспечивает условия более спокойной работы сепараторов, но проведенная работа этого не подтверждает. Как видно из опыта и теории колебаний, нельзя считать более спокойными условия работы сепараторов, при которых увеличиваются затраты энергии и ухудшаются условия разгона системы электродвигатель — сепаратор.

Из изложенного следует целый ряд практических предложений. При существующей кинематической схеме привода (рис. 2) скорость вала механического привода сепараторов должна быть для всей исследуемой группы машин свыше 150 об/мин, что соответствует критической скорости вала-барабана, равной свыше 2 500 об/мин. В случае отсутствия промежуточной передачи между сепаратором и электродвигателем скорость вала механического привода, соответствующая критическому числу оборотов вала-барабана, должна быть выше следующих значений: при приводе от электродвигателя с синхронной скоростью 1 500 свыше 450 об/мин; $n = 3\,000$, —свыше

900 об/мин. При этом весьма вероятно ожидать уменьшения значений статического момента первого резонанса. К тому же это соответствует скорости асинхронных двигателей, превышающей 30% от n_c , когда вращающий момент их быстро нарастает. Последнее позволяет проходить через критическую скорость при более высоком нарастании скорости вращения, что уменьшает длительность вращения на критической частоте и облегчает разгон сепаратора. При этом окажется возможным осуществить привод сепараторов от асинхронных двигателей нормального исполнения, значительно меньшей мощности.

В заключение можно предложить несколько общих рекомендаций в области конструирования и испытания сепараторов, вытекающих из условий электропривода:

1. Отказаться от снижения первой критической скорости вообще, и в особенности за счет увеличения веса барабана, как от неоправдывающего себя средства.

2. Принять за номинальную скорость сепаратора ту, которая соответствует второму или третьему провалу седла на кривой статических моментов после резонанса колебаний. Это позволит осуществить работу сепараторов в самых спокойных условиях вращения барабана. При выпуске новых сепараторов обязательно проверять их и опытным путем устанавливать номинальное число оборотов.

1. Принять опытную кривую $M_{cm} = f(n)$ за критерий качества сборки, точности изготовления деталей и качества материалов, а величину M_{cm} для установившегося номинального числа оборотов при холостом ходе — за характеристическую постоянную, зависящую от размеров или производительности машины данного типа и конструкции.

4. Считать, что горловой подшипник сепараторов должен иметь переменную упругость в зависимости от перемещения, т. е. $k = f(X) = \text{var}$.

Литература

1. В. К. Попов. Обобщенная классификация нагрузочных диаграмм электропривода. Электричество, № 1—2, 1929.
2. В. К. Попов. Современное состояние общей теории электропривода и ее задачи. Электричество, № 1, 1940.
3. В. К. Попов. Основы электропривода, 1946.
4. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин, т. 1. Под общ. ред. В. П. Горячкина. Статья Гутьяр, стр. 104—197.
5. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин, т. 3. Под редакцией В. П. Горячкина. Статья Г. И. Бремер „Молочные сепараторы“ (Теория и расчет).
6. С. П. Тимошенко. Теория колебаний в инженерном деле. Изд. ОНТИ, 1931.
7. И. Н. Казанцев. Учет механических потерь в уравнении движения электропривода. Электричество, № 9, 1939.
8. А. Н. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях, гл. VIII. Изд. АН СССР, 1933.

[29. 11. 1948]



Моделирование вихревого магнитного поля

Доктор техн. наук, проф. В. А. КАРАСЕВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Один из наиболее распространенных методов вычисления магнитного поля — метод конформных преобразований. При пользовании этим методом часто удается привести граничные условия к достаточно простому виду, и вычисления не оказываются чрезмерно громоздкими. Обычно граничные условия задаются поверхностью ферромагнетика или экрана. В исследуемом пространстве не должно быть токов, иначе метод конформных преобразований, как и любой метод, основанный на интегрировании уравнения Лапласа (представляющего поле без «источников»), становится неприменимым.

В ряде технических задач указанное ограничение неприемлемо. Например, часто бывает необходимо точный учет рассеяния для магнитопровода с зазором, поскольку поток рассеяния соизмерим с потоком в зазоре и даже превышает его. Между тем, все окно обычно заполнено медью, обтекаемой током, и, таким образом, представляет собой почти сплошь вихревое пространство. Попытка вычислений в предположении, что обмотка отсутствует, а поток все же исходит из стали, приводит к ошибкам. Аналогичное положение — при нахождении пазового поля электрической машины, при нахождении поля дополнительных полюсов и в других случаях. Графические методы весьма трудоемки, в особенности при наличии вихревого пространства (и вообще поля с источниками).

В настоящей статье мы рассматриваем лишь двумерные плоскопараллельные поля. Диаметральное сечение цилиндрического поля часто также может быть принято таковым. Пусть токи, параллельные друг другу, текут в направлении оси Z . Обозначим через A — вектор-потенциал, через B — индукцию:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}. \quad (1)$$

Вектор-потенциал A , равный своей проекции A_z , является функцией двух переменных x и y .

Описывается метод моделирования магнитного поля параллельных распределенных токов, создающих вихревую зону. В плоской электролитической ванне моделируется уравнение вектор-потенциала. Источники осуществляются притоком тока с поверхности полупроводников, касающейся поверхности жидкости. Если измеряется средний по глубине слоя жидкости потенциал, то результаты весьма близки к истинным, требующим создания источников в каждой точке по глубине. Описана методика измерений и приведен пример снятого поля.

Уравнение Пуассона дает:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -4\pi\mu\delta, \quad (2)$$

где

μ — магнитная проницаемость;

δ — заданная плотность тока в параллельных проводах.

Рассмотрим условия на границе идеального ферромагнетика с проницаемостью $\mu = \infty$. Повернем оси так, чтобы поверхность раздела шла по оси Y . Тангенциальная составляющая индукции $B_y = 0$. Из (1) имеем $\frac{\partial A}{\partial x} = 0$; это значит, что градиент вектор-потенциала в направлении X (точнее, градиент проекции A_z вектор-потенциала) равен нулю, т. е. нормальная составляющая градиента равна нулю, и этот градиент направлен по поверхности раздела. Возможны и такие условия, что $B_x = 0$ (поверхность раздела — идеальный проводящий экран). Тогда $\frac{\partial A}{\partial y} = 0$, и градиент вектор-потенциала направлен нормально поверхности раздела.

Мы нашли способ применить электролитическую ванну для моделирования поля, выражаемого уравнением (2). Для обычной двухмерной ванны

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0,$$

где φ — потенциал в электролите. Поставим своей задачей воспроизвести в ванне уравнение вида:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{1}{\sigma} \cdot \operatorname{div} i \quad (3)$$

(i — плотность тока двухмерной ванны; σ — объемная удельная проводимость жидкости).

В правой части (3) стоит дивергенция (источник). Каким образом отобразить этот член, превращающий уравнение в уравнение Пуассона?

Опустим в жидкость электрод M (рис. 1) так, чтобы он касался поверхности жидкости; D — непроводящее дно ванны. Где-то в стороне опущены в жидкость другие электроды, о чем

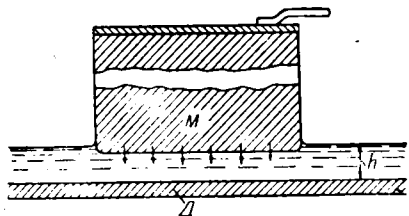


Рис. 1.

подробнее ниже. Электрод M является полупроводником. Его объемное удельное сопротивление ρ_M в несколько десятков раз более объемного удельного сопротивления жидкости $\rho_{ж}$. К верхней металлизированной плоскости электрода подводится напряжение. Таким образом, с поверхности, касающейся жидкости, равномерно стекает ток. Горизонтальная составляющая тока в полупроводнике на порядок отношения $\rho_M: \rho_{ж}$ менее, чем в электролите, и поэтому не искажает равномерности стекания. Суммарный ток равен $\int_V \text{div } i \cdot dV$, где $\text{div } i$ определяется из задания, а интегрирование распространяется на весь объем жидкости под электродом. Требуемую для этого величину стекающего тока нетрудно получить, регулируя напряжение питания.

Однако, уравнение (3) требует, чтобы источник возник в каждой точке объема жидкости, расположенной под электродом, а не только на поверхности жидкости. Оказывается, существуют условия, при которых наш способ создания источника дает эффект, эквивалентный эффекту от идеального источника.

Идеальные условия, как сказано, заключаются в том, чтобы в каждой точке возникал ток $\text{div } i(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz$. Разобьем всю площадку, очерченную контуром сечения электрода, т. е. заданную вихревую зону, на элементы $\Delta x \cdot \Delta y$. Каждый элемент объема жидкости представим в виде круглого цилиндра, имеющего малый радиус $\rho = \frac{\Delta x}{2} = \frac{\Delta y}{2}$ и высоту h , равную глубине слоя жидкости. Из каждого цилиндра должен истекать ток $\text{div } i \cdot 4\rho^2 h = \Delta I \cdot h$, где $4\rho^2$ — площадь элемента. Найдем разность потенциалов между двумя точками, находящимися на произвольных расстояниях x и x_1 от оси элементарного цилиндра. Поле двумерное, и мы имеем

$$\Delta e = \int_{x_1}^x \frac{\Delta I \cdot h}{\sigma} \frac{dx}{2\pi x h} = \frac{\Delta I}{2\pi\sigma} \ln \frac{x}{x_1}. \quad (4)$$

Обратимся теперь к схеме рис. 1. Мы имеем трехмерное поле. Разобьем поверхность электрода на элементы и каждый элемент заменим кругом радиуса $\rho = \frac{\Delta x}{2} = \frac{\Delta y}{2}$.

Рассмотрим один из элементов. С площади $\pi \cdot \rho^2$ этого элемента по условию стекает ток $\Delta I \cdot h$. Вообразим полушар радиуса ρ , диаметральный сечением совпадающий с окружностью элемента. Пусть ток $\Delta I \cdot h$ стекает с поверхности по-

лушара. Найдем поле подобного источника при наличии непроводящего дна и непроводящего пространства над поверхностью жидкости (так как удельное сопротивление электрода много более, чем жидкости, то также и в зоне электрода считаем пространство над жидкостью непроводящим). Произведя серию отображений, получим схему рис. 2 — бесконечную цепь шаров радиуса ρ , удаленных на $2h$ друг от друга, причем каждый шар источает ток $2 \cdot \Delta I \cdot h$.

Уравнение поля каждого k -го шара в отдельности

$$de_k = \frac{\Delta I \cdot h \cdot dr_k}{2\pi\sigma r_k^2},$$

где r_k — расстояние от центра шара. Отсюда

$$e_k = \frac{\Delta I \cdot h}{2\pi\sigma r_k} + C;$$

здесь

$$r_k = \sqrt{(y + kh)^2 + x^2}.$$

Найдем разность средних по высоте потенциалов в двух точках x и x_1 (на рис. 2 показана лишь точка x):

$$\begin{aligned} (\Delta e)_{cp} &= \frac{1}{h} \int_0^h e_k dy - \frac{1}{h} \int_0^h e_{k+1} dy \approx \frac{1}{h} \int_{R_k}^{R_{k+1}} e_k dr - \\ &- \frac{1}{h} \int_{R'_k}^{R'_{k+1}} e_k dr = \frac{-\Delta I}{2\sigma} \ln \frac{R_{k+1} R'_k}{R_k R'_{k+1}}; \end{aligned}$$

$$R_k = \sqrt{(kh)^2 + x^2}; \quad R'_k = \sqrt{(kh)^2 + x_1^2}.$$

Теперь суммируем поля всех шаров:

$$\begin{aligned} (\Delta e)_{cp} &= \sum_{k=0}^{\infty} (\Delta e)_{cp} = \\ &= \frac{-\Delta I}{2\sigma} \ln \frac{(R_1 \cdot R_2 \dots R_n) \cdot (R'_0 \cdot R'_1 \dots R'_{n-1})}{(R_0 \cdot R_1 \dots R_{n-1}) \cdot (R'_1 \cdot R'_2 \dots R'_n)} \end{aligned}$$

при $n \rightarrow \infty$. Таким образом,

$$(\Delta e)_{cp} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta I}{2\pi\sigma} \ln \frac{x \sqrt{x_1^2 + (nh)^2}}{x_1 \sqrt{x^2 + (nh)^2}}.$$

Следовательно, в пределе

$$(\Delta e)_{cp} = \frac{\Delta I}{2\pi\sigma} \cdot \ln \frac{x}{x_1}. \quad (5)$$

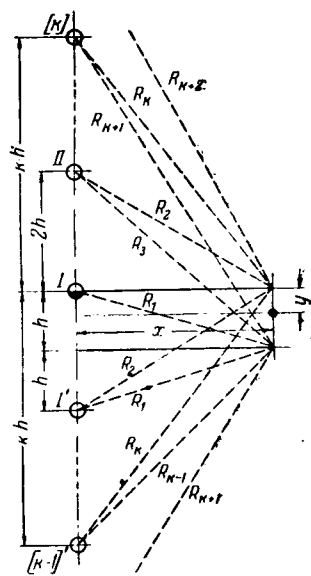


Рис. 2.

Сравнивая (5) с (4), видим, что среднее по высоте значение потенциала реальной схемы функционально эквивалентно двумерному потенциалу идеальной схемы.

Мы рассматривали отдельный элемент $\Delta x \Delta y$. Но, рассуждая по методу наложения, распространяем наш вывод и на всю совокупность токов.

Среднее по высоте напряжение e_{cp} как раз легче всего измерить. Действительно, если опустим вертикально в раствор весьма тонкую иглу, соединенную с непотребляющим ток вольтметром, то с небольшой ошибкой, зависящей от толщины иглы, мы измерим среднее значение того распределения напряжения по высоте, которое было в данной точке до опускания иглы. Сказанное можно пояснить так.

Опустим в слой жидкости столбик из поставленных друг на друга, но взаимно изолированных одинаковых проводящих малых кубиков с ребром a . Каждый кубик примет тот потенциал, который был в занимаемом им объеме до его погружения. На расстоянии λ от столбика, порядка a , опустим иглу, которая настолько тонка и сопротивление ρ_0 входа тока в которую настолько велико, что ее присутствие мало сказывается на потенциалах кубиков. Потенциалы кубиков обозначим $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_m$, потенциал иглы φ . Сумма токов, втекающих в иглу, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^m \frac{\varphi_k - \varphi}{\rho_0} = 0,$$

откуда

$$\varphi = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varphi_k.$$

Теперь установим численные условия, при которых уравнения (2) и (3) эквивалентны. Положим:

$$A = k \cdot \varphi, \quad (6)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Тогда

$$-4\pi\mu\delta = \frac{k}{\sigma} \cdot \operatorname{div} i. \quad (7)$$

Пусть задана система параллельных проводников. Каждый проводник с сечением Q и плотностью тока δ замещаем электродом того же сечения. Полный ток, стекающий с электрода:

$$\begin{aligned} I_Q &= \int_V \operatorname{div} i \cdot dV = h \int_Q \operatorname{div} i \cdot dQ = -\frac{4\pi\mu\sigma h}{k} \int_Q \delta dQ = \\ &= -\frac{4\pi\mu\sigma h}{k} \cdot I^*, \end{aligned}$$

здесь $I^* = \int_Q \delta dQ$ — полный ток заданного проводника.

Установим эквивалентность в граничных условиях. Выше мы определили, что на поверхности ферромагнетика градиент вектор-потенциала A_z направлен по поверхности раздела. Следовательно, и в ванне нужно, чтобы нормальная составляющая градиента потенциала φ равнялась нулю. Это возможно, если поверх-

ность раздела с ферромагнетиком ($\mu = \infty$) замещается поверхностью раздела с непроводником. Аналогично поверхность раздела с идеальным экраном ($\mu = 0$) замещается поверхностью раздела с хорошо проводящим металлом.

Заметим, что часто граничные условия выясняются прямо из условия симметрии: если через плоскость симметрии магнитные линии проходят под прямым углом, то в ванне ее замещает поверхность непроводника; если магнитные линии касаются плоскости симметрии, то в ванне — поверхность металла.

Можно вывести также условия для границы между средами с разными конечными магнитными проницаемостями. Отношение магнитных проницаемостей определяет отношение проводимостей по разные стороны поверхности раздела:

$$\mu' : \mu'' = \sigma' : \sigma''.$$

Переходим к численным соотношениям. Согласно (6) и (1)

$$B_x = k \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad B_y = k \frac{\partial \varphi}{\partial x}.$$

Это значит, что силовые линии B изображаются эквипотенциалами в ванне. Очевидно, что

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2} = k \cdot |\operatorname{grad} \varphi|.$$

В конкретных случаях часто требуется подсчет потокосцеплений. Пусть задан весьма тонкий проводник M' . Будем рассматривать двухмерное поле, образованное этим проводником и другим тонким одиночным проводником N' , обтекаемым равным током обратного направления. Потокосцеплением J является поток индукции, пронизывающий $M'N'$:

$$J = \int_{(M')}^{(N')} B \cdot dl.$$

(интегрирование — по кривой, каждый элемент которой перпендикулярен вектору индукции B , т. е. эта кривая — силовая линия поля ванны φ). Из (9)

$$J = k \int_{(M')}^{(N')} \operatorname{grad} \varphi \cdot dl = k (\varphi_{N'} - \varphi_{M'}) = k \cdot \Delta \varphi.$$

Следовательно, потокосцепление измеряется непосредственно разностью потенциалов.

При распределенном токе $\delta(x, y)$ потокосцепление вычисляется как интеграл $\int dy \int dx \times \Delta \varphi(x, y)$, и здесь уже нужен съем картины поля.

Если сечение провода в ванне заместить не полупроводником, а металлом, то получим картину такую, как если бы ток занимал лишь поверхность проводника. В частности, если задан ток весьма высокой частоты, а проводник сплошной, то получается точная аналогия с явлением поверхностного эффекта. Заметим, что нельзя было бы заменить поверхность полупроводника M системой тонких проволок, вертикально погруженных в электролит и источающих ток. Если проволоки расположены густо, то изменяется средняя проводимость жидкости в зоне тока, между тем как магнитная проницаемость от наличия тока не зависит. Если же проволоки, со-

ставляющие электрод, очень редки и тонки, то растет потенциал электрода, следовательно, замеряется преувеличенный поток. Вычисляемая индуктивность может оказаться при этом в несколько раз более истинной.

В полной системе заданных параллельных проводников алгебраическая сумма токов равна нулю (свойство замкнутости контура тока). Часто расположение токов разных знаков симметрично (в частности, для тел вращения). В таком случае между ними можно провести плоскость симметрии. На этой плоскости магнитные силовые линии будут с ней совпадать. Значит в ванне эта плоскость должна быть эквипотенциальной поверхностью, и ее можно отобразить металлом, являющимся вторым электродом.

Опишем кратко применявшуюся измерительную схему. На рис. 3 буквой M обозначен электрод-полупроводник. Его верхняя поверхность шоопирована. Показан случай, когда противоположный электрод N — металлический. В отверстие в электроде M продета игла m , изолированная от электрода. $R_a - R_b$ — потенциометр; x — подвижной зонд. Усилитель $У$ усиливает разность напряжения между средней точкой моста и зондом. Баланс устанавливается по минимуму напряжения индикатора (вольтметра) $И$. Точность повышается, если остаточную индуктивность магазинов и паразитные емкости компенсировать подобранной емкостью, параллельной одному из магазинов.

Игла m должна быть расположена, по возможности, там, где ожидается наивысший потенциал. Если заданных проводов несколько, то игла может располагаться и между электродами. Точка наивысшего потенциала определяется перемещением иглы m при неподвижном зонде x и отысканием максимума отношения $R_a : R_b$.

Ток утечки от m к точке n должен быть минимальным. Поэтому $R_a + R_b$ должно быть достаточно большим, а усиление усилителя — соответственно высоким. Однако, можно точку m включить на входную отрицательную сетку специальной электронной схемы, на выходе которой получается напряжение, равное входному („катодный повторитель“).

В наших опытах схема питалась напряжением частоты 50 гц; в качестве электролита применялся раствор $NaCl$. Плотность тока на электродах была не выше 10 ма/см^2 . Для получения точных результатов электроды время от времени зачищались; необходимость зачистки выявлялась и появлением несовпадения при возвращении к обмеру уже взятой точки. Схема требует тщательной экранировки. Опыты с коаксиальными круглыми электродами показали, что при соблюдении всех мер предосторожности измерения дают ошибку не более 3% по отношению к вычисленным значениям.

Для иллюстрации приводим результат обмера

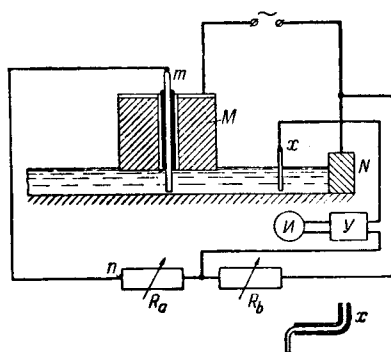
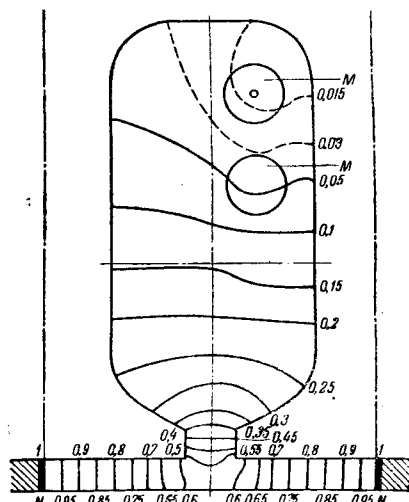


Рис. 3.

Рис. 4.



поля в пазу (рис. 4). Контуры зубцов, а также нижняя кромка (ротор) образованы полостью, выпиленной в текстолите, приклеенном к стеклу. N — металлические электроды, соединенные параллельно. Заданные токи были отображены одинаковыми графито-керамическими сопротивлениями M по 4000 ом (диаметр 23 мм , высота 18 мм ; удельное объемное сопротивление $8800 \text{ ом} \cdot \text{см}$), своими шоопированными плоскостями соединенными параллельно. Сопротивления, которыми мы пользовались в работе, отличающиеся стабильностью и негигроскопичностью, разработаны и изготовлены В. И. Пружининой. Глубина слоя жидкости 5 мм , удельное объемное сопротивление ее $200 \text{ ом} \cdot \text{см}$; коэффициент усиления усилителя 1500 .

Силовые линии поля помечены на рис. 4 значениями отношений соответствующего потенциала к общей разности потенциалов на мосте. Другими словами, цифры выражают функцию потока. Потенциометр, составленный из магазинов сопротивлений, имел $R_a + R_b \approx 100 \text{ ком}$.

Ванна устанавливалась на микрометренных винтах. Правильный уровень определялся следующим способом: два одинаковых коаксиально-цилиндрических двухэлектродных эталона опускались в жидкость до дна в разных местах и с помощью мостовой схемы сопротивления их подгонялись к взаимному равенству вращением микрометренных винтов. При этом, как и при самом опыте, жидкость часто перемешивалась.

Описанная ванна может быть применена и для нахождения электрического поля с пространственными зарядами и вообще для всех задач, характеризующихся уравнением Пуассона.

Часто при системе пространственных зарядов и поверхностей перехода в виде коаксиальных поверхностей вращения нельзя даже приблизительно ограничиться рассмотрением плоской задачи. В таком случае не существует других выполнимых методов решения, кроме предлагаемого. Действительно, все силовые линии находятся в радиальных плоскостях. Поэтому достаточно наклонить дно ванны так, чтобы пересечение с продолженным уровнем жидкости пришлось на оси вращения.

Нелинейный элемент расчетного стола переменного тока

Кандидат техн. наук С. С. ЧУГУНОВ

Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР

Методы анализа и синтеза как пассивных, так и активных электрических линейных двухполюсников общезвестны. Эквивалентные схемы, построенные с использованием таких двухполюсников, позволяют решать широкий класс задач, относящихся к динамическим системам различной

физической природы. Однако, имеются области, где нельзя, по существу, свести дело к линейным двухполюсникам. В частности, применение нелинейных двухполюсников с надлежащим образом реализованными характеристиками необходимо при решении методом эквивалентных электрических схем многих задач проектирования и расчета систем автоматического регулирования, электромеханических, электронных, тепловых, гидродинамических и других устройств.

Для эффективного решения указанных задач в Энергетическом институте Академии наук СССР было построено универсальное электрическое вычислительное устройство — расчетный стол [Л. 1].

Для расширения возможностей универсального расчетного стола ЭНИН было решено дополнить его некоторым числом нелинейных и усилительных элементов. С этой целью нами под руководством И. С. Брука был рассмотрен и исследован ряд вариантов выполнения таких элементов. В настоящей статье дается описание принципа работы, схемы и конструкции нелинейного двухполюсника, разработанного автором, примененного для указанной выше цели и названного нами АРН (сокращение от слов «авторегулируемая нагрузка»). Усилительный элемент (элемент детектирующей связи) будет описан в одной из следующих статей, посвященных расчетному столу ЭНИН.

Вольтамперная характеристика элемента АРН для эффективных значений тока и напряжения представляет собою прямую, уравнение которой имеет вид $I = I_0 + YU$. Величина начального тока I_0 и крутизна Y устанавливаются произвольно, причем им могут быть приданы как положитель-

Описывается нелинейный элемент (авторегулируемая нагрузка), разработанный автором для расчетного стола переменного тока Энергетического института Академии наук СССР. Этот элемент используется для замещения в эквивалентных схемах объектов, обладающих нелинейной вольтамперной характеристикой для эффективных значений тока и напряжения. Он может работать, в частности, как: отрицательное активное сопротивление — R , идеальная индуктивность L (без потерь и не зависящая от тока), генератор или нагрузка с током $I = \text{const}$ активного или реактивного характера. Принцип и схема описанного элемента могут быть использованы также для других целей.

ные, так и отрицательные значения. Путем изменения установки Y и I_0 имеется возможность воспроизвести с известной степенью точности заданную зависимость $I = f(U)$ в некотором интервале напряжений $U_0 \pm \Delta U$ (рис. 1).

Пусть, например, зависимость $I = f(U)$ задана кривой, изображенной

на рис. 1. В некотором интервале напряжений вблизи точки $U = U_{01}$, эта кривая приближается к касательной A с положительной крутизной $Y_1 = \text{tg } \alpha_1$ и отрицательным начальным током I_{01} . Уравнение касательной A имеет вид $I = -I_{01} + Y_1 \cdot U$. Вблизи точки $U = U_{02}$ кривая приближается к прямой B , для которой $I = I_{02} = \text{const}$, вблизи точки $U = U_{03}$ — к прямой B , описываемой уравнением $I = I_{03} - Y_3 U$ и т. д.

Очевидно, что точность приближения будет зависеть от величины второй производной кривой вблизи выбранной точки U_0 и от величины отклонения фактического напряжения U от напряжения U_0 .

В начале работы точка U_0 выбирается ориентировочно, так как величина напряжения U на элементе АРН заранее неизвестна. В дальнейшем, по мере необходимости, путем последовательных приближений имеется возможность принципиально с любой степенью точности приблизиться к величине фактического напряжения U . Для этого измеряется напряжение на элементе АРН и соответственно изменяется установка крутизны Y и начального тока I_0 .

Элемент АРН можно также рассматривать как параллельное соединение элемента с током $I' = I_0 = \text{const}$ и линейного элемента с проводимостью Y , через который протекает ток $I'' = Y \cdot U$, находящийся в фазе с током I' ; полный ток элемента АРН есть алгебраическая сумма двух токов I' и I'' .

Для имитации нелинейных элементов исследуемой системы, активная и реактивная состав-

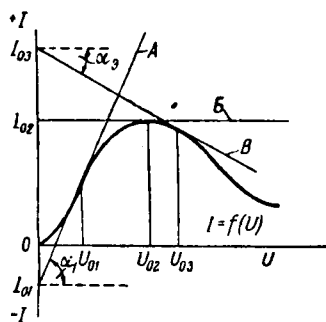


Рис. 1. Аппроксимация участков заданной вольт-амперной характеристики $I = f(U)$ вольт-амперной характеристикой элемента АРН вида $I = I_0 + Y \cdot U$.

ляющие тока которых по-разному зависят от напряжения, используются по два отдельных элемента АРН: один для активной составляющей, ток которого находится в фазе с напряжением, и другой для реактивной составляющей с током, отстающим от напряжения на 90° . В каждом элементе устанавливаются соответствующие значения I_0 и Y .

С целью расширения эксплуатационных возможностей элементы АРН осуществляются так, что каждый из них может быть использован либо как активный, либо как реактивный, что достигается поворотом фазы тока в элементе на -90° . Кроме того, в элементе АРН предусмотрена возможность поворота фазы текущего через него тока на 180° .

Элемент АРН может быть также применен в качестве:

1) элемента, в котором протекает ток $I = I_0 = \text{const}$, совпадающий по фазе с напряжением, т. е. активного сопротивления (нагрузки), ток через которое не зависит от величины приложенного напряжения;

2) элемента, в котором протекает ток $I = I_0 = \text{const}$, сдвинутый относительно напряжения на 180° , т. е. генератора активного тока, не зависящего от величины напряжения на его зажимах;

3) обычного элемента R с линейной характеристикой;

4) элемента $-R$ с линейной характеристикой т. е. в качестве отрицательного сопротивления (или отрицательной проводимости);

5) элемента, в котором протекает ток $I = I_0 = \text{const}$, опережающий приложенное напряжение на 90° , т. е. в качестве емкости, ток через которую не зависит от величины приложенного напряжения;

6) элемента, в котором протекает ток $I = I_0 = \text{const}$, отстающий от приложенного напряжения на 90° , т. е. в качестве индуктивности, ток через которую не зависит от величины приложенного напряжения;

7) обычного элемента C с линейной характеристикой;

8) обычного элемента L с линейной характеристикой.

Использование элемента АРН взамен обычного элемента R или C не представляет интереса, поскольку в расчетном столе имеются элементы R и C с достаточно удовлетворительными характеристиками. Остальные указанные выше частные случаи использования элемента АРН

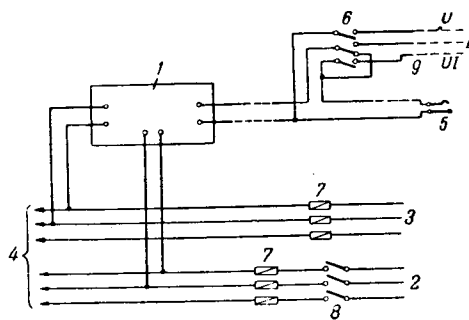


Рис. 2. Принципиальная схема включения элемента АРН в расчетном столе ЭНИН.

1 — элемент АРН; 2 — шины питания 400 в; 3 — шины питания 220 в; 4 — к другим элементам АРН; 5 — двухпроводный штепсель на коммутационном поле для включения элемента в исследуемую схему; 6 — исполнительное реле для подключения элемента к измерительным шинам; 7 — предохранители; 8 — контактор (управляемый кнопками, расположенными на пульте); 9 — измерительные шины.

значительно расширяют возможности расчетного стола. Например, в расчетном столе имеются элементы L дросселя. Однако, их индуктивность в некоторой степени зависит от тока и в них рассеивается некоторое количество энергии; в тех случаях, когда эти недостатки играют существенную роль, можно использовать элемент АРН, работающий как элемент L , но свободный от указанных недостатков.

Принципиальная схема включения элемента АРН в расчетном столе приведена на рис. 2. Помимо силового питания на элементы АРН подается контрольное напряжение от шин 400 в, питающих генераторные единицы расчетного стола. Напряжение на этих шинах переключается с 220 на 110 и 55 в с пульта управления и измерений. Изменение контрольного напряжения необходимо для того, чтобы при понижении уровня всех напряжений в исследуемой схеме в 2 или 4 раза одновременно уменьшилась в 2 или 4 раза величина начального тока I_0 в элементе АРН.

Все управление элементом АРН осуществляется с помощью ключей. Набор величин I_0 и Y производится по декадному принципу: отношение цен ключей декады 1:2:2:5. Для набора величины I_0 имеется три декады по 4 ключа, всего 12 ключей. Величина I_0 выражается в процентах от номинала, принятого на расчетном столе за единицу (100% $I = 50 \text{ ма}$). Для набора Y имеется две декады из 7 ключей. Величина Y также выражается в процентах от номинала, принятого на расчетном столе за единицу (100% $Y = 0,001 \text{ мо} = 1 \text{ ма/в}$). Изменение знака I_0 производится с помощью ключа I_0 , имеющего три положения: „+“, „—“ и среднее положение ($I_0 = 0$). Изменение знака Y производится с помощью ключа „Y“, имеющего также три положения: „+“, „—“ и среднее положение ($Y = 0$). Для переключения фазы тока элемента служит ключ φ на два положения: $\varphi = 0$ и $\varphi = -90^\circ$; при нижнем положении ключа ($\varphi = 0$) элемент АРН действует как активный, при верхнем ($\varphi = -90^\circ$) — как реактивный. Переключение направления тока I элемента АРН и отключение элемента от его штепселя на ком-

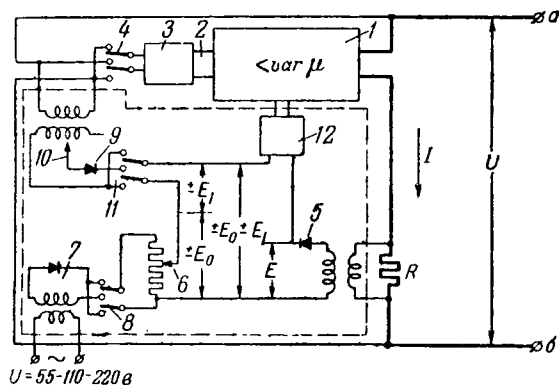


Рис. 3. Скелетная схема элемента АРН.

мутационном поле, т. е. от исследуемой схемы, производится с помощью ключа I на три положения: вверх „—“, вниз „+“ и среднее положение — элемент отключен от схемы. Для включения и выключения питания элемента имеется ключ, находящийся в центре и имеющий два положения: включено — выключено.

Основные электрические данные элемента АРН:

1) максимальное напряжение на зажимах элемента $U_{\text{макс}} = 150\%$ (75 в);

2) максимальный ток через элемент $I_{\text{макс}} = 200\%$ (100 ма) при напряжении U от 40 до 150% (от 20 до 75 в);

3) при напряжении $U \leq 40\%$ максимальный ток $I_{\text{макс}} = 5 \cdot U\%$. Например: при $U = 20\%$, $I_{\text{макс}} = 5 \cdot 20\% = 100\%$;

4) максимальная устанавливаемая величина $I_0 = 1110\%$ (355 ма) с переключением ступенями через 1% (0,5 ма);

5) максимальная устанавливаемая величина $Y = 600\%$ (0,006 мо = 6 ма/в) с переключением ступенями через 10% (0,0001 мо = 0,1 ма/в).

Скелетная схема элемента АРН приведена на рис. 3. К зажимам a и b элемента АРН подключен через постоянное сопротивление R выход усилителя I с автоматически регулируемым коэффициентом усиления. Ток I на выходе усилителя, т. е. ток, потребляемый или генерируемый элементом АРН, пропорционален коэффициенту усиления μ усилителя I и находится в фазе с напряжением на входных зажимах 2 этого усилителя. На входные зажимы 2 подается напряжение U с зажимов a и b через фазовый мостик 3 , который служит для изменения фазы напряжения на входе усилителя, а следовательно, и тока I , на -90° (при работе элемента АРН как реактивного). Переключение направления тока I на обратное производится переключателем 4 .

Ток I , потребляемый или генерируемый элементом АРН, контролируется и автоматически поддерживается равным заданной величине $I = I_0 + YU$ с помощью специальной схемы автоматического регулирования усиления (АРУ), обведенной на рис. 4 пунктиром и действующей по следующему принципу.

Падение напряжения на сопротивлении R ,

создаваемое током I , выпрямляется выпрямителем 5 . Полученное постоянное напряжение E сравнивается с противоположным по знаку напряжением, являющимся суммой двух других напряжений: E_0 и E_1 . Напряжение E_0 снимается с делителя напряжения 6 , по которому протекает ток от выпрямителя 7 , питающегося стабильным напряжением с шин 400 в, 220 — 110 — 55 в. Делитель 6 градуирован в процентах начального тока и на нем устанавливается заданная величина I_0 . Таким образом, напряжением E_0 постоянно и пропорционально устанавливаемой величине I_0 . Для изменения знака E_0 , что эквивалентно изменению знака I_0 , служит переключатель 8 . Напряжение E_1 , пропорциональное напряжению U на зажимах элемента АРН, получается от выпрямителя 9 , питающегося напряжением U от зажимов a и b . Коэффициент пропорциональности, соответствующий необходимой проводимости Y , устанавливается переключателем 10 , градуированным в процентах проводимости. Таким образом, напряжение E_1 пропорционально $Y \cdot U$. Для изменения знака E_1 , что эквивалентно изменению знака проводимости Y , служит переключатель 11 . Суммарное напряжение $E_0 + E_1$ получается пропорциональным величине $I_0 + Y \cdot U$. Разность ΔE между напряжениями E и $E_0 + E_1$, усиленная усилителем постоянного тока 12 , управляет коэффициентом усиления усилителя I , а следовательно, и током I . При изменении U или изменении установки величин I_0 или Y ток I соответственно меняется таким образом, чтобы разность $\Delta E = (E_0 + E_1) - E$ стремилась к нулю и, следовательно, чтобы ток I с достаточной степенью точности поддерживался все время равным заданной величине $I_0 + Y \cdot U$.

Соответствующим подбором величин напряжений и усиления усилителя 12 точность регулирования величины тока I может быть получена не меньшая, чем 0,2%, при любом режиме в указанных ранее пределах работы элемента АРН.

Принципиальная схема элемента АРН изображена на рис. 4. В соответствии со скелетной схемой (рис. 3) основные узлы принципиальной схемы на рис. 4 обозначены теми же цифрами.

Основной усилитель I состоит из трех каскадов: первого каскада варимю на лампе L_1 , второго драйверного каскада на лампе L_2 и третьего выходного каскада, собранного по двухтактной схеме на лампах L_3 и L_4 с выходным трансформатором $T1$. Вторичная обмотка $T1$ включена последовательно с сопротивлением R на зажимы a и b элемента АРН через ключ $4P_1$, меняющий фазу тока I на 180° и разрывающий цепь элемента АРН при установке в среднее положение. Выходной каскад усилителя I должен обладать большим сопротивлением для внешнего напряжения, приложенного к зажимам элемента АРН. Поэтому в качестве выходных ламп L_3 и L_4 взяты лучевые пентоды с большим внутренним сопротивлением, а выходной трансформатор $T1$ изготовлен с малым током холостого

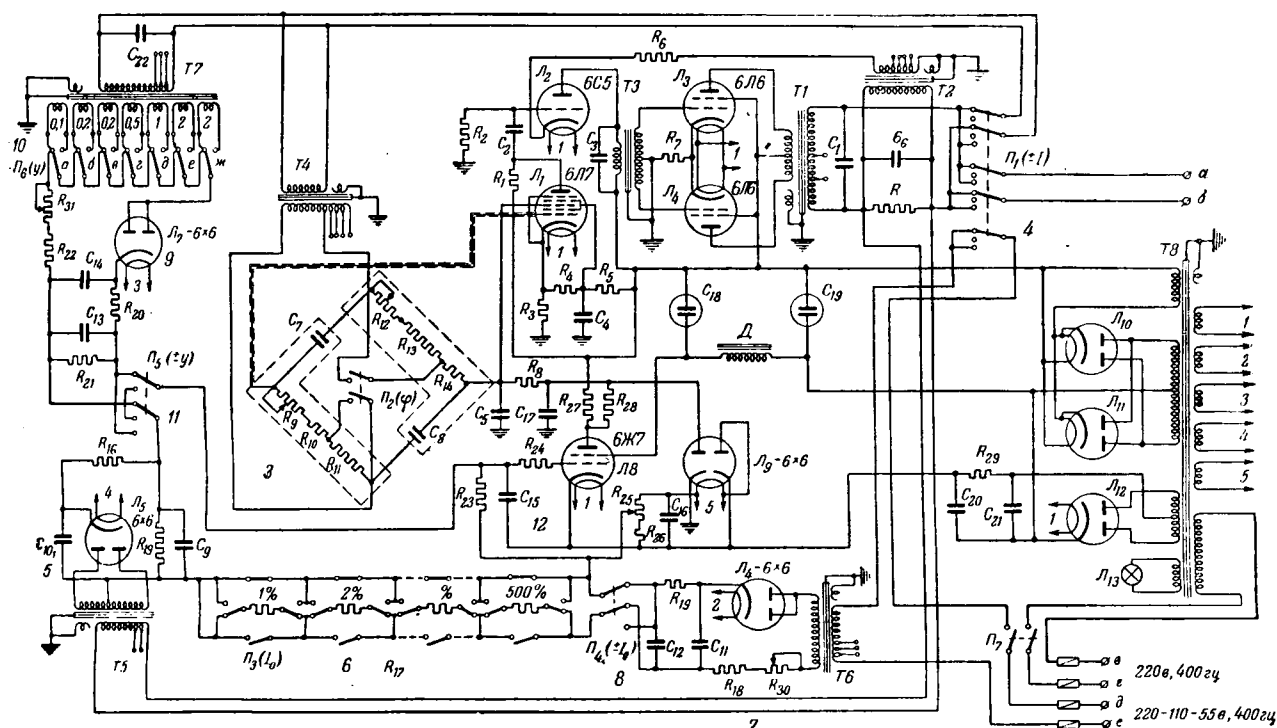


Рис. 4. Принципиальная схема элемента АРН.

хода. Для компенсации индуктивности вторичная обмотка трансформатора настроена конденсатором C_1 на частоту 400 гц.

Для улучшения формы кривой тока I , стабилизации его фазы и главное для дальнейшего уменьшения паразитного тока, текущего через вторичную обмотку трансформатора $T1$ при запертой входной лампе Λ_1 под воздействием внешнего напряжения, приложенного к зажимам элемента АРН, в схеме усилителя применена глубокая негативная связь. Эта связь играет в схеме элемента АРН существенную роль. Она осуществляется по току I , текущему через сопротивление R , и подается с сопротивления через трансформатор $T2$ на катод второго каскада усилителя. Таким образом, обратная связь захватывает весь тракт усилителя кроме входной лампы варимую Λ_1 , регулирующей усиление.

Для компенсации индуктивности, шунтирующей сопротивление R , т. е. для выравнивания фазы между током I и напряжением на сопротивлении R , последнее шунтируется конденсатором C_6 . Экранное напряжение лампы Λ_1 и начальное смещение ее сеток снимаются с делителя $R_3-R_4-R_5$. Напряжение автоматической регулировки усиления (напряжение АРУ) подается через сопротивление развязки R_8 с конденсатором развязки C_5 .

Входное напряжение на вход 2 усилителя подается с зажимов a и b через ключ $4\Pi_1$, служащий для изменения фазы тока I на 180° , через изолирующий входной трансформатор $T4$ и фазовый мостик с ключом Π_2 для поворота фазы на -90° . Фазовый мостик $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}, C_7$ и C_8 служит одновременно для поворота фазы на -90° и коррекции фазы всего

тракта элемента АРН. Нужная фаза тока I грубо подбирается параметрами мостика. Для точной коррекции фазы тока I (в небольших пределах) служат два переменных сопротивления R_9 и R_{12} , расположенные внутри элемента АРН и регулируемые отверткой. Одно из них (R_9) служит для коррекции фазы при установке ключа $3\Pi_2$ в положение $\varphi=0$, второе (R_{12}) — при установке в положение $\varphi=-90^\circ$.

Напряжение E для цепи АРУ, пропорциональное току I , получается от выпрямительного устройства 5, состоящего из трансформатора $T5$, лампы Λ_5 и фильтра R_{16}, C_9 и C_{10} с разрядным сопротивлением R_{15} .

Напряжение $\pm E_0$ для цепи АРУ, пропорциональное устанавливаемому значению $\pm I_0$, снимается с потенциометра $6-R_{17}$. Потенциометр $6-R_{17}$ позволяет производить набор величины напряжения по декадному принципу с помощью двенадцати ключей Π_3 . Каждая декада потенциометра составляется из четырех сопротивлений с отношением $1:2:2:5$. Сопротивления потенциометра и напряжение его питания подобраны так, чтобы иметь градуировку для I_0 в процентах от номинала, принятого на расчетном столе ($100\% I=50$ ма). Постоянное напряжение на потенциометр подается от выпрямительного устройства 7 через ключ $8\Pi_4$ для перемены знака I_0 .

Выпрямительное устройство 7 состоит из трансформатора $T6$, лампы Λ_6 , подгоночного сопротивления R_{18} и фильтра R_{18}, C_{11} и C_{12} . Трансформатор $T6$ питается стабильным контрольным напряжением 220—110—55 в, 400 гц от шин питания генераторных единиц расчетного стола.

Грубая подгонка градуировки I_0 (величины

напряжения E_0) производится переключением на разные отпайки первичной обмотки T_6 . Для точной коррекции градуировки I_0 служит реостат R_{30} , регулируемый при настройке с помощью отвертки.

Напряжение $\pm E_1$ для цепи АРУ пропорционально устанавливаемой величине $\pm Y$ и напряжению U на зажимах элемента АРН. Оно получается от выпрямителя 9 (лампа L_7) с фильтром R_{20} , C_{13} и C_{14} , через ключ III_5 , служащий для перемены знака Y . Сопротивление R_{21} играет роль разрядного для конденсаторов фильтра C_{13} и C_{14} .

Выпрямитель 9 L_7 питается от зажимов a и b элемента АРН через трансформатор T_7 . Трансформатор T_7 имеет секционированную вторичную обмотку, переключающуюся ключами $10П_6$. Схема переключений секций позволяет производить установку величины Y по декадному принципу при минимальном количестве секций и ключей, по четыре на каждую декаду, с отношением напряжений 1:2:2:5. Числа витков секций и коэффициент трансформации трансформатора T_7 подобраны так, чтобы иметь для Y градуировку в процентах от номинала, принятого на расчетном столе ($100\% Y = 0,001 \text{ мв} = 1 \text{ ма/в}$).

Грубая подгонка градуировки Y (величины напряжения E_1) производится переключением на разные отпайки первичной обмотки T_7 . Для точной коррекции градуировки Y служит реостат R_{31} , регулируемый при настройке с помощью отвертки.

Разность напряжений ΔE между алгебраической суммой $\pm E_0 \pm E_1$ и напряжением E подается через ограничивающее сопротивление R_{24} с развязывающей емкостью C_{15} на сетку усилителя постоянного тока 12 в цепи АРУ. Роль усилителя постоянного тока 12 играет лампа L_8 (пентод с большим коэффициентом усиления), на катод которой подается отрицательное напряжение — 75 в. Начальное рабочее смещение на сетку лампы L_8 получается от выпрямителя (правой половины двойного диода L_9), питающегося напряжением от цепи накала 6,3 в.

Для установки величины смещения на сетку L_8 и тем самым для коррекции в небольших пределах автоматически регулируемой величины тока I служит потенциометр R_{25} , регулируемый при настройке с помощью отвертки.

Усиленная разность напряжений ΔE , получающаяся между анодом лампы L_8 и землей (отрицательное напряжение АРУ), подается через сопротивление R_{28} и развязку R_8 , C_5 на сетки

лампы варимю L_1 и автоматически регулирует ее усиление от максимального значения до нуля. Во избежание подачи на сетки лампы L_1 положительного напряжения АРУ, могущего нарушить нормальный режим работы схемы, предусмотрен диод (левая половина лампы L_9), закорачивающий на землю цепь напряжения АРУ при положительном напряжении на аноде лампы L_8 относительно земли.

Питание анодных цепей усилительных ламп (+250 в) производится от выпрямителя на лампах L_{10} и L_{11} с силовым трансформатором T_8 . Отрицательное напряжение 75 в получается от вспомогательного выпрямителя L_{12} . Питание силового трансформатора T_8 производится от шин 220 в, 400 гц через выключатель питания $П_7$.

Трансформаторы T_4 и T_7 питаются от зажимов a и b элемента АРН. Потребляемый ими ток добавляется к току I элемента АРН, причем он не контролируется цепями негативной обратной связи и автоматической регулировки. Поэтому при осуществлении схемы элемента АРН приняты меры к снижению потребления трансформаторов T_4 и T_7 до практически допустимой величины менее, 0,5%, путем снижения их тока холостого хода, уменьшения нагрузки и компенсации реактивной составляющей тока конденсатором C_{22} .

Все трансформаторы имеют заземленные экраны между первичными и вторичными обмотками, предназначенные для устранения паразитных емкостных связей между зажимами a и b элемента АРН, т. е. схемой, собранной на расчетном столе, схемой самого элемента АРН и шинами питания.

В заключение необходимо отметить, что описанный нелинейный элемент, разработанный для расчетного стола ЭНИИ, представляет интерес не только для целей замещения объектов, обладающих нелинейной вольтамперной характеристикой при анализе и расчетах динамических систем методом эквивалентных схем. Его принцип и схема могут быть с успехом использованы также для многих других научно-исследовательских и технических применений.

В разработке элемента АРН большое участие принимал старший лаборант П. П. Пономарев, выполнявший все экспериментальные и наладочные работы.

Литература

1. И. С. Брук, М. С. Либкинд и С. С. Чугунов. Расчетный стол переменного тока. Электричество, № 1, 1948.

[15. 5. 1948]



Применение дифференциальных уравнений длинных линий к расчету протяженных заземлителей

Доктор техн. наук, проф. М. А. БАБИКОВ и кандидат техн. наук, доц. Н. С. КОМАРОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Идея применения дифференциальных уравнений длинных линий к расчету протяженных заземлителей впервые была высказана Л. И. Сиротинским [Л. 1].

Целесообразность применения дифференциальных уравнений длинных линий для анализа физической сущности явлений и приближенных расчетов протяженных заземлителей при воздействии на них импульсов не вызывает сомнений. Практическая ценность конечных выражений, вытекающих из дифференциальных уравнений длинных линий, определяется степенью точности усредненных значений R , L , C и G ; поэтому стремятся определить эти параметры с возможно большей точностью.

Пользуясь экспериментальными данными ХЭТИ [Л. 2] и МЭИ, мы поставили себе целью использовать идею Л. И. Сиротинского к разработке приближенного метода расчета протяженных заземлителей и попытаться дать обоснования усредненных достаточно точных для практики значений R , L , C и G .

При решении поставленной задачи мы сделали следующие важные допущения. Прежде всего протяженный заземлитель был заменен

Излагается новый метод расчета протяженных заземлителей с помощью дифференциальных уравнений длинных линий, пригодный для практического использования при проектировании защиты электроустановок от перенапряжений. Устанавливаются средние величины параметров R , L , C и G . Экспериментальные параметры сравниваются с расчетными. Исследуется характер изменения импульсного сопротивления протяженного заземлителя в зависимости от времени. Определяются средние значения импульсных токов и крутизны. На конкретном примере показывается ход расчета.

эквивалентной линией с распределенными постоянными. В отличие от применявшихся схем замещения все распределенные постоянные протяженного заземлителя были нами приняты усредненными. Емкость протяженного заземлителя при удельном сопротивлении $\rho < 10^5 \text{ ом} \times$

$\times \text{см}$ не учитывалась. Основными параметрами схемы замещения принимались индуктивность L , сопротивление R и проводимость G . Первые две величины находились по уравнениям длинных линий. Проводимость грунта G определялась из опытной кривой $G=f(E)$, где E — градиент в начале заземлителя.

Установление средних величин параметров L , C , R и G . Выбор коэффициента самоиндукции L . Коэффициент самоиндукции медного протяженного заземлителя на единицу длины можно определить из уравнения

$$L = 0,2 \ln \frac{l}{r} \text{ мкГн/м,}$$

где l — длина протяженного заземлителя, заложенного в грунт;
 r — радиус провода.

При $l=20$ и 40 м и $r=0,5 \text{ см}$, $l=1,6$ и $1,8 \text{ мкГн/м}$.

Коэффициент самоиндукции ферромагнитных проводников складывается из внешней $L_{\text{вн}}$ и внутренней $L_{\text{внут}}$ индуктивностей. $L_{\text{вн}}$ может быть определено по геометрическим размерам и форме проводника или путем испытания медного провода. $L_{\text{внут}}$, зависящее от магнитной проницаемости μ и частоты, определяется опытным путем.

Опыты проводились по схеме рис. 1. Конденсатор C заряжался до некоторого напряжения, равного расстоянию запального разрядника $ЗР$. После наступления пробоя на этом разряднике конденсатор разряжался на проводник с

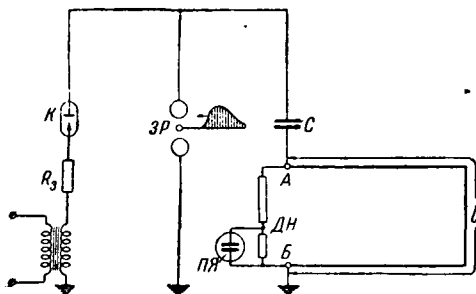


Рис. 1. Схема для определения индуктивности тросов. ЗР — запальный разрядник; С — конденсатор; ДН — делитель напряжения; ПЯ — пластины явления осциллографа; К — кенотрон; R_3 — защитное сопротивление; А — начало троса; Б — конец троса.

определенной длиной и диаметром. Поскольку проводник обладает индуктивностью и активным сопротивлением, то процесс разряда протекает в форме колебаний с некоторым затуханием.

Осциллограммы изменения напряжения по времени снимались при приключении пластин явления ПЯ катодного осциллографа между началом и концом проводника. По полученным осциллограммам определялся период колебания T , и результирующая индуктивность (L_p) находилась из выражения $T = 2\pi\sqrt{L_p I}$.

Разделение индуктивностей производилось следующим образом. В схему рис. 1 включался медный трос, и из полученной осциллограммы определялись напряжение, период, а затем и индуктивность медного провода. Так как μ меди равно единице, то найденная таким образом индуктивность является внешней. Далее медный провод замещался железным или стальным и все остальные элементы схемы и подводимое напряжение оставались прежними. По полученным осциллограммам определялась общая индуктивность как железного, так и стального троса. Вычитая отсюда индуктивность медного троса, получали внутреннюю индуктивность стали или железа.

В табл. 1 сведены величины $L_{вн}$ и $L_{внут}$, а также полученные крутизны тока. Средние крутизны при квазистационарном процессе определялись с помощью выражения

$$\begin{aligned} \left(\frac{di}{dt}\right)_{cp} &= \frac{4}{T} \int_0^T \frac{di}{dt} dt = \\ &= \frac{4}{T} i_{\max} \omega \int_0^T \cos \omega t \cdot dt = 4 I_{\max} f. \end{aligned}$$

Из табл. 1 видно, что индуктивность стальных и железных протяженных заземлителей на 12—15% больше индуктивности медных заземлителей ($L = 1,8 \div 1,9$ мкГн/м).

Выбор емкости C . Мы нашли, что при $\rho > 10 \cdot 10^4$ ом·см имеет место волновой процесс, а при $\rho < 10 \cdot 10^4$ — процесс растекания тока с заземлителя в землю. Так как в действительности всегда $\rho < 10 \cdot 10^4$, то при расчете протяженных заземлителей емкость C может не учитываться. Это легко доказать, например, по отношению плотностей токов смещения и активного тока.

При стекании тока с заземлителя плотность тока смещения будет:

$$\delta_{см} = \frac{dD}{dt} = \epsilon \frac{dE}{dt} = j\omega\epsilon E,$$

а активного тока

$$\delta_a = \sigma E.$$

Отношение токов

$$\frac{\delta_{см}}{\delta_a} = \frac{j\omega\epsilon E}{\sigma E} = j \frac{\omega\epsilon}{\sigma}.$$

Принимаем $\omega = \frac{1}{T}$; $T = 4$ мксек и $\epsilon = 9$; тогда

при $\sigma = 10^{-6}$ имеем $\frac{\omega\epsilon}{\sigma} = \frac{0,25 \cdot 10^9 \cdot 9}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-6}} = 0,2$

и т. д. Таким образом, активный ток больше тока смещения при $\rho = 100 \cdot 10^4$ ом·см в 5 раз, при $\rho = 10 \cdot 10^4$ в 50 раз и при $\rho = 5 \cdot 10^4$ в 100 раз.

Выбор активного сопротивления R_a . Из катодных осциллограмм, снятых при разряде импульсного генератора на тот или иной тип протяженного заземлителя, получался логарифмический декремент затухания λ , и из выражения

$$R'_a = \sqrt{\frac{\lambda^2 \frac{L}{C}}{\pi^2 + \frac{\lambda^2}{4}}}$$

находилось активное сопротивление.

Для меди активное сопротивление R_a без учета искры определялось с помощью таблиц бесселевых функций по аргументу

$$kr = \sqrt{\omega \mu} \cdot r.$$

Максимальный ток при разряде находился из выражения

$$i_{\max} = \sqrt{\frac{U}{L/C}}.$$

Полученные результаты измерений для заземлителя из медного провода сведены в табл. 2, для железного и стального — в табл. 3.

Активное сопротивление R_a , как видно из табл. 2, при возрастании i_{\max} и сохранении одной и той же частоты не изменяется. Следовательно, для меди коэффициент μ не играет никакой роли. Видно также, что в связи с протеканием через искровой промежуток большого

Таблица 1

i, a	$f, \text{гц}$	$\frac{di}{dt}_{cp},$ а/мксек	Медный трос	Железный провод			Стальной трос		
			$L_{м}, \text{мкГн/м}$	$L_{ж}, \text{мкГн/м}$	$L_{внутр}, \text{мкГн/м}$	$L_{внутр. ср}, \text{мкГн/м}$	$L_{ст}, \text{мкГн/м}$	$L_{внутр}, \text{мкГн/м}$	$L_{внутр. ср}, \text{мкГн/м}$
900—1 000	58 000—67 000	230	43	51,1	0,19		51,5	0,2	
1 800—2 000	28 500—31 500	230	43,8	49,8	0,14	0,18	54,3	0,24	0,22
3 150—3 450	60 000—67 000	800	43	52	0,21		52	0,21	

Таблица 2

U	18 кв			12 кв
$C, \text{мкф}$	0,183	0,274	0,555	0,133
f	67 000	46 000	32 200	67 000
$i_{\text{макс}}, \text{а}$	1 000	1 250	2 000	3 450
$R_a, \text{ом}$	1,45	1,15	0,64	1,5
k_r	19	15,5	13	19
R_a	0,208	0,15	0,148	0,208
$R_{\text{н}}$	1,24	0,99	0,497	1,29
$L, \text{мкГн/м}$	43	43,8	43,8	43
$\frac{R_a}{L}, \text{ом/м}$	0,0048	0,00372	0,0033	0,0048

образом. Вначале посылалась импульсная волна на медный трос и снималась катодная осциллограмма в начале и конце его. Расчетным путем определялось произведение $L \cdot G$. После этого опыты в таком же порядке производились с железным и стальным заземлителями.

Из графика напряжений концов медного и стального заземлителей определялась между ними разность для разных времен. По этой разности напряжений и уже известным L и G определялось расчетным путем R_a стального заземлителя. Результаты расчетов приведены в табл. 4 и 5.

Из таблицы видно, что при постоянстве проводимости G отношение напряжения в конце медного троса к напряжению в начале его имеет почти одну и ту же величину как в опытах, так и в расчетах. Индуктивность медного зазем-

Таблица 3

$U, \text{кв}$	Железный провод					Стальной провод					
	$i_{\text{макс}}$	$f, \text{гц}$	$\frac{di}{dt}, \text{а/мксек}$	$R, \text{ом/м}$	$\frac{R_a}{R_u}$	$U, \text{кв}$	$i_{\text{макс}}$	$f, \text{гц}$	$\frac{di}{dt}, \text{а/мксек}$	$R, \text{ом/м}$	$\frac{R_a}{R_u}$
18	920	60 000	220	0,087	39	18	916	58 000	215	0,087	30
18	1 150	38 000	175	0,074	33	18	1 230	41 600	215	0,049	17
18	1 540	33 000	200	0,051	23	18	1 550	33 300	210	0,052	18
18	1 900	30 000	230	0,042	19	18	1 800	29 000	210	0,040	14
62	3 140	60 000	750	0,085	38	62	3 150	60 500	760	0,092	32

Таблица 4

$t, \text{мксек}$	$G, \text{мо/м}$	$\frac{u_l}{u_0}$ при $R=0$ из расчета	$\frac{u_l}{u_0}$ из опыта	$I, \text{мкГн/м}$
4	$22 \cdot 10^{-4}$	0,51	0,52	1,4
8	$22 \cdot 10^{-4}$	0,77	0,73	
12	$22 \cdot 10^{-4}$	0,76	0,73	
20	$22 \cdot 10^{-4}$	0,6	0,58	

Таблица 5

$t, \text{мксек}$	$G, \text{мо/м}$	Разность напряжений в конце троса между медью и сталью $u_{\text{м}} - u_{\text{ст}}$ из расчета	Разность напряжений в конце троса между медью и сталью $u_{\text{м}} - u_{\text{ст}}$ из опыта	$R, \text{см/м}$	$I, \text{мкГн/м}$
4	$22 \cdot 10^{-4}$	1,7	1,7	0,04	1,6
8	$22 \cdot 10^{-4}$	1,6	1,6	0,047	
12	$22 \cdot 10^{-4}$	1,4	1,4	0,039	
20	$22 \cdot 10^{-4}$	1,68	1,7	0,08	

количества электричества и уменьшением частоты сопротивление искры R_a падает.

При воздействии на указанные заземлители импульсных волн напряжения активное сопротивление стали и железа определялось путем сравнения с активным сопротивлением, найденным при том же токе и крутизне в квазистационарном режиме. Активное сопротивление для меди настолько мало, что не оказывает влияния на снижение амплитудного напряжения. Активное сопротивление R_a определялось следующим

лителем оказалась равной $1,4 \text{ мкГн/м}$, а стального несколько большей из-за внутренней индуктивности — $1,5 \text{ мкГн/м}$. Активное сопротивление при импульсах имеет тот же порядок величин, что и при квазистационарном процессе со средней крутизной 200 а/мксек и токе $2 000 \text{ а}$, а именно при импульсном напряжении и времени $4 \div 12 \text{ мксек}$ $R_a = 0,042$, при квазистационарном процессе $R_a = 0,04$. Расчеты производились по уравнениям длинных линий для импульсных напряжений, которые будут приведены ниже.

Выбор проводимости грунта G . При протекании импульсных токов вдоль заземлителя, заложеного в грунте, проводимость G изменяется в сторону увеличения. Основной причиной этого является искрообразование в грунте около проложенного заземлителя. Искрообразование связано с градиентами, возникающими на поверхности заземлителей. Градиенты вдоль заземлителя неодинаковы: у начала они больше, а у конца меньше. У начала заземлителя градиенты меняются в зависимости от длины. В связи с этим проводимость G является также переменной величиной. На основании экспериментальных данных ХЭТИ построены кривые зависимости между импульсной проводимостью земли и градиентами (рис. 1 и 3). На обоих рисунках одна из кривых (I) получена расчетным путем по импульсному сопротивлению Z_i , другая (II) — на основании расчета распределения амплитудных значений напряжения вдоль медных и стальных заземлителей. Кривая I получена при времени $t = 3 \text{ мксек}$, кривая II — при $t = 30 \text{ мксек}$. По-

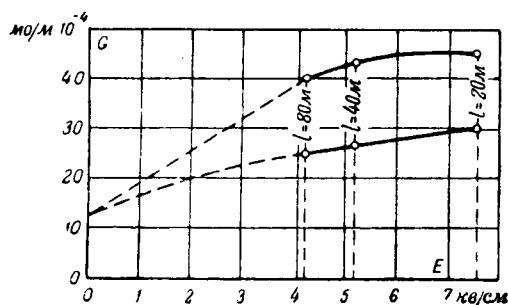


Рис. 2. Зависимость импульсной проводимости G от градиента E в начале заземлителя. Волна $3/25$ мксек; $i_{\text{макс}} = 2,3$ ка; трос медный.

нятно, что при изменении времени t в пределах $3 < t < 30$ мксек, кривая $G = f(E)$ будет расположена между кривыми I и II.

Для медного провода проводимость G , полученная по кривым распределения напряжения, несколько меняется в зависимости от длины, а у стального сохраняется неизменной. Увеличение G при стальном проводе произошло из-за того, что опыт с ним проводился в грунте с меньшим ρ , чем в случае медного провода.

Увеличение градиента в начале стального заземлителя по сравнению с медным проводом произошло, с одной стороны, из-за увеличения проводимости, а с другой, — из-за изменения импульсного сопротивления. Постоянство проводимости при всех длинах стальных заземлителей, повидимому, нужно объяснить продольным сопротивлением, которое приводит к большему снижению потенциала при одной и той же проводимости.

В медном заземлителе снижение потенциала происходит за счет проводимости, так как продольное сопротивление там ничтожно мало, особенно при короткой длине заземлителей (благодаря указанному явлению происходит повышение проводимости по сравнению с длинными заземлителями).

Сравнение экспериментальных данных с расчетными и их анализ. Протяженный заземлитель в грунте с $\rho < 10 \cdot 10^4$ ом·см, как мы уже показали, можно представить в виде схемы замещения с параметрами только L , R и G . Все величины принимаются на единицу длины. Для произвольной точки, удаленной на расстояние x от начала заземлителя, выражения скорости спада напряжения $-u_x$ и тока i_x примут следующий вид:

$$-\frac{du_x}{dx} = i_x(Lp + R);$$

$$-\frac{di_x}{dx} = u_x G.$$

Исключая ток из первого выражения, будем иметь:

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} - u_x G(Lp + R) = 0.$$

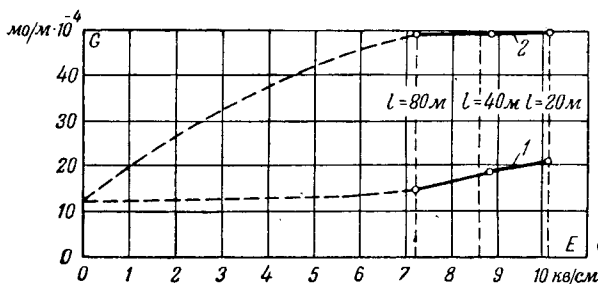


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но трос стальной.

Решение последнего уравнения

$$u_x = A \cdot e^{\alpha_1 x} + B e^{\alpha_2 x},$$

α_1 и α_2 находятся из характеристического уравнения; они равны:

$$\alpha_{1,2} = \pm \sqrt{G(Lp + R)}.$$

Отсюда

$$u_x = A \cdot e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x}.$$

Для открытого конца линии

$$x = 0; u_x = u_1;$$

$$x = l; \frac{du_x}{dx} = 0.$$

После подстановки этих условий находим:

$$u_x = u_1 \frac{\text{ch } \alpha(l-x)}{\text{ch } \alpha \cdot l}.$$

В операторной форме

$$u_x = \frac{u_1}{\text{ch } \alpha \cdot l} = \frac{u_1}{Z(p)}.$$

Пользуясь теоремой разложения

$$u_x = \frac{u_1}{Z_0} + u_1 \sum_{k=1}^{k=n} \frac{e^{p_k t}}{p_k \left(\frac{dZ_k}{dp_k} \right)}$$

и, подставляя в нее найденные по известным формулам Z_0 , p_k и $\frac{dZ}{dp_k}$, получим напряжение по времени и пути:

$$u_{x,t} = u_1 \left\{ \frac{\text{ch } \sqrt{RG} \cdot (l-x)}{\text{ch } \sqrt{RG} \cdot l} - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{(2k-1) \cdot \pi \sin \frac{2k-1}{2} \pi \frac{x}{l} \cdot e^{-\left\{ \left[\frac{(2k-1)\pi}{2\sqrt{GL}} \right]^2 + \frac{R}{L} \right\} t}}{\left[\frac{(2k-1)\pi}{2} \right]^2 + RGL^3} \right\}.$$

Это уравнение пригодно только для единичной волны. Применяя интеграл Дюамеля

$$u_{x,t} = u_{(t)} \cdot A_{(t)} + \int_0^t \frac{du_{(\tau)}}{d\tau} A(t-\tau) \cdot d\tau,$$

мы можем использовать уравнение для любой формы волны.

Приняв форму импульсной волны, изменяющейся как на фронте, так и на хвосте по экспоненциальному закону и выраженной уравнением

$$u_t = u_0 \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right)$$

получим:

$$u_{t;x} = \int_0^t u_0 \left(-\frac{1}{T_1} e^{-\frac{\tau}{T_1}} + \frac{1}{T_2} e^{-\frac{\tau}{T_2}} \right) \left[\frac{\operatorname{ch} \sqrt{RG}(t-x)}{\operatorname{ch} \sqrt{RG} \cdot l} - \sum_{k=1}^{k=n} m_k \sin \frac{2k-1}{2} \pi \frac{x}{l} = e^{P_k(t-\tau)} \right] d\tau.$$

После интегрирования будем иметь:

$$u_{t;x} = u_0 \left\{ \frac{\operatorname{ch} \sqrt{RG}(t-x)}{\operatorname{ch} \sqrt{RG} \cdot l} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{(2k-1) \pi \sin \frac{2k-1}{2} \pi \frac{x}{l}}{\left[\frac{(2k-1)}{2} \right]^2 + RG l^2} \times \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right] \right\}; \quad (1)$$

Здесь $T_k = \frac{1}{p_k}$ — постоянная времени протяженного заземлителя; T_1 и T_2 — постоянные времени импульсной волны, действующей на заземлитель. Множитель перед квадратными скобками показывает значение амплитуды напряжений отдельных гармоник.

Постоянная времени T_k характеризует спад отдельных членов свободного процесса и зависит от L , G , отношения $\frac{R}{L}$ и длины заземлителя l . Увеличение произведения LG ведет к замедлению протекания свободного процесса, а увеличение продольного сопротивления — к его ускорению. Напряжение u_x , как видно из формулы, меняется как по длине, так и по времени. Проведенные расчеты по этой формуле сопоставлялись с опытными кривыми ХЭТИ. Проверка производилась для медного и стального заземлителей длиной $l = 80$ м.

Активное сопротивление R с учетом поверхностного эффекта было определено в лаборатории опытным путем и принято для меди равным $5 \cdot 10^{-3}$. Величина индуктивности L была взята, как для уединенного провода, равной $1,6$ мкГн/м. Что касается проводимости G , то ее пришлось находить методом сравнения расчетных и опытных величин потенциалов. Она оказалась равной $40 \cdot 10^{-4}$ мо/м вместо $14 \cdot 10^{-4}$ мо/м при промышленной частоте. Увеличение G при импульсах, вероятно, произошло под действием короны и искрообразования около заземлителя и, наконец, некоторых неисследованных процессов, которые

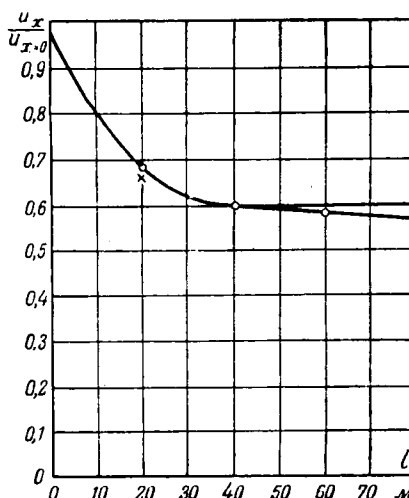


Рис 4. Распределение напряжения вдоль заземлителя. Волна 3/25 мксек; $I_{\max} = 2,3$ кА; трос медный. Кружки — экспериментальная кривая; $G = 40 \cdot 10^{-4}$ мо/м; $R = 0,005$ ом/м. Крестики — расчетная кривая; $G = 40 \cdot 10^{-4}$ мо/м; $R = 0$.

могут возникнуть при различной структуре грунта.

На рис. 4 показано изменение потенциала вдоль медного троса, при продольном сопротивлении, равном нулю. В этом случае отклонение произошло только в конце троса, но оно настолько незначительно, что можно им свободно пренебречь. Тем более это можно сделать для более коротких заземлителей.

Далее была осуществлена проверка уравнений длинных линий по опытным кривым ХЭТИ для распределения потенциалов для стального заземлителя. Активное сопротивление было принято на основании экспериментально полученных результатов равным $0,04$ ом/м. Индуктивность была оставлена ($1,6$ мкГн/м), хотя она и должна была несколько увеличиться из-за внутренней индуктивности. Опыт показал, что последняя составляет небольшую величину от принятой нами и на результаты расчета почти не влияет. Проводимость G была получена путем пересчета для заземлителя $l = 80$ м и оказалась равной $48,8 \cdot 10^{-4}$ мо/м. Для того чтобы построить кривую распределения потенциала вдоль заземлителя, мы нашли амплитудные значения потенциалов. Для этой цели были построены зависимости потенциалов для данной точки заземлителя от времени.

Кривые зависимости напряжения от времени для концов стального заземлителя при длинах $l = 20; 40; 60$ и 80 м показаны на рис. 5. Полное совпадение расчетного потенциала с экспериментальным оказалось при $G = 48,8 \cdot 10^{-4}$. Отклонение от экспериментальных данных наблюдается при $l = 80$ и указывает на то, что происходит изменение активного сопротивления по длине заземлителя. Наибольшее отклонение между полученной кривой из расчета и экспериментальной составляет всего 10%. При $R = 0,03$ ом/м максимальное отклонение 3—4%. Несовпадение экспериментальной и расчетной кривых распределения потенциала вдоль сталь-

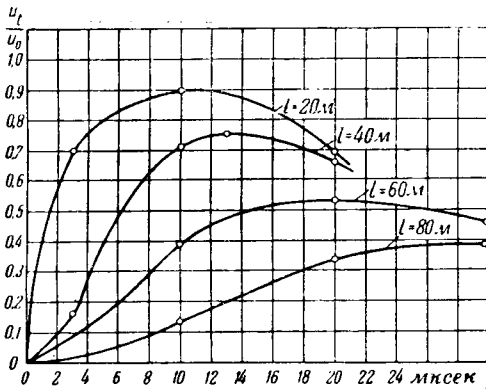


Рис. 5. Изменение u_t/u_0 на концах стального троса в зависимости от времени при $G = 48,8 \cdot 10^{-4}$; $L = 1,6$ мкс/м; $R = 0,04$ ом/м и длинах $l = 20$; 40; 60 и 80 м. Волна $3/25$ мксек; $i_{\max} = 2,3$ ка.

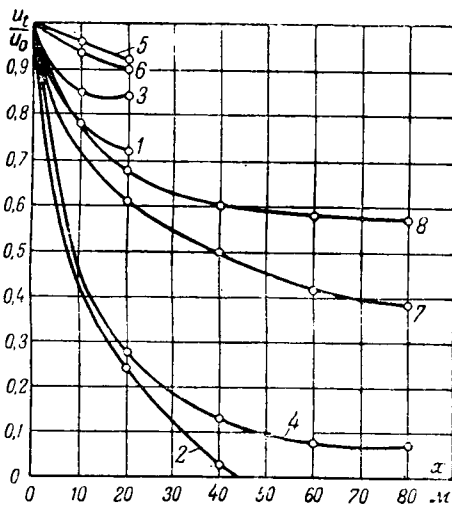


Рис. 6. Распределение потенциалов по длине x при времени $t = 3$ мксек ($l = 20$ и 80 м; стальной и медный трос) и сопоставление с распределением максимальных потенциалов для тех же тросов и тех же длин. Волна $3/25$ мксек.

1 — стальной трос, $l = 20$ м, $t = 3$ мксек; 2 — стальной трос, $l = 80$ м, $t = 3$ мксек; 3 — медный трос, $l = 20$ м, $t = 3$ мксек; 4 — медный трос, $l = 80$ м, $t = 3$ мксек; 5 — медный трос, $l = 20$ м, амплитудные значения потенциала; 6 — стальной трос, $l = 20$ м, амплитудные значения потенциала; 7 — стальной трос, $l = 80$ м, амплитудные значения потенциала; 8 — медный трос, $l = 80$ м, амплитудные значения потенциала.

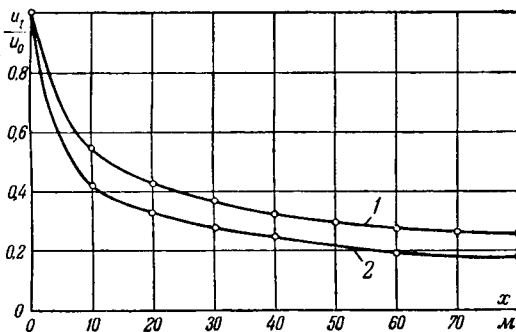


Рис. 7. Распределение максимальных потенциалов вдоль стального троса длиной $l = 80$ м при волне $1,5/40$ мксек; $\rho = 0,66 \cdot 10^4$; $G = 4 \cdot 10^{-4}$; $R = 0,05$; $L = 1,8$ (кривая 1) и распределение потенциалов вдоль того же троса при времени $t = 1,5$ мксек (кривая 2).

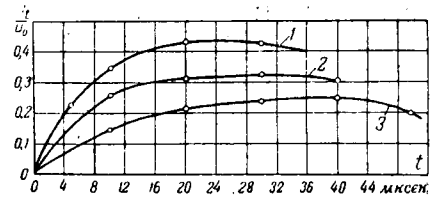


Рис. 8. Изменение отношения u_t/u_0 при длине стального троса $l = 80$ м в зависимости от времени t . Волна $1,5/40$ мксек; $G = 84 \cdot 10^{-4}$; $\rho = 0,66 \cdot 10^4$; $R = 0,05$; $L = 1,8$; $i_{\max} = 20$ ка. Кривая 1: $x = 20$ м; $t_{\max} = 26$ мксек; 2: $x = 40$ м; $t_{\max} = 30$ мксек; 3: $x = 80$ м; $t_{\max} = 40$ мксек.

ного заземлителя ($l = 80$ м), повидимому, можно отнести в основном за счет изменения его продольного сопротивления R . При $l = 40$ м опытные и расчетные кривые вполне совпадают.

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно утверждать, что дифференциальные уравнения длинных линий вполне применимы для определения потенциалов в любой точке протяженного заземлителя при установленных наперед усредненных параметров как для коротких, так и для длинных заземлителей при различных потенциалах. Уменьшение или увеличение продольного сопротивления на 50% ведет к отклонению потенциала на конце 80-метрового троса. При уменьшении сопротивления отклонения в потенциале получаются несколько большими, чем при его увеличении. Если $R = 0$, то отклонения потенциала достигают 50%, а в меди и при этих условиях отклонение всего 5%. При более коротких тросах уменьшение продольного сопротивления до 0 дает незначительное отклонение. Таким образом, для ориентировочных расчетов при коротких протяженных заземлителях можно сопротивлением R пренебречь.

Оценка влияния длины протяженных заземлителей на защитный уровень установок проводилась по кривым рис. 6. Для стального заземлителя при $l = 20$ м потенциал через 3 мксек достигает около 72% начального значения, а при $l = 80$ м имеет нулевой потенциал уже на длине 43 м. Видно, что стальной заземлитель длиной $l = 80$ м не полностью используется при защите от перенапряжений. При медном заземлителе длиной $l = 80$ м потенциал через то же время имеет значения около 8% от начального. Здесь уже используется вся длина заземлителя, но отвод тока в землю незначителен. Из кривых максимальных потенциалов 7 и 8 видно, что для стального заземлителя с $l = 80$ м при $t = 30$ мксек потенциал возрастает с 0 до 39% начального. При более крутых фронтах импульсных волн эффективность протяженных заземлителей увеличивается (рис. 7). При $t = 1,5$ мксек, волне $1,5/40$ мксек и с несколько завышенным значением продольного сопротивления потенциал, как видно из кривой 2, не снижается меньше чем до 18% от начального. Максимальный потенциал на конце 80-метрового заземлителя достигает 25% от начального через время $t = 40$ мксек (рис. 7 и 8). Это указывает на то, что потенциал на конце заземлителя в большей своей части зави-

сит от длины фронта волны. Действительно, при изменении времени полной длины импульсной волны от $t = 1,5$ до $t = 40$ мксек потенциал увеличивается всего лишь на 7%.

Таким образом, зная форму импульсной волны и параметры протяженного заземлителя, можно определить его длину. Например, при волне $3/25$ мксек и длине стального заземлителя $l = 80$ м потенциал на конце троса равен нулю, а при волне $1,5/40$ мксек и той же длине 80 м потенциал на конце уже составляет 18% от на-

$$-\sum_{k=1}^{k=n} \frac{2Gl \cos \frac{2k-1}{2} \pi \frac{x}{l}}{\left[\frac{2k-1}{2} \pi\right]^2 + RG l^2} \times \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right] \Bigg\}.$$

Беря отношение напряжения $u_{t,x}$ к току $i_{t,x}$ и полагая $x=0$, получим сопротивление Z :

$$Z_{x=0} = \frac{\left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - 0}{\sqrt{\frac{G}{R}} \frac{\operatorname{sh} \sqrt{RG} \cdot l}{\operatorname{ch} \sqrt{RG} \cdot l} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{2Gl}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi\right)^2 + RG l^2} \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right]}$$

чального. Следовательно, при первой волне длину заземлителя $l = 80$ м применить нельзя, а при второй волне длина $l = 80$ м уже будет пригодна.

В медном заземлителе R можно пренебречь, и тогда $Z_{x=0}$ становится неопределенным. После раскрытия неопределенности будем иметь:

$$Z_{R=0}^{x=0} = \frac{e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}}{Gl \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{2Gl}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi\right)^2} \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right]}$$

На выбор длины протяженных заземлителей, следовательно, оказывают влияние параметры

Наконец Z при $t=0$, $R=0$ и $x=0$, после раскрытия неопределенности

$$Z_{t=0}^{x=0, R=0} = \frac{-\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}}{Gl \left(-\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{2Gl}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi\right)^2} \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \left(-\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_k} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \left(\frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_k} \right) \right]}$$

протяженного заземлителя L , R , ρ и по большей части форма импульсной волны.

Использование 20-метрового стального заземлителя может быть как предел при $\rho = 0,25 \cdot 10^4$ или $G = 222 \cdot 10^{-4}$. Потенциал на конце заземлителя в этом случае будет равен нулю.

Исследование характера изменений импульсного сопротивления протяженного заземлителя в зависимости от времени. Напряжение в любой точке заземлителя по t и x берем по формуле (1). Ток, протекающий по заземлителю, находится из уравнения

$$-\frac{di_x}{dx} = u_{t,x} G \quad \text{или} \quad i_x = - \int u_{t,x} \cdot G \cdot dx.$$

Подставляя в последнее выражение $u_{t,x}$ и производя интегрирование, получим:

$$i_{x,t} = u_0 \left\{ \sqrt{\frac{G}{R}} \frac{\operatorname{sh} \sqrt{RG} (l-x)}{\operatorname{ch} \sqrt{RG} \cdot l} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \right.$$

После упрощения

$$Z_{t=0}^{x=0, R=0} = \frac{1}{Gl - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{2Gl}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi\right)^2}} = \frac{1}{Gl} \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{2}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi\right)^2}}.$$

Таким образом, начальное импульсное сопротивление Z не зависит от формы волны, но на него будут оказывать влияние поперечное сопротивление и некоторый коэффициент, зависящий от k . Принимая $k=1; 2; 3; 4; 5$ и 6, получим:

$$\sum_{k=1}^{k=6} \frac{2}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi\right)^2} = 0,9469,$$

$$Z_{t=0} = \frac{1}{G l} \cdot \frac{1}{1 - 0,9469} = \frac{1}{G 0,0531} = \frac{18,85}{G l}.$$

Для медного заземлителя длиной $l = 20$ м при $G = 30 \cdot 10^{-4}$

$$Z = \frac{18,85}{3 \cdot 10^{-4} \cdot 20} = \frac{18,85}{0,06} = 315 \text{ ом},$$

а при $l = 80$ м и $G = 25 \cdot 10^{-4}$

$$Z = \frac{18,85}{25 \cdot 10^{-4} \cdot 80} = \frac{18,85}{0,2} = 94 \text{ ом}.$$

Сопротивления Z обычно колеблются в пределах $100 \div 250$ ом. Величина расчетного—начального импульсного сопротивления Z_i зависит от того, сколько берется членов в сумме.

Зная выражение тока, протекающего по заземлителю по времени и расстоянию, нетрудно найти и крутизну этого тока, а затем и среднюю крутизну по длине l . Выражение средней крутизны тока по длине можно представить в следующем виде:

$$\frac{di_{cp}}{dt} = \frac{\int_0^l \frac{di_{i,x}}{dt} dx}{l}.$$

Беря первую производную тока $i_{i,x}$ по времени и подставляя ее в подынтегральное выражение и затем интегрируя, получим:

$$di_{cp} = \frac{u_0}{l} G \left\{ \frac{1}{GR} \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{RG} \cdot l} \right] \left[-\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right] - \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{l^2}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi \right)^2 RG l^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{1}{1 - \frac{T_k}{T_1}} \left(-\frac{1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{1}{T_k} e^{-\frac{t}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_k}{T_2}} \left(-\frac{1}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{1}{T_k} e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right] \right\}.$$

При времени $t = 25$ мксек импульсные сопротивления соответственно достигают порядка 16,5 и 4,5 ом. Сопротивления, подсчитанные по выражению

$$R = \frac{1}{G l}, \quad (2)$$

дают величины порядка 11,2 и 3,13 ом. Проводимости для определения сопротивления приняты здесь те, при которых получается полное совпадение потенциалов, найденных расчетным путем и экспериментально полученных, для длин $l = 20$ и 80 м (на конечных точках). Таким образом, сопротивления, подсчитанные по выражению для Z_i и уравнению (2), одного и того же порядка. Следовательно, Z_i может быть определено с помощью уравнения (2) при временах порядка длины волны.

Определение средних значений импульсных токов и крутизн. Средний ток по длине протяженного заземлителя, очевидно, можно выразить:

$$i_{cp} = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l i_{i,x} \cdot dx,$$

где $i_{i,x}$ — ток в протяженном заземлителе по времени и расстоянию от начала троса.

Подставляя в подынтегральное выражение ток $i_{i,x}$ и интегрируя от 0 до l , получим:

$$i_{cp} = \frac{u_0}{l} G \left\{ \frac{1}{GR} \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{RG} \cdot l} \right] \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{l^2}{\left(\frac{2k-1}{2} \pi \right)^2 RG l^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\frac{1}{1 - \frac{T_k}{T_1}} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_k}{T_2}} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \right] \right\}.$$

Рассмотренный метод расчета протяженных заземлителей с помощью дифференциальных уравнений длинных линий с усредненными параметрами вполне пригоден для практических целей. Применение его целесообразно еще и потому, что оно дает возможность решить вопрос об импульсном сопротивлении Z_i в начальный момент времени. Необходимо дальнейшее исследование R и G на больших импульсных токах. Желательно установление усредненной величины G для стальных и железных заземлителей на большом количестве объектов. Следует установить зависимость $G = f(E)$ с учетом физико-химических свойств грунта.

Приложение

Практические указания по расчету протяженных заземлителей. Продольное сопротивление для медных заземлителей ввиду малой величины и малого влияния на его результаты можно при расчете не учитывать. Для стальных и железных заземлителей его следует учитывать. Величину сопротивления можно рекомендовать порядка 0,05 ом/м. В лабораторных условиях у стального троса среднее значение сопротивления при импульсах получилось порядка 0,042 ом/м и при квазистационарном процессе — 0,04 ом/м. Полученные значения были установлены при амплитуде тока порядка 2 ка, крутизне 200 а/мксек и частоте $f = 29$ кГц. Несомненно, при большем токе и большей крутизне указанная величина несколько изменится. Проводимость G будет зависеть только от градиента E на заземлителе.

Зависимость $G = f(E)$ для медного и стального заземлителей находилась опытным путем. С помощью опыт-

ных кривых рис. 2—3 методом экстраполяции находилась проводимость G . При этом хорошие результаты дает нижеследующее уравнение, полученное нами для экстраполированной части кривой стального троса:

$$G = 31.01 \cdot 4 \cdot e^{-\frac{\pi}{E}}.$$

Задаваясь градиентом E , можно легко подсчитать проводимость G . Градиент E можно определить, зная ток i , протекающий по тросу, поверхность троса $2\pi r l$ и удельное сопротивление грунта ρ :

$$E = \frac{i\rho}{2\pi r l}.$$

По удельному сопротивлению ρ , геометрическим размерам протяженного заземлителя и глубине заложения h можно определить сопротивление растеканию по уравнению

$$R_{расст} = \frac{\ln \frac{l}{r} \left(1 + \frac{\ln \frac{l}{2h}}{\ln \frac{l}{r}} \right)}{2\pi \gamma l}$$

или

$$R_{расст} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r} \left(1 + \frac{\ln \frac{l}{2h}}{\ln \frac{l}{r}} \right). \quad (3)$$

Наконец, величину индуктивности L можно принять равной $1,8 \text{ мкГн/м}$ с учетом внутренней индуктивности протяженного заземлителя.

Рассмотрим удар молнии в опору передачи с тросом. Примем, что ток по опоре будет равен $i_{макс} = 80 \text{ кА}$, т. е. 80% от тока в канале молнии. Если принять 4 заземлителя, то на каждый протяженный заземлитель придется ток $i_{макс} = 20 \text{ кА}$. Волна стандартная (1,5/40 мксек).

Удельное сопротивление грунта будем считать равным $\rho = 4 \cdot 10^4 \text{ ом}\cdot\text{см}$.

Для момента времени $t = 1,5 \text{ мксек}$ и $x = 0$ (у начала протяженного заземлителя)

$$Z_{x=0} = \sqrt{\frac{G}{R}} \frac{\text{sh} \sqrt{RG} \cdot l}{\text{ch} \sqrt{RG} \cdot l} \left(e^{-\frac{1,5}{T_1}} - e^{-\frac{1,5}{T_2}} \right) - \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{2k-1}{2} \pi \right)^2 \frac{2Gl}{R} \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \left(e^{-\frac{1,5}{T_1}} - e^{-\frac{1,5}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \left(e^{-\frac{1,5}{T_2}} - e^{-\frac{1,5}{T_k}} \right) \right]$$

Так как длина фронта и длина волны заданы, то по ним легко находим константы импульсной волны T_1 и T_2 , а именно:

$$T_1 = \frac{40}{0,7} = 57 \text{ мксек}; \quad T_2 = \frac{1,5}{2,73} \approx 0,5 \text{ мксек}.$$

Продольное сопротивление стального заземлителя R принимаем равным $0,05 \text{ ом/м}$. Индуктивность $L = 1,8 \text{ мкГн/м}$. Далее определяем средний градиент, приняв $l = 20 \text{ м}$ и $r = 0,5 \text{ ом}$:

$$E = \frac{i_{макс} \rho}{2\pi r l \cdot 10^3} = \frac{20\,000 \cdot 4 \cdot 10^4}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 2000 \cdot 10^3} = 127 \text{ кВ/см}.$$

Экстраполированием кривой рис. 3 находим, что импульсная проводимость G будет равна $30 \cdot 10^{-4}$. Далее, определяем обратную величину p_k , равную постоянной времени протяженного заземлителя:

$$p_k = \frac{\left[(2k-1) \frac{\pi}{2} \right]^2}{L \cdot G l^2} + \frac{R}{L} = 119 \cdot 10^4.$$

Отсюда

$$T_k = \frac{1}{p_k} = \frac{1}{119 \cdot 10^4} = 0,85 \text{ мксек}.$$

Далее определяем: $e^{-\frac{1,5}{T_1}}$; $e^{-\frac{1,5}{T_2}}$; $e^{-\frac{1,5}{T_k}}$ $\text{sh} \sqrt{RG} l$.

$\text{ch} \sqrt{RG} l$, $\sqrt{\frac{G}{R}}$ и, подставляя их в уравнение для

получаем $Z_l = 22,5 \text{ ом}$.

Зная Z_l у начала заземлителя, мы можем определить градиент в начале его

$$E = \frac{u_{ix} G_l}{2\pi r},$$

где u_{ix} — потенциал заземлителя в любой его точке (для начала он будет равен:

$$u_{ix} = Z_l i_{макс} = 22,5 \cdot 20\,000 = 450\,000 \text{ в}.$$

G_l берем для стального троса такой величины, при которой получается полное совпадение амплитуды потенциалов из расчета и опыта, т. е. порядка $G_l = 50 \cdot 10^{-4} \text{ мо/м}$.

Удельное сопротивление ρ находим из выражения $\rho = \frac{R_3}{n}$, где

$$R_3 = \frac{1}{G_l} = R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{2} \left(1 + \frac{\ln \frac{l}{2h}}{\ln \frac{l}{r}} \right) =$$

$$= \frac{\rho}{2 \cdot 3,14 \cdot 2000} \ln \frac{2000}{0,5} = \left(1 + \frac{\ln \frac{2000}{2 \cdot 50}}{\ln \frac{l}{r}} \right) \rho \cdot 9 \cdot 10^{-4} = \rho \cdot n,$$

$$e^{-\frac{1,5}{T_1}} - e^{-\frac{1,5}{T_2}}$$

где $n = 9 \cdot 10^{-4}$,

так как $G = 30 \cdot 10^{-4}$, то

$$R_3 = \frac{1}{30 \cdot 10^{-4} \cdot 20} = 16,7 \text{ ом},$$

отсюда

$$\rho = \frac{R_3}{n} = \frac{1,67}{9 \cdot 10^{-4}} = 1,86 \cdot 10^4$$

вместо прежнего $\rho = 4 \cdot 10^4$.

Подставляя все найденные значения в формулу для E , получим $E = 134 \text{ кВ/см}$.

Таким образом, градиент в начале несколько больше среднего — 127 кВ/см . Следует заметить, что при коротких длинах заземлителя градиенты E в начале и середине почти одинаковы.

При $\rho = 4 \cdot 10^4 \text{ ом}\cdot\text{см}$ сопротивление растеканию для $l = 20 \text{ м}$ по формуле (3) получается равным 36 ом , оче-

видно, отсюда можно определить и коэффициент импульса

$$\beta = \frac{Z_i}{R_{\text{расч}}} = \frac{22,5}{36} = 0,625.$$

Сопоставляя это значение с коэффициентом импульса, полученным от эксперимента ХЭТИ, мы имеем некоторое право говорить о совпадении коэффициентов импульса.

Теперь попытаемся найти потенциал в конце заземлителя при времени $t = 1,5$ мксек, чтобы оценить, насколько хорошо будет использован данный заземлитель.

Потенциал на конце заземлителя ($x = l$, $t = 1,5$ мксек) определим по выражению

$$u_{t,x} = u_0 \left\{ \frac{e^{-\frac{1,5}{T_1}} - e^{-\frac{1,5}{T_2}}}{\text{ch} \sqrt{RG}l} - \sum_{k=1}^{k=n} \frac{(2k-1)\pi \cdot \sin \frac{2k-1}{2}\pi}{\left(\frac{2k-1}{2}\pi\right)^2 + RG l^2} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_k}} \cdot \left(e^{-\frac{1,5}{T_1}} - e^{-\frac{1,5}{T_k}} \right) - \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_k}} \cdot \left(e^{-\frac{1,5}{T_2}} - e^{-\frac{1,5}{T_k}} \right) \right] \right\} = \\ = 0,618 u_0,$$

т. е. потенциал в конце достигает 61,8% от u_0 .

При расчете было принято $k = 1; 2; 3$ и 4 , т. е. в напряжении свободного процесса учитывались 4 гармоники.

Так как в начале заземлителя потенциал $u_{t,x} = 450$ кВ, то, исходя из этого, можно определить u_0 , а именно:

$$450 = 0,91 u_0$$

или

$$u_0 = \frac{450}{0,91} = 495 \text{ кВ.}$$

Поэтому в конце заземлителя потенциал

$$u_{t,x} = u_0 0,618 = 495 \cdot 0,618 = 300 \text{ кВ.}$$

Из приведенного расчета видно, что импульсное сопротивление одного заземлителя равно $22,5$ Ом, а четырех заземлителей $Z_{\text{рез}} = 5,6$ Ом, т. е. меньше 10 Ом, которые рекомендуются при грозоупорных электроустанов-

ках. Вместе с тем, и использование заземлителя получается вполне достаточное, т. е. потенциал на конце 20-метрового заземлителя достигает 62% от u_0 .

Для сопоставления конечных результатов приведем расчет заземлителя с $l = 80$ м при тех же параметрах импульсной волны и том же максимальном токе, которые были приняты для расчета заземлителя $l = 20$ м. Средний градиент заземлителя (при $l = 80$ м)

$$E = \frac{I_p}{2\pi r l \cdot 10^3} = \frac{20\,000 \cdot 410^4}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 800 \cdot 10^3} = 32 \text{ кВ/см.}$$

По найденному среднему градиенту экстраполированием определяем импульсную проводимость $G = 28 \cdot 10^{-4}$ МО/м. Находим постоянную времени

$$T_k = \frac{1}{p_k} = \frac{1}{\left[(2k-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 + \frac{R}{L}} = \\ = \frac{1}{\frac{2,5}{1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 28 \cdot 10^{-4} \cdot 64 \cdot 10^3} + \frac{5 \cdot 10^{-2}}{1,8 \cdot 10^{-6}}} \approx 10 \text{ мксек.}$$

Определив $e^{-\frac{t}{T_k}}$; $\sqrt{\frac{G}{R}}$; $\text{ch} \sqrt{RG} \cdot l$ и $\text{sh} \sqrt{RG} \cdot l$ и, под-

ставив их в уравнение для Z_i , получим:

$$Z_i \approx 18,5 \text{ Ом;}$$

потенциал в конце заземлителя $u_{t,x} \approx 0$.

Таким образом, видно, что при данных условиях и $l = 80$ м, импульсное сопротивление Z_i несколько меньше, чем при $l = 20$ м, а потенциал в конце близок к нулю, т. е. использование заземлителя неэффективно.

Литература

1. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, вып. III, Госэнергоиздат, 1945.
2. Л. К. Потужный и С. М. Фертик. Электрические станции, № 4—5, 1939.

[24. 11. 1948]

Выбор наивыгоднейшего воздушного зазора в магнитной цепи катушки

Кандидат техн. наук Д. В. ГОЛУБЕВ

Москва

Катушки со стальным сердечником нашли исключительно широкое применение в самых разнообразных отраслях техники. В зависимости от области применения и назначения они имеют сильно отличающиеся габариты и рассчитаны на разные мощности. При всем резком различии в габаритах дроссельных катушек и их назначении вопрос об экономичном использовании стали в них является актуальным во всех случаях. Рассмотрению этого вопроса и посвящена настоящая статья.

Определения индуктивности катушки со стальным сердечником. В курсах теоретической электротехники [Л. 1, 2] для индуктивности контура дается несколько определений. Эти определения дают одно и то же значение лишь для уединенного контура, находящегося в вакууме. Если при определении индуктивности катушки со стальным сердечником исходить из различных формул, то для нее получим несколько отличающихся между собой значений индуктивности, которые во избежание смешения понятий необходимо обозначать разными терминами. Введем следующие обозначения:

$$L_{ст} = \frac{\Phi}{i}, \quad (1)$$

$$L_{дин} = \frac{d\Phi}{di}, \quad (2)$$

$$L_{дин} = \frac{e_n}{\frac{di}{dt}} \quad (2a)$$

$$L_{эн} = \frac{2W_m}{i^2}. \quad (3)$$

Индуктивность, определяемая формулой (1), называется статической, формулами (2) и (2a)—динамической или дифференциальной. Индуктивность, основанная на определении магнитной энергии (3), не получила специального термина и в дальнейшем будет снабжаться индексом эн. Если известна магнитная характеристика катушки со стальным серд-

При расчете катушек к выбору величины воздушного зазора обычно подходят лишь как к средству, позволяющему сохранять заданное значение индукции в магнитопроводе при изменении намагничивающих ампервитков. В настоящей работе показано, что правильный выбор величины воздушного зазора позволяет достичь наилучшего использования стали в катушке при заданных намагничивающих ампервитках.

дечником $\Phi = f(i)$, то статическая индуктивность, соответствующая какому-либо току, определяется тангенсом угла наклона прямой, проведенной из начала координат в рассматриваемую точку характеристики (рис. 1).

Динамическая индуктивность определяется тангенсом угла наклона касательной к магнитной характеристике (рис. 1).

Как видно из этих определений, статическая и динамическая индуктивности не отражают всего хода магнитной характеристики. В противоположность этому $L_{эн}$ зависит от всего хода магнитной характеристики при изменении намагничивающего тока от нуля до рассматриваемого значения (явление гистерезиса не учитывается).

Иногда индуктивность цепи со стальным сердечником определяют также по скорости нарастания или спадания тока в контуре. При этом

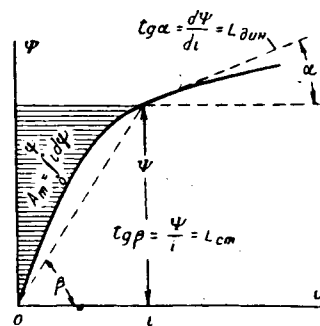


Рис. 1.

исходят из соответствующих формул, определяющих закон нарастания тока при включении постоянного напряжения в контур с сопротивлением и индуктивностью или спадания тока при коротком замыкании в этом контуре. В цепях переменного тока динамическую индуктивность определяют обычно из отношения эффективных значений э. д. с. самоиндукции и тока

$$L_{эфф} = \frac{E_L}{\omega I}. \quad (26)$$

Рассматривая различные определения индуктивности катушки со стальным сердечником, мы

замечаем, что только первые формулы [(1)—(3)] характеризуют катушку как таковую. Все другие определения представляют некоторые чисто расчетные коэффициенты, характеризующие всю цепь в целом. Так, например, индуктивность, определяемая по формуле (26), зависит не только от магнитной характеристики катушки, но и от формы, действующей в цепи э. д. с., а также от величины активного сопротивления и характера его изменения во времени, если оно не постоянно.

Статическая индуктивность представляет удобную характеристику катушки лишь при рассмотрении явлений магнитостатики. Динамическая индуктивность позволяет вычислить лишь мгновенное значение э. д. с. самоиндукции при определенном значении тока. Если принять во внимание ту роль, которую играют энергетические процессы, связанные с возникновением и распадом магнитного поля¹ в цепях постоянного и переменного тока (в особенности при резонансных явлениях), а также зависимость $L_{\partial n}$ от всего хода магнитной характеристики, необходимо заключить, что энергетическое определение индуктивности наиболее полно характеризует катушку со стальным сердечником.

Индуктивность $L_{\partial n}$ можно определить так же, как некоторую среднюю динамическую индуктивность катушки со сталью при изменении тока в катушке в интервале от нуля до рассматриваемого значения. Такое толкование можно обосновать, пользуясь теоремой о среднем значении в интегральном исчислении. В самом деле, по уравнению (3) имеем:

$$L_{\partial n} = \frac{2W_m}{I_m^2} = \frac{2}{I_m^2} \int_0^{I_m} i \frac{d\phi}{di} di = \\ = \frac{2}{I_m^2} \int_0^{I_m} L_{\partial n} i di = \frac{1}{I_m^2} \int_0^{I_m} L_{\partial n} d(i^2).$$

Но на основании названной теоремы о среднем

$$\int_0^{I_m^2} L_{\partial n} di^2 = L_{\partial n_{cp}} I_m^2,$$

откуда и получаем:

$$L_{\partial n} = L_{\partial n_{cp}}$$

В свете изложенных соображений степень экономичности использования стали в катушке следует охарактеризовать величиной $\frac{L_{\partial n}}{V_c}$, где V_c — объем стали.

Однако, если учесть, что величина расчетного тока в катушке определяется условиями работы электрической цепи, в которую она включена, и поэтому ток можно считать заданным, то степень экономичности использования стали

в катушке достаточно охарактеризовать отношением $\frac{W_m}{V_c}$. Наилучшее же использование стали в катушке при заданном значении намагничивающего тока получается в том случае, когда полная магнитная энергия, накопленная в стали и воздушном зазоре, отнесенная к единице объема стали, достигает максимального значения.

Выбор воздушного зазора. Выбор зазора будет произведен из условия наилучшего использования стали. Рассмотрим решение поставленной задачи применительно к катушке со стальным сердечником, магнитная цепь которой имеет один воздушный зазор и постоянное поперечное сечение стали S_c . Магнитная цепь каждой фазы электропечных дросселей состоит из нескольких последовательно соединенных пакетов стали, разделенных воздушными зазорами. Однако, этот случай при расчете на одну фазу может быть сведен к простейшей магнитной цепи с одним эквивалентным воздушным зазором.

Пренебрежем влиянием потока рассеяния на насыщение отдельных участков стали магнитной цепи катушки, т. е. будем считать, что индукция в стали B_c постоянна. Индукция в воздушном зазоре B_{∂} , вследствие так называемого „уширения“ сечения потока в зазоре будет отличаться от B_c . Уширение размеров магнитопровода в воздушном зазоре может быть подсчитано по известным формулам [Л. 3, стр. 213—214]. Выразим полную магнитную энергию катушки (без учета потока рассеяния) через геометрические размеры стали магнитопровода, число ампервитков катушки и значения напряженности магнитного поля и индукции в стали. Имеем:

$$B_c S_c = B_{\partial} S_{\partial}. \quad (4)$$

$$H_c l_c + H_{\partial} l_{\partial} = \omega I_m, \quad (5)$$

$$W_m = V_c \int_0^{B_c} H_c dB_c + \frac{V_{\partial} B_{\partial}^2}{2\mu_0}. \quad (6)$$

Преобразуем выражение $\frac{V_{\partial} B_{\partial}^2}{2\mu_0}$ с помощью формул (4) и (5). Используем при этом также соотношение $B_{\partial} = \mu_0 H_{\partial}$:

$$\frac{V_{\partial} B_{\partial}^2}{2\mu_0} = \frac{S_{\partial} B_{\partial} l_{\partial} \mu_0 H_{\partial}}{2\mu_0} = \frac{S_c B_c}{2} (\omega I_m - H_c l_c) = \\ = \frac{V_c B_c}{2} (H_{пред} - H_c),$$

где

$$V_c = S_c l_c; \quad H_{пред} = \frac{\omega I_m}{l_c}$$

и представляет предельную напряженность магнитного поля в стали катушки, когда воздушный зазор сведен к нулю.

¹ Как известно, реактивная мощность цепи, содержащей r и L , определяется выражением: $P_r = \omega W_{m_{max}}$.

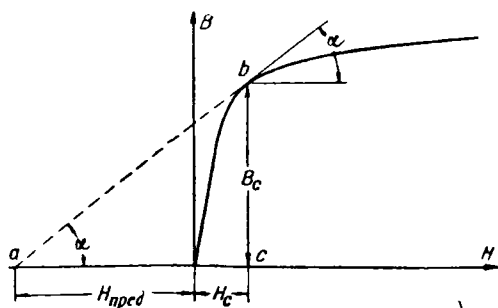


Рис. 2. Графический способ определения значения H_c и B_c , соответствующих максимуму функции $\frac{W_m}{V_c}$.

После этого полная энергия, накопленная в магнитном поле дроссельной катушки, отнесенная к единице объема стали, может быть записана в таком виде:

$$\frac{W_m}{V_c} = \int_0^{H_c} H_c \frac{dB_c}{dH_c} dH_c + \frac{B_c}{2} (H_{пред} - H_c). \quad (7)$$

Чтобы получить условие наилучшего использования стали в катушке, необходимо дифференцировать $\frac{W_m}{V_c}$ по H_c и приравнять производную нулю. При этом нужно иметь в виду, что изменение H_c равносильно изменению воздушного зазора. Итак, дифференцируя (7) по H_c , после преобразований получим условие максимума функции $\frac{W_m}{V_c}$:

$$(H_{пред} + H_c) \frac{dB_c}{dH_c} = B_c. \quad (8)$$

Для определения значений H_c и B_c , удовлетворяющих условию (8), если не прибегать к аналитическому выражению кривой намагничивания, можно воспользоваться следующим графическим способом (рис. 2).

Откладываем $H_{пред}$ по оси абсцисс в сторону отрицательных значений H_c и из конца отрезка $H_{пред}$ проводим касательную к кривой намагничивания, а из точки касания опускаем перпендикуляр на ось H_c . Найденная таким образом точка касания и дает искомые значения H_c и B_c . В самом деле, $\frac{dB_c}{dH_c} = \tan \alpha$, где α — угол

между касательной к кривой намагничивания и осью абсцисс. Из треугольника abc имеем $(H_{пред} + H_c) \tan \alpha = B_c$, что и представляет собой уравнение (8).

Решение поставленной задачи можно получить и аналитическим путем, если воспользоваться одним из приближенных представлений кривой намагничивания: магнитная восприимчивость принимается пропорциональной разности интенсивностей намагничивания насыщения I_∞ и текущей I , т. е. $\chi = k(I_\infty - I)$.

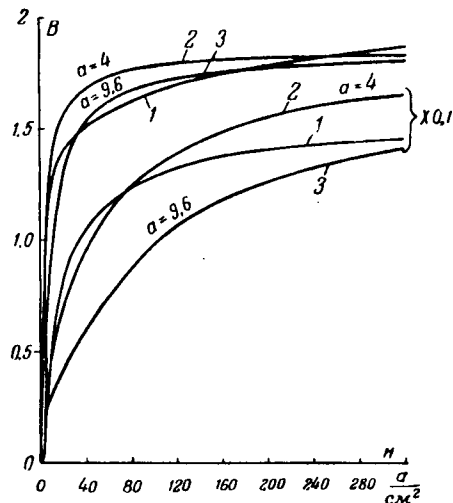


Рис. 3.

1 — кривая намагничивания стали Э4А ($I_\infty = 1,85 \text{ вб/м}^2$); 2 — кривая, полученная по формуле (9а), при $a = 4 \text{ а/см}$; 3 — то же при $a = 9,6 \text{ а/см}$ (значения напряженности поля, указанные на оси абсцисс, должны быть умножены на 0,1 для тех кривых, рядом с которыми стоит этот множитель).

В этом случае зависимость между B_c и H_c в стали выразится следующей формулой:

$$B_c = \mu_0 H_c + \frac{I_\infty H_c}{a + H_c}, \quad (9)$$

где $a = \frac{1}{k}$. Для электротехнических сталей первый член в правой части формулы (9) даже при сильном магнитном насыщении ($B_c \approx I_\infty$) составляет не более 2,1% от второго члена. Рассматривая значения индукции $B_c \leq I_\infty$, можно пренебречь первым членом в этой формуле и переписать ее в таком виде:

$$B_c = \frac{I_\infty H_c}{a + H_c}. \quad (9a)$$

Пользуясь кривой намагничивания стали марки Э4А, нами были вычислены значения коэффициента a в формуле (9) для значений индукции, лежащих в пределах от 0,6 до 1,85 вб/м². Оказалось, что коэффициент a изменяется в довольно широких пределах (от 3,2 до 17,3 а/см). Однако, задаваясь значениями коэффициента $a = 4 \text{ а/см}$ и $a = 9,6 \text{ а/см}$ [в формуле (9)], мы получаем расчетные кривые, проходящие вблизи от кривой намагничивания; одна в интервале от 0,6 до 1,3, другая от 1,4 до 1,85 вб/м² (рис. 3).

Следует заметить, что и плотность энергии магнитного поля в стали для указанных интервалов изменения индукции с большой степенью точности может быть найдена аналитическим путем, если зависимость B от H в соотношении (7) выразить формулой (9). Для энергии магнитного поля катушки в этом случае получим следующую формулу:

$$\frac{W_m}{V_c} = \frac{\mu_0 H_c H_{пред}}{2} + a I_\infty \ln \frac{a + H_c}{a} + \frac{I_\infty H_c (H_{пред} - H_c - 2a)}{2(a + H_c)}. \quad (10)$$

Учитывая, что в области сильного насыщения ($B_c > I_\infty$) функция $\frac{W_m}{V_c}$ экстремальных значений не имеет, а при $B_c < I_\infty$ справедлива формула (9а), из (8) и (9а) получим:

$$H_c = \sqrt{aH_{пред}}. \quad (8a)$$

При выборе значения коэффициента a в формулах (8а) и (10) необходимо руководствоваться замечаниями, сделанными к рис. 3 в отношении хода изображенных на нем кривых.

В заключение рассмотрим числовой пример, относящийся к расчету трехфазного электропечного дросселя. Магнитопровод каждой фазы дросселя имеет шесть воздушных промежутков ($n=6$). Общая длина силовой линии в стальных пакетах $l_c=30$ см. Площадь поперечного сечения пакета стали $S_c=132$ см². Коэффициент заполнения пакета стали $f=0,85$. Периметр фигурного сечения стального сердечника $P=54,8$ см. Число витков на фазу $w=180$. Внутренний диаметр обмотки $d_g=19,4$ см. Номинальный ток реактора $I=325$ а. Ток короткого замыкания на нижней ступени напряжения трансформатора $I_k=780$ а. Материал сердечника — сталь марки Э4А. Найдем величину воздушного зазора, при котором получается наилучшее использование стали. При вычислении индуктивности рассеяния реактора, обусловленной потоком рассеяния, проходящим вне стального сердечника, будем считать, что поток рассеяния проходит внутри катушки через площадь S_s , ограниченную внутренним диаметром катушки и диаметром сердечника ($S_s = \frac{\pi d^2}{4} - S_c$). Индукцию поля рассеяния B_s будем находить по формуле

$$B_{sm} = \frac{\sqrt{2} w I \mu_0}{h},$$

где h — высота обмотки, приближенно равная $l_c + nl_g$. Тогда индуктивность рассеяния одной фазы реактора может быть подсчитана по формуле: $L_s = \frac{w S_s B_{sm}}{I_m}$. Предельное значение напряженности магнитного поля в стали, получающееся при $l_g=0$, для амплитудного значения номинального тока найдем по формуле

$$H_{пред} = \frac{w \sqrt{2} I}{l_c} = \frac{180 \cdot 1,41 \cdot 325}{30} = 2760 \text{ а/см.}$$

Величина напряженности магнитного поля в стали, соответствующая наилучшему использованию стали, найдется по формуле (8а), если положить в ней $a=9,6$ а/см, $H_{пред}=2760$ а/см, откуда $H_c = \sqrt{9,6 \cdot 2760} = 162,5$ а/см. По кривой намагничивания находим для $H_c=162,5$ а/см, $B_c=1,75$ вб/м². Магнитную проводимость g_m воз-

душного промежутка вычисляем по формуле

$$g_m = \frac{B_c S_c}{(H_{пред} - H_c) l_c} = \frac{1,75 \cdot 0,0132}{(2760 - 162,5) 30} = 2,96 \cdot 10^{-7} \text{ МКСМ единиц.}$$

С другой стороны, величина g_m может быть выражена так [Л. 3, стр. 213]:

$$g_m = \frac{\left[\frac{S_c}{f_c} + P(1 + 0,307) \frac{l_g}{\pi} \right] \mu_0}{nl_g}.$$

Множитель, стоящий в скобках, для малых (по сравнению с высотой одного пакета стали) воздушных зазоров берется равным 0,307, если же высота пакета сравнима с длиной воздушного зазора, то его принимают равным единице. В нашей задаче его следует считать равным единице. Подставляя числовые значения $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ магн, S_c , f_c , P , g_m и n в последнюю формулу, найдем искомую величину одного воздушного промежутка $l_g=1,24$ см.

Вычисляя энергию магнитного поля в стали и в воздушных промежутках (без учета потока рассеяния) по формуле (10), найдем $W_m=9,3 \cdot 10^2$ дж, откуда по формуле (3) найдем:

$$L_{э.к} = \frac{2W_m}{I_m^2} = \frac{2 \cdot 9,3 \cdot 10^2}{(\sqrt{2})^2 325^2} = 0,0088 \text{ гн.}$$

Следует иметь, однако, в виду, что при токе короткого замыкания благодаря сильному магнитному насыщению стали индуктивность реактора, обусловленная основным потоком, становится меньше, чем при номинальном токе. Вычисляя энергию магнитного поля, соответствующую амплитуде тока короткого замыкания по формуле (11), полагая в ней $H_{пред}=6640$ а/см, $H_c=3200$ а/см, $I_\infty=1,86$ вб/м², $a=9,6$, получим $W_m=1,85 \cdot 10^3$ дж и $L_{э.к}=0,00306$ гн. Таким образом, произошло уменьшение индуктивности, обусловленной основным потоком, в 2,54 раза.

Индуктивность рассеяния, соответствующая найденному значению воздушного зазора, не зависящая от величины тока

$$L_s = \frac{180 \cdot 0,0140 \cdot 0,4\pi \cdot 180 \cdot 325 \cdot 1,41 \cdot 10^{-6}}{0,01 \cdot (30 + 6 \cdot 1,24) 1,41 \cdot 325} = 0,00152 \text{ гн.}$$

Таким образом, полная индуктивность катушки (с учетом основного потока и потока рассеяния) при номинальном токе оказалась равной 0,01032 гн, а при токе короткого замыкания 0,00408 гн.

Каждому значению тока в катушке соответствует определенная величина оптимального воздушного зазора и при слишком больших отношениях $\frac{I_k}{I_n}$ уже нельзя подобрать величину зазора так, чтобы обеспечить экономичное использование стали в обоих режимах.

Литература

1. В. Ф. Миткевич. Физические основы электротехники. Кубуч, 1933.
2. К. А. Круг. Основы электротехники, т. I. Госэнергоиздат, 1946.
3. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ч. I, ОНТИ, 1935.

Пути усовершенствования логометров

Кандидат техн. наук А. А. СОКОЛОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Показания приборов автоматического контроля должны обладать независимостью от изменения окружающей температуры T , питания U , а также от сопротивления R , температуры T_A и длины L_A линии связи.

Кратко назовем эти свойства надежностью действия прибора. Мост Уитстона, составленный из материалов с одинаковыми температурными коэффициентами сопротивления, обладает этим свойством, но только в состоянии равновесия. Ручные потенциометры (компенсаторы напряжения), автоматические потенциометры [Л. 1—2], компенсатор тока Линдека-Роте, автоматические токоуравновешенные мосты [Л. 3—4] имеют свойства надежности в любой точке шкалы. Логометры Бругера и др. [Л. 5—7], показания которых пропорциональны отношению двух токов, также обладают свойством надежности в любой точке шкалы.

Если сравнивать между собой различные приборы, обладающие свойством надежности, то наиболее интересными будут логометры, у которых это свойство является основным, рабочим параметром. Благодаря свойству надежности логометры получили широкое применение в промышленности и военном деле. Однако, современные логометры обладают рядом недостатков. Они потребляют заметную мощность от источников сигнала, имеют небольшое входное сопротивление, малое быстродействие и небольшую чувствительность, иными словами, они реагируют только на относительно большие изменения отношения токов. Во многих случаях требуются более совершенные логометры, не имеющие указанных недостатков.

Анализ показывает, что нельзя ожидать значительного улучшения характеристик магнитоэлектрических и некоторых других типов логометров. Г. М. Жданов, например, нашел, что значительное улучшение чувствительности обычных логометров возможно только в случае недопустимо большого увеличения потребляемой ими мощности. Для конструирования новых лучших логометров необходимы новые принципы и новые технические средства, которые позволили бы

Установлено, что электрические логометры обладают существенными недостатками, исключающими их применение во многих областях современной техники. Показано, что эти недостатки отсутствуют в параметрических, электронных логометрах; однако погрешность параметрических электронных схем чрезмерно велика. Наиболее совершенным является электронный логометр компенсационного типа. Указаны способы составления таких компенсационных схем.

резко, скачкообразно повысить уровень технических характеристик этих приборов. Такие средства состоят в применении электроники. Общеизвестно, что быстродействие и чувствительность электронных приборов в де-

сятки и сотни тысяч раз больше, а потребляемая мощность от цепи сигнала в такое же число раз меньше значений этих параметров электрических приборов. До сих пор, однако, конструирование электронных логометров шло по неправильному пути использования заданных, параметрических, функциональных зависимостей, которыми обладают некоторые типы электронных ламп, поставленных в специальные режимы работы. Погрешность показаний таких электронных параметрических логометров недопустимо велика. По этой причине многочисленные попытки построить логарифмические электронные логометры [Л. 8—9] остаются бесперспективными. Устранение погрешностей логарифмических логометров — неблагоприятная, мало полезная, настолько трудная проблема, что затраты на ее решение не оправдывают получаемых результатов. Логарифмические логометры не обладают свойством надежности по самой природе используемой математической функции. В этих приборах, как известно, для измерений отношения двух напряжений U_1 и U_2 сначала находят логарифмы U_1 и U_2 , например, использованием характеристики диодов, работающих при отрицательных анодных напряжениях. Затем находят (вычитая токи или напряжения) разность логарифмов, которая включается на вход потенцирующей лампы. Ее анодный ток выражается показательной функцией

$$I_a = I_e^{k U_g}, \quad (1)$$

где

$$U_g = a (\ln U_1 - \ln U_2). \quad (2)$$

Легко видеть, что незначительное изменение характеристик электронных логарифмических преобразователей вызывает огромную погрешность логарифмических логометров. Трудности

подбора ламп с нужными характеристиками, трудности стабилизации характеристик ламп, необходимость высокой стабилизации питания, малые токи на выходе диодов — все это ограничивает практическое применение логарифмических логометров, которые в настоящее время явно устарели морально. Другие параметрические электронные логометры также не получают широкого распространения вследствие трудности подбора ламп с нужными характеристиками и трудности компенсации изменения этих характеристик. Применение для логометров ламп с гиперболическими характеристиками анодного тока будет поэтому столь же ограничено, как и применение для ваттметров ламп с параболическими характеристиками. Однако, несмотря на бесперспективность, в ряде организаций ведутся разработки параметрических логометров. Это можно объяснить только вредным подражанием и отсутствием критики.

Чтобы найти верный путь усовершенствования логометров, необходимо выяснить, почему не все измерительные приборы, а только их небольшая часть обладают свойством надежности.

Для краткости изложения, приборы со свойствами надежности назовем *логометрическими*, а все остальные назовем обычными приборами.

Зная, что измерение есть „познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу“ [Л. 10], отметим, что в обычном приборе, например в вольтметре, физически не сравниваются между собой измеряемая величина (напряжение) и эталонная величина той же размерности (эталонный вольт). В вольтметре физически сравниваются вращающий момент рамки M_c (вызванный взаимодействием тока рамки с магнитным полем) и вращающий момент M_p закручивания пружины прибора. Конечный физический результат любого измерения состоит в уравнивании двух (иногда больше) величин, одной и той же размерности [$M_c = M_p$]. В обычных приборах, действующих по методу прямого измерения, измеряемая величина (напряжение) предварительно преобразуется в другую физическую величину (момент M_c) и затем эта последняя (M_c) сравнивается с эталонной величиной M_p , имеющей ту же размерность, что и величина M_c .

Весьма существенно то, что входная, измеряемая величина U_x и эталонная величина M_p имеют различные размерности. Поэтому возмущающие факторы (охватываемые понятием свойства надежности) влияют по-разному на те параметры, которые физически уравниваются в приборе, в процессе измерения. Например, увеличение сопротивления подводящих проводов к вольтметру уменьшает напряжение на зажимах вольтметра и совершенно не влияет на упругость его пружины. В обычном приборе измеряемая величина подвергается определенным преобразованиям, а эталонная величина (M_p)

другой размерности или вовсе не подвергается преобразованиям (момент пружины), или же в общем случае испытывает другие преобразования, но не те, которые испытывает измеряемая величина. Для процесса измерения нужны две величины одной и той же размерности. Применяя вольтметр, мы пользуемся двумя напряжениями: измеряемым и эталонным. Однако, оба эти напряжения используются реально, физически не одновременно. Эталонное напряжение используется только при градуировке вольтметра, а при измерении физически подводится к прибору только измеряемое напряжение. Обычный прибор не обладает свойством надежности потому, что измеряемая неизвестная величина и эталонная величина той же размерности действуют на этот прибор не одновременно (их действие на прибор осуществляется в разные моменты времени).

Логометрические приборы действуют по методу отношения (по компенсационному методу), который отличается тем, что независимые величины — измеряемая и эталонная — одной и той же размерности применяются одновременно в процессе измерения. Если эталонная величина известна и постоянна, мы получаем компенсатор (при измерении напряжений мы называем такой прибор потенциометром); если «эталонная» величина неизвестна, мы называем прибор логометром. В логометрических приборах сравниваются между собой две реально существующие в процессе измерения независимые величины одной и той же размерности; они сравниваются или непосредственно (компенсаторы напряжения, рычажные весы), или же обе сравниваемые величины испытывают одинаковые преобразования (логометры). В логометрическом приборе возмущающие факторы изменяют одинаково оба параметра, которые физически уравниваются в процессе измерения. Изменение сопротивления проводов в схеме логометра одинаково изменяет оба тока и одинаково изменяет вращающие моменты обеих катушек логометра. Поэтому логометрические приборы обладают надежностью.

Изложенное здесь теоретическое определение обычных и логометрических приборов, основанное на рассмотрении размерностей величин, реально сравниваемых в измерительных приборах, достаточно обще, верно и позволяет сделать новые, практически ценные выводы. Приведенное определение дает возможность расширить класс логометрических приборов, позволяет увидеть логометры в таких приборах, которые по своей конструкции совсем не похожи на промышленные логометры: оказывается, что эти приборы — новые логометры (о которых не подозревали, что они могут быть логометрами) имеют характеристики много лучшие, чем у промышленных логометров. Преобразование этих приборов в логометры (и обратно) исключительно просто. Особенно важно то, что методы конструирования новых логометров становятся верными и точно определенными.

Любой компенсатор (например, потенциометр напряжения) обладает свойством надежности.

Это получается не случайно. Любой компенсатор представляет собой частный случай логометра. В самом деле, компенсатор¹ отличается от логометра только тем, что посредством компенсатора мы сравниваем неизвестную измеряемую величину с известной эталонной величиной той же размерности, а посредством логометра сравниваем две неизвестные величины. Компенсатор напряжения становится логометром в том более общем случае, когда оба сравниваемых напряжения U_1 и U_2 — неизвестны. Промышленный логометр становится компенсатором тока, если один из его токов поддерживать неизменным и знать его величину. Любой компенсатор напряжения легко превращается в компенсационный логометр. Для этого достаточно включить неизвестное напряжение U_x вместо эталонного напряжения U_e [Л. 11—12]; показания такого компенсатора будут прямо пропорциональны U_1/U_2 . Компенсационный логометр такого типа дает высокую точность, быстрое действие, отсутствие потребления мощности от источника сигнала U_1 ; его шкала легко изменяется в широких пределах; чувствительность (к отношению) много выше, чем у обычных логометров. Компенсационный логометр можно преобразовать в счетно-решающий прибор с линейной шкалой для измерения отношения напряжений, произведения напряжений или квадрата напряжения, корня квадратного из напряжения и т. п., причем в качестве выходного прибора используется обычный вольтметр без всякой переделки (показаниям этого вольтметра приписываются размерности U/U_1 , U^2 , \sqrt{U} и т. п.).

Несмотря на то, что проведенное здесь определение логометрических приборов общее, верно и плодотворно, имеются возражения такого рода: «Нельзя потенциометры называть логометрами, хотя они и могут быть использованы для измерения отношений двух напряжений. Если стать на точку зрения автора, то любой измерительный прибор является логометром, так как, во-первых, он дает отношение измеряемой величины к величине, принятой за единицу, во-вторых, измеряя последовательно две величины, можно всегда на основе результатов измерения вычислить их отношения; тем не менее вряд ли имеются основания называть, например, амперметр или вольтметр логометрами». Можно ответить, что в обычном приборе нет одновременного реального, физического сравнения измеряемой величины с ее значением, принятым за единицу. В обычном вольтметре в процессе измерения не происходит сравнение измеряемого напряжения с реально существующим эталоном (вольтом). Эталонное напряжение реально прилагалось к вольтметру раньше в процессе его градуировки. Обычный прибор нельзя преобразовать в логометр простым переключением, потому что внутри него

нет источника неизменного, эталонного напряжения. Логометрическим можно назвать только такой прибор, который сразу, непосредственно в процессе измерения (без всяких пересчетов результатов последующих измерений) дает показание, пропорциональное отношению двух величин, реально приложенных к логометру на его входе.

Данное выше определение логометрических приборов приводит к еще более полезным для практики выводам, которые одновременно звучат еще более неожиданно: так, логометром может быть усилительная лампа. Нужны пояснения, каким образом лампа с непостоянством ее характеристик, с большим разбросом параметров и характеристик от одного экземпляра к другому может обладать свойством надежности.

Известно, что переменные напряжения на электродах усилительной лампы (а также режим тока отсечки идеализированного триода) определяются уравнением

$$\frac{U_a}{U_g} = -\mu \quad (3)$$

при $i_a = 0$. Это равенство представляет собой уравнение компенсатора или логометра. Использование лампы в качестве компенсатора, основанное на этом уравнении, дает возможность построить, например, электронные, безинерционные, стабилизаторы напряжения со столь большими коэффициентами стабилизации, которые нельзя достигнуть никакими другими техническими средствами [Л. 13].

Уравнение (3) прямо указывает, как использовать лампу в качестве логометра.

Включая в противофазе на анод и на сетку лампы небольшие переменные напряжения U_a и U_g , отношение которых требуется измерить, и изменяя коэффициент усиления μ лампы посредством изменения напряжения смещения сетки, легко добиться условий, когда равенство (3) удовлетворяется: это обнаруживается по исчезновению переменного анодного тока. Коэффициент усиления μ , равный в этом режиме измеряемому отношению, определяется посредством включения на вход лампы отдельного, «калибровочного» сигнала неизменной амплитуды. Измеряемый и калибровочный сигналы или различаются по частоте, или включаются в разные промежутки времени. Такой электронный логометр имеет свойство надежности, изменение характеристик ламп не сказывается на его работе. Его конструкция может быть простой с малым числом ламп. Любой регулятор (устройство, автоматически уравнивающее входную регулируемую величину относительно эталонной величины той же размерности) есть компенсатор и, следовательно, может быть использован в качестве логометра. Например, автоматический потенциометр представляет собой программный регулятор, программа которого задается значением измеряемого входного напряжения. Этот прибор легко преобразовать в логометрический регулятор, т. е. в регулятор отношения. Любой устойчи-

¹ В тексте статьи применяется термин «компенсатор» потому, что высказанные здесь мысли относятся к любым измерениям, а не только к электротехническим. В электротехнике компенсатор называется (по ГОСТ) потенциометром; но нельзя называть рычажные весы потенциометром.

ый регулятор обладает надежностью и может быть использован в качестве логометрического устройства.

А. В. Михайлов [Л. 14] и др. подметили сходство между регулятором и усилителем с обратной связью — дегенератором, заключающееся в том, что каждая из этих систем образует замкнутую систему воздействий и, следовательно, стабильность каждой из них может быть оценена посредством теории регенерации [Л. 15]. Сходство между этими приборами, однако, значительно глубже, чем подобие их поведения в устанавливаемом режиме. Особенно важно отметить, что дегенератор, так же как компенсатор, обладает явно выраженными свойствами надежности. Известно, что усиление дегенератора с глубокой противосвязью не зависит от изменения в широких пределах напряжений питания, старения ламп, изменения окружающей температуры, старения сопротивлений, схемы дегенератора. Дегенератор представляет собой прибор со стабильным усилением, хотя в нем используются обычные электронные лампы с нестабильными характеристиками и с большим разбросом параметров от одного экземпляра лампы к другому.

Свойства надежности дегенератора становятся понятными, если рассматривать его как компенсатор или как логометр. В обычном компенсаторе или логометре сравниваются между собой два независимых напряжения или два независимых тока. Дегенератор представляет собой компенсатор особого типа, в котором сравниваются между собой два зависимых напряжения, именно напряжение сигнала U_i сравнивается с напряжением U_f отрицательной обратной связи и $U_f = f(U_i)$ (рис. 1). Напряжение U_i сигнала, подведенное на вход дегенератора, является входным напряжением компенсатора; напряжение U_f противосвязи — эталонное напряжение компенсатора. Сам дегенератор с этой точки зрения является одновременно и нуль-органом компенсатора и его исполнительным механизмом.

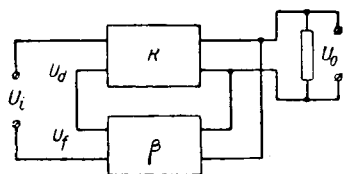


Рис. 1.

В любом реальном компенсаторе не достигается абсолютная компенсация; сравниваемые величины отличаются друг от друга на малое значение, равное «зоне нечувствительности» нуль-органа компенсатора. В электромеханических регуляторах или в автоматических потенциометрах зона нечувствительности равна двойному значению напряжения трогания нулевого реле. В динамическом компенсаторе зона нечувствительности приблизительно равна напряжению трогания нулевого реле.

Зону нечувствительности дегенератора можно определить следующим образом. Входное напряжение усилителя с обратной связью, как известно, составляет:

$$U_0 = U_i \frac{K}{1 - K \cdot \beta}, \quad (4)$$

где K — усиление усилителя без обратной связи; β — ослабление, вносимое цепью обратной связи; U_i — входной сигнал.

Если обратная связь отрицательна, то β отрицательно. А так как

$$U_f = U_0 \cdot \beta, \quad (5)$$

то зона нечувствительности дегенератора составляет:

$$U_d = U_i - U_f = \frac{U_i}{1 + K \cdot \beta}. \quad (6)$$

Относительное значение зоны нечувствительности дегенератора равно:

$$\frac{U_d}{U_i} = \frac{1}{1 + K \cdot \beta}. \quad (7)$$

Уравнение (7) показывает, что величина напряжения небаланса дегенератора может быть сделана посредством увеличения коэффициента обратной связи $K \cdot \beta$ такой малой, как это требуется.

Напряжение трогания дегенератора величина весьма малая, определяемая в пределе уровнем флуктуационных шумов, а зона нечувствительности может в сотни раз превышать напряжение трогания.

Свойства надежности устойчивого дегенератора тем выше, чем меньше его зона нечувствительности. Когда применяется глубокая противосвязь, т. е.

$$|K \cdot \beta| \gg 1, \quad (8)$$

коэффициент усиления дегенератора не зависит от коэффициента усиления K усилителя, используемого в рассматриваемом дегенераторе. В этом случае компенсация приближается к идеальной, а уравнение (4) переходит в геометрическую пропорцию, т. е.

$$\frac{U_0}{U_i} \approx \frac{1}{\beta}, \quad (9)$$

т. е. приобретает такой же вид, как и уравнение логометров любой конструкции.

Все приборы, обладающие свойствами надежности, описываются уравнением геометрической пропорции. Для конструктора это означает, что число преобразований каждой из сравниваемых величин должно быть одинаково и минимально. У обычного логометра выходным параметром является измеряемое отношение

$$\alpha = a \frac{I_1}{I_2}. \quad (10)$$

Выходным параметром дегенератора, как логометра, является его коэффициент усиления, равный $\frac{1}{\beta}$ [уравнение (9)]. Изобретение дегенератора было крупной вехой в истории прикладной электроники; усилитель из ненадежного и неустойчивого прибора превратился в прибор, которому мы можем придать такую стабильность, которая нам требуется (посредством увеличения $K\beta$). Построены дегенераторы, нестабильность усиления которых составляет 0,01%: лампы в этих схемах применяются обычные, имеющие разброс характеристик, равный (по ГОСТ) 20%.

Рассмотрение дегенератора в качестве логометра расширяет понятие логометрических приборов и расширяет, следовательно, возможности конструктора. Сказанное позволяет наметить будущие пути усовершенствования логометра. Для создания новых логометров, имеющих большие входные сопротивления, потребляющих ничтожную мощность от источников сигнала, обладающих быстродействием и высокой чувствительностью и реагирующих на малые изменения измеряемого отношения, необходимо пользоваться схемами электронных компенсаторов. Следует отметить, что промышленность выпускает так называемые электронные потенциометры. В этих приборах электронифицирован только нуль-орган, а вся остальная конструкция представляет собой электромеханическое устройство.

Электронный логометр должен представлять собой полностью электронифицированную схему электрического компенсатора.

При конструировании схем электронных логометров наиболее трудная задача состоит в за-

мене скользящего контакта реохорда электрического компенсатора электронным параметром. Выше было указано, что в качестве такого параметра можно использовать коэффициент усиления лампы типа варимю. Возможно применение электронных активных или реактивных сопротивлений или другие решения.

Литература

1. В. А. Барский. Бюллетень ВЭИ, № 2, 1940.
2. C. O. Fairchild, V. C. Parsegiant, Rev. Sc. Instr., № 12, 1938.
3. В. Штеблейн. Техника дальнедействующих устройств. Энергоиздат, стр. 248, 1938.
4. М. А. Гаврилов. Телемеханизация. Энергоиздат, 1938.
5. П. Кейнат. Электроизмерительная техника. Кубуч, т. 1, стр. 364, 1934.
6. С. Г. Герасимов, Е. Н. Красоткин. АиТ, № 4, 1936.
7. С. Лерман и Ф. Жеребин. Точная индустрия, № 3, 1939.
8. R. E. Maegher, E. P. Bently. Rev. Sc. Instr. № 11, 1939.
9. R. D. Evans, R. F. Maegher, Rev. Sc. Instr., № 12, 1939.
10. Е. Г. Шрамков. Электрические и магнитные измерения. Энергоиздат, 1937.
11. А. А. Соколов. ВЭП, № 1—2, 1937.
12. А. А. Соколов и А. Д. Пантелеева. Электричество, № 1, 1947.
13. С. П. Пивоваров. ЖТФ, т. 15, стр. 858—862, 1945.
14. А. В. Михайлов. АиТ, № 3, 1938.
15. H. Nyquist. Bell Syst. Tech. Journ., № 2, 1932 [2. 9. 1948.]



Детекторный стрелочный частотомер резонансного типа

Кандидат техн. наук Ю. М. ЭЛЬКИНД

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория
Министерства электростанций

Частота является одним из основных эксплуатационных показателей работы энергосистемы. С развитием и объединением энергосистем становятся актуальными автоматическое регулирование, измерение и эталонирование промышленной частоты.

Если в области автоматического регулирования частоты имеются определенные успехи, то вопросам измерения и эталонирования частоты в энергосистемах до последнего времени не уделялось достаточно внимания. В связи с этим в ЦНИЭЛ МЭС с 1946 г. были поставлены работы с целью определения целесообразных направлений при решении проблем измерения и эталонирования частоты, разработки и исследования соответствующих схем и устройств, разработки методов для расчета их, а также осуществление экспериментальной проверки на изготовленных образцах и макетах.

В предлагаемой статье даны некоторые результаты работ ЦНИЭЛ в области разработки стрелочных измерителей частоты¹. Широко распространенные в эксплуатации вибрационные частотомеры имеют незначительную точность ($\sim 1\%$), низкую чувствительность и подвержены воздействию вибрации и старению. Эти недостатки вибрационных частотомеров часто затрудняют эксплуатацию и в ряде случаев ограничивают их применение. Появившиеся в 1910—1911 гг. стрелочные частотомеры нашли широкое распространение. Развитие их пошло по пути использования в качестве измерителей различных систем логометров переменного тока, в сочетании с тем или иным видом частотного контура. Такие приборы могут быть выполнены с весьма узкими пределами измерения, вплоть до 1% от измеряемой частоты и менее, и в соответствии с этим обладают высо-

Стрелочные частотомеры стали необходимыми приборами для эксплуатации и исследовательских работ. Детекторный стрелочный частотомер является одной из наиболее современных конструкций. Приведенная схема и конструкция детекторного частотомера, разработана ЦНИЭЛ МЭС. Излагаются основы теории и расчета. Даны примеры многопредельных детекторных частотомеров, изготовленных ЦНИЭЛ МЭС и результаты сравнительных испытаний частотомеров ЦНИЭЛ и зарубежных фирм.

кой чувствительностью и незначительными погрешностями $0,5 \div 0,2\%$ и менее.

Развитие радиотехники и электроники в период 1920—1930 гг. привело к появлению электронных частотомеров. Большая часть их осно-

вана на принципе заряда и разряда конденсатора. Такого типа частотомеры изготавливаются в СССР. Например, частотомер завода им. Фрунзе типа ИЧ-1 [Л. 2] имеет пять пределов измерений в диапазоне $10-10\,000$ гц. Входное напряжение может изменяться от $0,5$ до 200 в. Однако, точность его невелика и погрешности достигают $\pm 4\%$. Электронные частотомеры могут быть построены и на других принципах получения импульсов. Например, одной из фирм была разработана схема [Л. 6], в которой ток измеряемой частоты преобразовывается в кратковременные импульсы той же частоты. Эти импульсы выпрямляются и измеряется их среднее значение. Погрешность такого прибора также довольно значительна, порядка 2% .

В 1943 г. конструкторы [Л. 5] предложили электронный частотомер, основанный на использовании частотно-фазной зависимости между входным и выходным напряжениями камертонного генератора. Сравнение фаз этих напряжений осуществляется дифференциальной ламповой схемой. Этот частотомер был построен на очень узкие пределы измерений $59,875 \div 60,125$ гц и имел погрешности около $0,02\%$. Электронные частотомеры обладают большим входным сопротивлением и широкими пределами входного напряжения. Наряду с этим им присущи крупные недостатки, ограничивающие область их применения. К числу недостатков относятся:

1) незначительная точность; (кроме имеющего пределы $59,875-60,125$ гц);

2) необходимость предварительного прогрева;

3) обязательная корректировка нуля перед началом измерений;

¹ В работе принимали участие сотрудники Лаборатории электрических измерений ЦНИЭЛ В. С. Скитальцев и А. М. Малахова.

4) контроль за исправностью ламп и периодическая замена их;

5) дополнительное устройство и значительный расход мощности для питания анодных и накальных цепей ламп.

Дальнейшее развитие схем и конструкций детекторных частотомеров обязано работам советского ученого К. Б. Карандеева, опубликованным в 1934—1936 гг. [Л. 3—4].

К. Б. Карандеев предложил использовать в качестве измерителя магнитоэлектрический логометр, а в качестве выпрямителей твердые меднозакисные выпрямители. Построенные К. Б. Карандеевым, а впоследствии И. И. Ивановой [Л. 1], образцы детекторных, стрелочных частотомеров наглядно показали их преимущества перед существующими типами стрелочных частотомеров. Действительно, при весьма широкой шкале 200—20 000 гц частотомер, построенный К. Б. Карандеевым, имел погрешность порядка 0,2%, а потребляемая мощность была менее 0,1 вт.

Война 1941 г. прервала работы по созданию отечественных детекторных частотомеров и только в 1946 г. в ЦНИЭЛ были вновь поставлены работы, в результате которых была подтверждена целесообразность применения твердых выпрямителей, предложены новые схемы и дано их теоретическое обоснование. Анализ и сравнение частотных контуров, типов измерителей, способов стабилизации напряжения и вида выпрямителей приводит к выводу о том, что наиболее целесообразным является применение резонансной схемы детекторного, стрелочного частотомера с магнитоэлектрическим логометром и твердыми меднозакисными выпрямителями. Эта схема, изображенная на рис. 1, и была положена в основу первого этапа исследования и разработки детекторных частотомеров в ЦНИЭЛ.

Как видно из рис. 1, в цепь одной из рамок W_1 магнитоэлектрического логометра L включен резонансный контур, состоящий из дросселя L и конденсатора C , а в цепь другой рамки W_2

активное сопротивление R . Двухполупериодное выпрямление осуществляется выпрямительными мостиками B_1 и B_2 , в плечах которых включены по одному меднозакисному выпрямителю. Цепи рамок логометра получают раздельное питание от вторичных обмоток W_3 и W_4 входного трансформатора T . Как известно, угол отклонения логометра α является функцией отношений токов I_{d1} и I_{d2}

в его рамках и может быть выражен как

$$\alpha = F\left(\frac{I_{d1}}{I_{d2}}\right) \quad (1)$$

или

$$\frac{I_{d1}}{I_{d2}} = \psi(\alpha). \quad (2)$$

Вид этих функций (1) и (2) определяется конструкцией измерителя и характеристикой частотного контура. Установим вид этих функций, считая в первом приближении, что характеристика логометра может быть принята линейной, а характеристики выпрямителей идеальными: прямое сопротивление неизменное, обратное бесконечно велико. Тогда получим, что

$$\psi(\alpha) = a\alpha + b, \quad (3)$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от конструктивных данных логометра.

С другой стороны, отношение токов в рамках логометра может быть выражено как

$$\frac{I_{d1}}{I_{d2}} = \frac{R_2}{R_1 \sqrt{1 + \frac{1}{\rho^2} \left(\delta - \frac{1}{\delta}\right)^2}}, \quad (4)$$

где R_1 и R_2 — суммарные активные сопротивления в цепях рамок логометра

$$\rho = \frac{R_1}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \text{ — характеристический коэффициент контура;}$$

$$\delta = \frac{f}{f_0} \text{ — относительная частота;}$$

$$f_0 \text{ — резонансная частота контура.}$$

Подставляя (3) и (4) в (1), получим:

$$\alpha = \frac{G}{\sqrt{1 + \frac{1}{\rho^2} \left(\delta - \frac{1}{\delta}\right)^2}} - D, \quad (5)$$

где

$$G = \frac{R_2}{aR_1} \quad \text{и} \quad D = \frac{b}{a}.$$

Уравнение (5) является общим видом уравнения, связывающим отклонение подвижной системы логометра с измеряемой частотой через постоянные параметры схемы. Раскроем физический смысл этого уравнения. На рис. 2 дана его графическая иллюстрация. Точка пересечения m восходящей части кривой с осью абсцисс фиксирует нижний предел по шкале частотомера ($\delta = \delta_1$), верхний предел измерения ($\delta = \delta_2$) выбирается так, чтобы точка резонанса ($\delta = 1$) еще не была достигнута, а рабочая зона $m - n$ лежала, по возможности, на прямолинейной части кривой. Допуская линейный характер рабочего участка характеристики частотомеров, можно установить основные соотношения между параметрами элементов схемы и заданными пределами измерения для инженерных расчетов частотомеров.

Для эксплуатации весьма ценно иметь многопредельные частотомеры, что возможно достигнуть двумя путями:

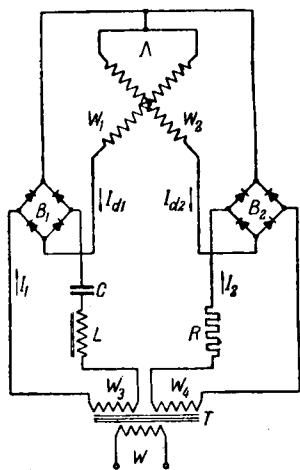


Рис. 1. Схема стрелочного детекторного частотомера ЦНИЭЛ.

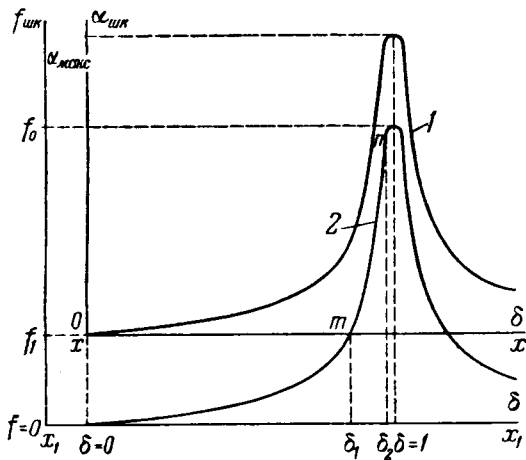


Рис. 2. Графическое построение уравнения $x_{шк} = \varphi(\delta)$.

Кривая 1. $x = \frac{G}{\sqrt{1 + \frac{1}{\rho^2} (\delta - \frac{1}{\delta})^2}}$

Кривая 2. $x_{шк} = \frac{G}{\sqrt{1 + \frac{1}{\rho^2} (\delta - \frac{1}{\delta})^2}} - D$

а) изменением чувствительности схемы к отношению токов во внешних плечах путем включения шунтирующего сопротивления;

б) изменением характеристики резонансного контура, т. е. изменением величины характеристического коэффициента $\rho = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$.

ЦНИЭЛ разработаны и выполнены два образца частотомеров лабораторного типа — один

из них пятипредельный, со шкалами 42 ÷ 45; 45 ÷ 48; 48 ÷ 51; 51 ÷ 54 гц класса 0,2 и 45 ÷ 55 гц класса 0,5; второй — двухпредельный имеет шкалы 46 ÷ 54 гц класса 0,5 и 49 ÷ 51 гц класса 0,2. В пятипредельном частотомере в качестве измерителя использован магнито-электрический логометр типа ЛМПУ. В качестве материала для сердечника дросселя был применен молибденовый пермаллой опытного завода Института Министерства черной металлургии. Применение пермаллой позволило увеличить добротность дросселя и уменьшить его габариты. Анализ условий для получения стабильного дросселя показал, что при выборе оптимальных воздушных его зазоров последний может быть введен в схемы измерительных приборов высших классов точности.

В качестве конденсаторов были использованы стабильные конденсаторы с диэлектриком из стирофлекса, имеющие температурный коэффициент порядка 0,2% емкости на 10° С.

В двухпредельном частотомере в качестве измерителя поставлен стандартный магнито-электрический логометр типа БЭ. Для определения основных эксплуатационных характеристик детекторных частотомеров, разработанных в ЦНИЭЛ МЭС, и сопоставления их с аналогичными частотомерами американских и европейских фирм, были проведены сравнительные испытания 9 стрелочных частотомеров, в том числе двух, изготовленных ЦНИЭЛ. Как видно из данных табл. 1, детекторные частотомеры ЦНИЭЛ имеют эксплуатационные характеристики, не уступающие лучшим импортным, а по ряду параметров, например по потребляемой мощности, габаритам,

Результаты сравнительных испытаний стрелочных частотомеров

Таблица 1

Фирма	Класс точности	Исполнение	Тип логометра	Пределы измерений, гц	Максимальные погрешности в % при изменении			Потребление, ватт	Вес, кг
					напряжения на 10%	температуры на 10°С	магнитного поля на 5 эр		
Норма	0,2	Лабораторный	Электродинамический	49÷51	0,12	0,2	0,12	60,5	9
Вестон	0,2	Лабораторный	Электромагнитный	46÷54	0,15	0,13	0,12	2,6	8,3
Дженерал Электрик	0,5	Лабораторный	Электродинамический	20÷90	0,3	0,12	1,57	12	6
Сименс-Гальске	0,2	Щитовой	Ферродинамический	49÷51	0,1	0,06	0,36	8,4	10,7
Сименс-Гальске	0,5	Щитовой	Ферродинамический	48÷52	0,3	0,15	1,01	11,4	3,5
Роллер-Смит	1,0	Щитовой	Электродинамический	40÷60	0,23	0,65	0,83	4,8	6,5
Инглиш электрик	0,5	Щитовой	Магнитоэлектрический	45÷55	0,4	0,1	—	1,5	3
ЦНИЭЛ МЭС (пятипредельный)	0,2 0,5	Лабораторный	Магнитоэлектрический	42÷45; 45÷48	0,06	0,1	3*	0,3	4,5
				48÷51; 51÷54					
ЦНИЭЛ МЭС (двухпредельный)	0,2 0,5	Лабораторный	Магнитоэлектрический	45÷54	0,1 0,25	0,12 0,2	0,1 0,4	0,2 0,4	2,9
				49÷51 46÷54					

* Дроссель и входной трансформатор не экранированы.

весу, имеют значительно лучшие показатели. Как известно, погрешность частотомера может быть оценена как

$$\xi = \frac{\Delta f}{f}, \quad (7)$$

где Δf — изменение показания прибора в герцах при изменении параметров элементов схемы;

f — измеряемая частота в герцах.

Из рис. 2 следует, что

$$f = \eta \alpha + f_1, \quad (8)$$

где

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{\alpha_m}, \quad (9)$$

причем f_1 и f_2 — крайние пределы измерения по шкале, а α_m — размер шкалы прибора в угловых градусах. Выражение (9) справедливо при условии линейности рабочего участка m характеристики частотомера, построенной на рис. 2. Из (8) находим, что

$$\Delta f = \eta \Delta \alpha + \Delta f_1. \quad (10)$$

Тогда, подставляя (8) и (9) в (7), получим:

$$\xi = \frac{\eta \Delta \alpha + \Delta f_1}{\eta \alpha + f_1}, \quad (11)$$

где f_1 и Δf_1 являются функциями параметров схемы частотомера

$$G, D, \rho \text{ и } f_0.$$

Определяя из (5) значения $\Delta \alpha$, f_1 и Δf_1 и подставляя их в (10), получим:

$$\xi = \Psi(G, D, \rho, f_0, f_1, \Delta G, \Delta D, \Delta \rho, \Delta f_0 \text{ и } \Delta f_1). \quad (12)$$

Раскрывая выражение (12) с помощью формулы Тейлора для функций многих переменных, получаем возможность установить степень влияния каждого из параметров схемы частотомера на его суммарную погрешность.

Анализ частных погрешностей, вносимых отдельными элементами схемы частотомера, показывает, что класс его точности определяется дополнительными погрешностями от температуры, причем наибольший удельный вес дополнительных погрешностей от температуры падает на меднозакисные выпрямители.

В табл. 2 приведены дополнительные погрешности для частотомера, изготовленного по схеме рис. 1, определенные в соответствии с выражением (12). В этой же таблице приведены погрешности, найденные из опыта.

Погрешности, приведенные в табл. 2, получены для предела измерения $48 \div 51$ гц. Как видно из данных табл. 2, сходимость расчета и опыта вполне удовлетворительна. После осуществления температурной компенсации дополнительная по-

Таблица 2

Дополнительные погрешности	Расчет	Опыт	Примечание
$\xi_T, \%$	0,38	0,4	ξ_T — дополнительная погрешность при изменении температуры на 10°C
$\xi_V, \%$	0,1	0,06	ξ_V — дополнительная погрешность при изменении напряжения на 10%

грешность от температуры была снижена до 0,1% на 10°C (табл. 1).

Для получения частотомеров более высокого класса точности, чем 0,2, необходимо снизить влияние старения меднозакисных выпрямителей.

В настоящее время ЦНИЭЛ заканчивается разработка таких схем детекторных частотомеров, в которых практически устранено влияние на точность прибора «старения» выпрямителей и изменение их характеристики от температуры, поэтому погрешности при узких пределах измерения могут быть снижены до 0,05—0,02%.

Выводы. 1. Проведенные ЦНИЭЛ МЭС исследования показали целесообразность применения детекторного принципа для измерения частоты.

2. Разработанные и изготовленные ЦНИЭЛ МЭС образцы многопредельных детекторных стрелочных частотомеров удовлетворяют требованиям, предъявляемым ГОСТ к частотомерам класса точности 0,2 и 0,5.

3. Использование стандартных магнито-электрических логометров, освоенных массовым выпуском в СССР, упрощает внедрение стрелочных детекторных частотомеров в производство и устраняет необходимость разработки и изготовления специальных конструкций логометров переменного тока.

4. Незначительное потребление мощности магнито-электрического логометра позволяет повысить точность и чувствительность детекторных частотомеров.

5. Простота схемы и применение стандартных магнито-электрических измерителей позволяет изготавливать стрелочные детекторные частотомеры силами эксплуатации.

Литература

1. И. И. Иванова. Электричество, № 14, 1935.
2. С. Г. Иткин и Г. А. Ремез. Радиоизмерения и радиоизмерительная аппаратура. Воениздат, 1947.
3. К. Б. Карандеев. Автоматика и телемеханика, № 5, 1936.
4. К. Б. Карандеев. Техническая физика, т. IV, вып. 7, 1934.
5. H. L. Clark, I. E. Hancock. Instruments, февр., 1943, Electronics, May, 1943.
6. W. A. Roberts. Electronic Eng., т. 18, VIII, № 222, 1946.

[18. 11. 1948.]



Пьезоэлектрические фильтры

Кандидат техн. наук, доц. Э. В. ЗЕЛЯХ и инж. Я. И. ВЕЛИКИН

Ленинградское отделение Центрального научно-исследовательского института связи

За последние десять лет пьезоэлектрические фильтры нашли себе широкое применение в аппаратуре многократной связи, в устройствах для радиотелефонирования одной боковой полосой, в радиоприемных устройствах и т. д.

Колеблущаяся пьезокварцевая пластина представляет собой систему с очень малым декрементом затухания [Л. 1]. В электрическом контуре (рис. 1), который эквивалентен двухэлементной кварцевой пластине, индуктивность L может иметь значения порядка десятков генри, а активное сопротивление R_k — сотен омов, так что добротность контура $Q = \frac{\omega L}{R_k}$ достигает значений 10 000 и выше; обычные же катушки индуктивности имеют добротность в 50 — 100 раз меньшую.

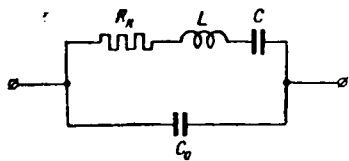


Рис. 1.

При таком качестве катушек индуктивности во многих случаях не представляется возможным осуществить из одних только катушек индуктивности и конденсаторов высокоселективные фильтры.

Действительно, одним из важнейших факторов, определяющих селективность фильтра, является ширина переходной области фильтра. Так называется область частот, для которых фильтр дает рабочее затухание, недостаточно малое и недостаточно постоянное в зависимости от частоты, чтобы считать эти частоты эффективно пропускаемыми, и недостаточно большое, чтобы считать эти частоты эффективно задерживаемыми. Ширина переходной области существенно зависит от добротности элементов фильтра: чем меньше добротность, тем шире переходная область. В полосных фильтрах влия-

ние добротности элементов сказывается особенно сильно в тех случаях, когда относительная ширина полосы пропускания фильтра мала, что часто имеет место, например, в высокочастотных устройствах.

В фильтрах нижних частот и в фильтрах верхних частот добротность элементов сказывается особенно сильно при крутых частотных характеристиках рабочего затухания.

Во всех этих случаях добротность, достигаемая в обычных катушках, недостаточна для того, чтобы получить сравнительно малую ширину переходной области, например, порядка 0,15 — 0,5% от ширины полосы пропускания. Применение же кварцевых резонаторов с их высокой добротностью дает возможность строить такие фильтры.

Вторым весьма важным достоинством кварцевых резонаторов является их высокая стабильность, т. е. постоянство электрических параметров при изменении температуры, влажности и т. п. Так, при вырезе пластины из кристалла кварца под определенными углами к его осям можно получить температурный коэффициент частоты кварцевого резонатора меньше 10^{-6} на 1°C .

Стабильность элементов особенно важна для фильтров, работающих в области высоких частот, где изменение резонансной частоты контура, входящего в фильтр, на небольшие доли процента может привести к заметным изменениям характеристики рабочего затухания фильтра.

Наконец, кварцевые фильтры имеют еще то достоинство, что их можно построить весьма компактными. Применение кварцевых фильтров позволяет упростить аппаратуру электрической связи.

Сочетая кварцевые резонаторы с конденсаторами и катушками индуктивности, можно построить разнообразные фильтры с самыми различными свойствами. Эти фильтры можно строить по схемам Т, П, Х и т. п. Большое применение нашли фильтры по схеме Х.

По типу примененных элементов кварцевые

фильтры можно разделить на две группы. К первой группе мы отнесем фильтры, содержащие только кварцевые резонаторы или составленные из кварцевых резонаторов и конденсаторов, а ко второй группе — фильтры, составленные из кварцевых резонаторов и катушек индуктивности или из этих же элементов и конденсаторов.

Как уже указывалось, добротность контура, эквивалентного кварцевому резонатору, обычно бывает не меньше 10 000. Такого же порядка добротность могут иметь и хорошо изготовленные конденсаторы.

Опыт авторов в Ленинградском отделении научно-исследовательского института связи по разработке кварцевых фильтров [Л. 2—3] показал, что фильтры, построенные из подобных элементов, обладают высокой селективностью и сравнительно малым затуханием для пропускаемых частот (однако, при уменьшении относительной ширины полосы пропускания фильтра затухание заметно возрастает, примерно обратно пропорционально указанной ширине).

Область применения фильтров первой группы ограничивается тем обстоятельством, что они пропускают сравнительно узкую полосу частот. Относительная ширина полосы пропускания фильтра указанного вида не превосходит величины $S : C_0$, где S — динамическая емкость пьезоэлектрического резонатора, а C_0 — его статическая емкость. Для кварцевых резонаторов среза — $18,5^\circ$ (часто применяемых в схемах фильтров) отношение $S : C_0$ равно примерно 1 : 140; соответственно относительная ширина полосы пропускания фильтра, составленного только из кварцевых резонаторов, не превышает 0,7%. При включении конденсаторов эта полоса делается еще более узкой.

Применяя вместо кварца другие пьезоэлектрические материалы, можно получить иную относительную ширину полосы пропускания. Так, например, с пьезоэлектрическими пластинами из фосфата аммония получается ширина порядка 7%.

В фильтрах второй группы полоса пропускания может быть значительно шире; для сравнения укажем, что относительная ширина полосы пропускания здесь может доходить (в случае кварцевых резонаторов) до 13%. Особенно широкую полосу пропускания можно получить, если применить в фильтрах индуктивно связанные катушки. В фильтрах второй группы включение емкости также сужает полосу пропускания (в противовес индуктивности, расширяющей эту полосу). Однако, расширяя полосу пропускания, индуктивность одновременно накладывает ограничения на схему фильтра. Дело в том, что катушка индуктивности, как уже указывалось, имеет добротность, во много раз меньшую, чем кварцевый резонатор. Активное сопротивление катушки вызывает в фильтре добавочное рабочее затухание, которое может оказаться неодинаковым для разных частот. В результате может получиться искажение сигналов, передаваемых через фильтр.

Существуют схемы, в которых наличие ак-

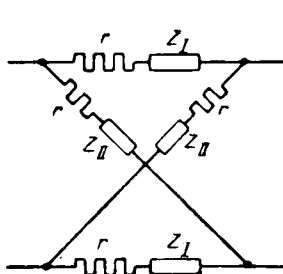


Рис. 2.

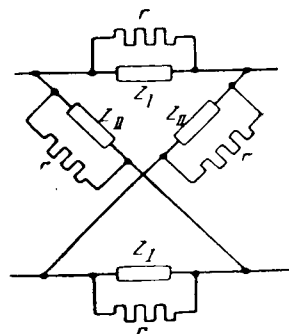


Рис. 3.

тивного сопротивления катушек не влечет за собой ухудшения характеристики рабочего затухания схемы, если схема правильно рассчитана. Такие схемы носят название схем с компенсированными потерями. Две подобные схемы приведены на рис. 2 и 3. Здесь индуктивность, не показанная на рисунках, введена в фильтр таким образом, что активное сопротивление катушек можно считать одинаковым во всех плечах X-схемы и притом соединенным с остальными элементами плеча фильтров либо последовательно (рис. 2), либо параллельно (рис. 3). Эти схемы эквивалентны соответственно схемам, в которых активные сопротивления вынесены за пределы X-схемы, соответственно либо последовательно с нагрузкой, либо параллельно.

Вынесенные активные сопротивления можно теперь отнести к нагрузкам фильтра и, изменив последние по сравнению с нагрузками для фильтра без потерь, можно добиться того, что активное сопротивление катушек совершенно не будет искажать передачу, а внесет лишь добавочное затухание, одинаковое для всех частот. Справедливость этого положения была показана в одной из наших работ [Л. 4].

Сочетая кварцевые резонаторы с катушками индуктивности, можно получить не только широкополосные фильтры, но и фильтры нижних частот, фильтры верхних частот и режекторные фильтры. Такие фильтры также были исследованы авторами, в результате чего был разработан ряд широкополосных кварцевых фильтров для различных видов отечественной аппаратуры связи [Л. 2, 4—6].

Выше уже упоминалось о применении вместо кварца других пьезоэлектрических материалов. В последнее время достигнуты большие успехи в деле искусственного выращивания пьезоэлектрических кристаллов, обладающих достаточной стабильностью. Работы в данной области заслуживают самого серьезного внимания, так как такие кристаллы во многих случаях имеют определенные преимущества перед кварцем.

Кварцевые резонаторы и фильтры для тонких частот. До сих пор область частот, в которой применяются кварцевые фильтры, имела нижнюю границу порядка $40 \div 50$ кГц. Это объясняется следующим обстоятельством: чем ниже рабочая частота, тем длиннее должна быть квар-

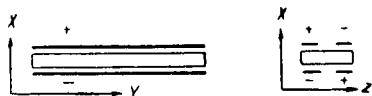


Рис. 4.

цевая пластинка. Зависимость между резонансной частотой основного колебания и размерами пластинки выражается для колебаний по длине соотношением

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где l — длина пластинки, см;
 E — модуль упругости;
 ρ — плотность.

Для X-среза можно считать:

$$f \approx \frac{270\,000}{l}. \quad (2)$$

Чтобы получить резонатор на частоту 1 кГц, необходимо взять кварцевую пластинку длиной 2,7 м, что практически неосуществимо. Поэтому кварцевые резонаторы обыкновенно применяют для частот выше 40 ÷ 50 кГц, редко ниже.

Для понижения частоты можно использовать колебания изгиба пластинки. При этом резонансная частота основного колебания пластинки связана с ее размерами следующей зависимостью:

$$f = \frac{561\,000}{\sqrt{1 + 9,43 \left(\frac{b}{l}\right)^2}} \cdot \frac{b}{l^2}, \quad (3)$$

где b — ширина пластинки, см;
 l — длина пластинки, см.

Здесь частота колебаний обратно пропорциональна квадрату длины пластинки; поэтому при той же длине пластинки можно получить более низкие резонансные частоты.

При расположении электродов по рис. 4 под действием электрического поля одна половина бруска будет стремиться растянуться в направлении своей длины, а другая половина — сжаться; в результате произойдет изгиб бруска. Если электрическое поле переменное, брусок будет совершать колебания изгиба. По этому принципу в Центральном научно-исследовательском институте связи (ЦНИИС) Б. К. Солнцевым был разработан кварцевый генератор высокой стабильности на частоту 4 кГц. Этот генератор нашел применение в аппаратуре 12-канальной системы, изготовленной заводом «Красная заря». При длине пластинки 8 ÷ 9 см можно получить частоту в несколько килогерц. Значительное дальнейшее понижение частоты здесь также лимитируется практически приемлемыми размерами кварцевых пластинок.

Для получения низкочастотных кварцевых резонаторов с приемлемыми размерами авторами предложена конструкция кварцевого резонатора, основной особенностью которой является применение составной пластины.

Составные кварцевые пластинки использовались для изучения пьезоэлектрического эффекта, при воздействии стационарного поля. Две прямоугольные пластинки вырезались из одного куска кварца, перпендикулярно к электрической оси. Ширина пластинок была параллельна оптической оси, а длина перпендикулярна и оптической и электрической осям. Две одинаковые пластинки наклеивались одна на другую с помощью бальзама, перед чем одна из пластинок переворачивалась так, чтобы электрические оси, направленные по толщине двух пластинок, имели противоположное направление. Таким образом, была получена двойная пластинка, наружные поверхности которой были затем посеребрены.

При наличии разности потенциалов между двумя посеребренными поверхностями одна из пластинок будет стремиться растянуться в направлении своей длины, а другая — сжаться; но так как они склеены между собой, двойная пластинка будет изгибаться, причем выпуклость будет на стороне растягивающейся пластинки. Это явление было применено для изготовления электрометров на большие напряжения.

При изготовлении пьезоэлектрических телефонов и микрофонов в настоящее время также применяют составные пьезоэлементы, работающие на изгиб. При этом, чтобы избежать частотных искажений, принимаются все меры для ослабления резонансных колебаний пьезоэлементов.

Имевшийся опыт использования составных пьезоэлементов и натолкнул авторов на мысль применить составные кварцевые пластинки в качестве резонаторов.

Между резонансной частотой и размерами бикварцевой пластинки существует зависимость

$$f = \frac{561\,000}{\sqrt{1 + 9,43 \left(\frac{t}{l}\right)^2}} \cdot \frac{t}{l^2}, \quad (4)$$

где t — толщина бикварцевой пластинки, см;
 l — длина пластинки, см.

При $t \ll l$ с достаточной для практики точностью можно принять:

$$f = 561\,000 \frac{t}{l^2}. \quad (5)$$

Толщина пластинки, влияющая в данном случае на частоту, может быть взята значительно меньшей, чем ширина пластинки, определяющая частоту в ранее рассмотренном случае работы пластинки на изгиб; поэтому частота здесь должна получиться значительно более низкой при той же длине пластинки. Это является важным преимуществом бикварцевых резонаторов.

Испытания, проведенные авторами в ЦНИИС, подтвердили указанные соображения. С бикварцевой пластинкой длиной 4 см был получен резонатор на 2 000 Гц, а с бикварцевой пластинкой длиной 5 см — на 1 400 Гц. Изготовлены также составные резонаторы, в которых одна из пластин — стальная. В этих опытах всячески уменьшалось сопротивление колебаниям пластинки для получения более острого резонанса, в отличие

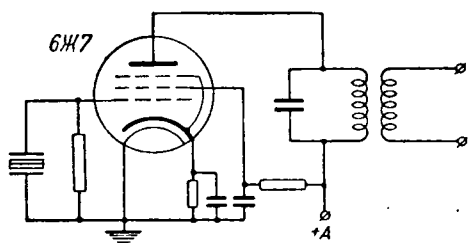


Рис. 5.

от апериодического режима, в котором работают составные пьезоэлементы в упомянутых выше электроакустических устройствах.

Для этой цели пластинки в держателе закреплялись в узловых точках. Пластинки в первых опытах склеивались с помощью тонкого слоя карбинольного клея. В последующих опытах пластинки скреплялись путем спайки под давлением.

Для расчета этих резонаторов можно предложить приближенные формулы:

$$L \approx 36 \frac{l^3}{bt} [\text{гн}]; \quad (6)$$

$$C \approx 0,22 \cdot 10^{-14} \frac{bt}{l} [\text{ф}]. \quad (7)$$

где L и C — индуктивность и емкость в эквивалентной схеме резонатора;
 b , l и t см — ширина, длина и суммарная толщина пластинок.

Ряд бикварцевых резонаторов в диапазоне от 6000 до 350 гц был изготовлен и исследован в кварцевой лаборатории ЦНИИС. Работа была выполнена Н. М. Калининским под руководством Б. К. Солнцева. Способ спайки пластин был разработан И. Г. Васиным. Как показали измерения, температурный коэффициент частоты у подобного резонатора имеет величину $6 \cdot 10^{-6}$ на 1°C . Эта величина, хотя и может удовлетворить весьма высоким требованиям, отнюдь не является предельной.

Авторами при участии З. Я. Гельмонта и А. Д. Федорова были собраны и испытаны макеты генераторов, стабилизированных бикварцами (рис. 5), а также макеты узкополосных фильтров (рис. 6).

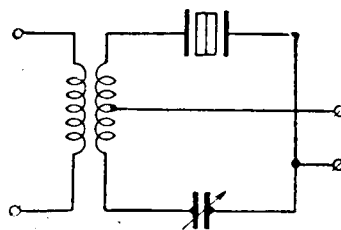


Рис. 6.

Результаты испытаний позволяют считать возможным и целесообразным применение бикварцевых резонаторов в ряде случаев, например: для стабилизации генераторов в одноканальной и трехканальной аппаратуре многократного телефонирования; для стабилизации генераторов в аппаратуре передачи изображений; для стабилизации задающего генератора 12-канальной системы многократного телефонирования; в фильтрах контрольных каналов одноканальной и трехканальной аппаратуры; в устройствах импульсной радиосвязи; в передающей и приемной части устройств для тонального вызова; при тональном и межтональном телеграфировании; для получения эталонных резонаторов на тональные частоты; в стандартах частоты (кварцевых часах); в устройствах телеметрии и управления; для излучения и приема колебаний в гидроакустике и во многих других случаях, где требуется высокая стабильность и селективность.

Литература

1. А. В. Шубников. Кварц и его применение. Изд-во А:1 СССР, 1940.
2. Э. В. Зелях и Я. И. Великин, Кварцевые фильтры советской 12-канальной системы. Электросвязь, № 6, 1941.
3. Э. В. Зелях и Я. И. Великин. Узкополосные фильтры с пьезокварцевыми резонаторами. Радиотехника, № 7, 1946.
4. Э. В. Зелях и Я. И. Великин. Электрические фильтры с кварцевыми резонаторами. Научно-технический сборник Ленинградского института связи, № 4 (20), 1937.
5. Э. В. Зелях и Я. И. Великин. Эквивалентные схемы четырехэлектродного кварцевого резонатора. ИЭСТ, № 3, 1938.
6. Э. В. Зелях и Я. И. Великин. Режекторный кварцевый фильтр. Радиотехника, № 6, 1946.

[г. 4. 1948]



Экономика осветительных установок с люминесцентными лампами

Инж. С. А. КЛЮЕВ

Трест «Центроэлектромонтаж»

За последнее время начинают приобретать широкую популярность люминесцентные лампы, обладающие рядом существенных преимуществ перед лампами накаливания. Спектральный состав света этих ламп близок к естественному, что позволяет использовать люминесцентные лампы для освещения производственных помещений, где требуется создание условий для правильного различения цветов и цветных оттенков (текстильная и полиграфическая промышленность), а также в помещениях, лишенных естественного освещения.

Световая отдача люминесцентных ламп в 2,5—3 раза выше, чем у ламп накаливания, а срок службы в 2—2,5 раза больше.

Наряду с перечисленными положительными качествами необходимо учитывать факторы, влияющие на уменьшение экономичности установок с люминесцентными лампами. Так, стоимость люминесцентных ламп значительно выше стоимости ламп накаливания, также несколько дороже и осветительные приборы. Для включения люминесцентных ламп необходима пусковая аппаратура (дрессели, конденсаторы, стартеры), не требующаяся для ламп накаливания. Единичная мощность люминесцентных ламп ниже, чем мощность применяемых ламп накаливания, что приводит к увеличению потребного количества ламп, а следовательно, и к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов. От установок с люминесцентными лампами целесообразно добывать освещенности не ниже 75—100 лк, так как при меньших освещенностях свет люминесцентных ламп, будучи по своему спектральному составу близким к естественному, ассоциируется в сознании человека с очень пасмурным днем или с сумерками, что создает неблагоприятное впечатление. При низких освещенностях от ламп накаливания такого впечатления не получается. При разрешении вопроса о применении люминесцентных ламп для освещения того или иного помещения часто встречается необходимость произвести технико-экономическое сопоставление осветительных установок, выполненных лампами накаливания и люминесцентными лампами.

Предлагаемый ниже способ экономического сопоставления осветительных установок с лампами накаливания и с люминесцентными лампами учитывает все основные факторы, влияющие на капитальные затраты и эксплуатационные расходы, для чего требуется выполнение минимального количества проектной работы, сводящейся к светотехническому расчету варианта с люминесцентными лампами, а для конкурирующего варианта с лампами накаливания — к выявлению типа осветительных приборов и единичной мощности лампы. Основная особенность предлагаемого способа, позволявшая значительно упростить решение поставленных задач, заключается в том, что производится подсчет не абсолютных значений капитальных затрат или эксплуатационных расходов, а лишь

Приведен метод экономического сопоставления осветительных установок с люминесцентными лампами и с лампами накаливания. Формулы, выведенные в статье, позволяют производить подсчет увеличения капитальных затрат и эксплуатационных расходов при освещении помещений люминесцентными лампами сравнительно с лампами накаливания.

разницы между обоими вариантами. Величина разницы позволяет судить о том, в какой степени вариант с люминесцентными лампами оказывается приемлемым для освещения рассматриваемого помещения.

Во всех дальнейших рассуждениях и при выводе формул принято, что:

1. Проценты амортизационных отчислений на осветительные приборы для люминесцентных ламп, включая пускорегулирующую аппаратуру и для ламп накаливания, равновелики и составляют 10% от стоимости приборов.

2. Капитальные затраты по сооружению осветительных сетей для обоих вариантов равновелики.

3. Расходы на амортизацию осветительных сетей и на содержание персонала, обслуживающего осветительную установку в обоих случаях, равновелики.

4. Срок службы ламп накаливания 1 000 час.

5. Число часов использования максимума осветительной установки при двухсменной работе 2 200, при трехсменной — 4 100 в год.

6. Потеря мощности в пускорегулирующей аппаратуре для люминесцентной лампы составляет 20% от мощности лампы.

Для составления расчетных зависимостей примем следующие условные обозначения:

E_A и E_N — освещенность от установки с люминесцентными лампами и с лампами накаливания, лк;

P_A и P_N — единичная мощность люминесцентной лампы и лампы накаливания, вт;

σ_A и σ_N — световая отдача люминесцентной лампы и лампы накаливания, лм/вт;

P_A — общая мощность осветительной установки с люминесцентными лампами, кВт;

T — число часов использования осветительной установки в год;

τ — срок службы люминесцентных ламп, тыс. час.;

q — тариф на электроэнергию, рублей за 1 кВтч;

A_A и A_N — стоимость одной люминесцентной лампы и лампы накаливания, руб.;

B_A и B_N — стоимость осветительного прибора для люминесцентной лампы и для лампы накаливания (при многоламповых приборах — для стоимости на одну лампу), руб.;

C — стоимость пускорегулирующей аппаратуры для одной люминесцентной лампы, руб.;

M_A и M_N — стоимость монтажа осветительного прибора для люминесцентной лампы и для лампы накаливания (при многоламповых приборах — доля стоимости на одну лампу), руб.;

K_A — капитальные затраты (без сети) на сооружение установки с люминесцентными лампами,

сопоставляемой с установкой с лампами накаливания мощностью 1 *квт*, руб.;

K'_A — то же, но без учета стоимости ламп, руб.;

K'_H — капитальные затраты на сооружение установки с лампами накаливания мощностью 1 *квт*, руб.;

K'_H — то же, но без учета стоимости ламп, руб.;

ΔK — разность между капитальными затратами на установку с люминесцентными лампами мощностью 1 *квт* и на сопоставляемую с ней установку с лампами накаливания, руб.;

$\Delta K'$ — то же, но без учета стоимости ламп;

Q_A — эксплуатационные расходы (без стоимости амортизации сети и содержания обслуживающего персонала) за один год для установки с люминесцентными лампами, сопоставляемой с установкой с лампами накаливания мощностью 1 *квт*, руб.;

Q_H — то же, но для установки с лампами накаливания мощностью 1 *квт*, руб.;

ΔQ — разность между эксплуатационными расходами на установку с люминесцентными лампами мощностью 1 *квт* и сопоставляемую с ней установку с лампами накаливания, руб.;

A_3 — экономическая стоимость люминесцентной лампы, т. е. стоимость, при которой эксплуатационные расходы установки с люминесцентными лампами будут равновелики эксплуатационным расходам установки с лампами накаливания, руб.

Предположим, что осветительная установка какого-либо помещения, оборудованная лампами накаливания, создает освещенность E_H лк и имеет мощность 1 *квт*. Определим, какую мощность будет иметь осветительная установка того же помещения с люминесцентными лампами, создающими освещенность E_A лк. Обозначим эту мощность через α и назовем ее относительной мощностью установки с люминесцентными лампами. Очевидно, величина α будет прямо пропорциональна отношению освещенностей $\frac{E_A}{E_H}$ и отношению светоотдач ламп $\frac{\sigma_H}{\sigma_A}$ (лм/вт). Учитывая потерю мощности в пускорегулирующей аппаратуре (20%), можно написать:

$$\alpha = 1,2 \frac{E_A}{E_H} \cdot \frac{\sigma_H}{\sigma_A} \quad (1)$$

Пользуясь вышеприведенными условными обозначениями и формулой (1), можно определить величину капитальных затрат и эксплуатационных расходов для одного и того же помещения с двумя вариантами осветительного оборудования — с люминесцентными лампами и с лампами накаливания.

Капитальные затраты (без стоимости осветительных сетей) для осветительной установки складываются из стоимости: осветительных приборов, ламп и монтажа, т. е. можно написать:

$$K_A = \frac{1000}{P_A} B_A + \frac{1000}{P_A} C + \frac{1000}{P_A} M_A + \frac{1000}{P_A} A_A = \frac{1000}{P_A} (B_A + C + M_A + A_A),$$

$$K_H = \frac{1000}{P_H} B_H + \frac{1000}{P_H} M_H + \frac{1000}{P_H} A_H = \frac{1000}{P_H} (B_H + M_H + A_H).$$

Из определения величины ΔK следует, что

$$\Delta K = \frac{K_A - K_H}{\alpha}$$

Подставляя значения K_A и K_H в выражение ΔK , получаем:

$$\Delta K = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1000}{P_A} (B_A + C + M_A + A_A) - \frac{1000}{P_H} \times (B_H + M_H + A_H) \right],$$

$$\Delta K = 1000 \left(\frac{B_A + C + M_A + A_A}{P_A} - \frac{B_H + M_H + A_H}{P_H} \right). \quad (2)$$

Общее превышение капитальных затрат на всю установку с люминесцентными лампами над капитальными затратами на установку с лампами накаливания $\Sigma \Delta K$ может быть определено по формуле

$$\Sigma \Delta K = \Delta K P_A. \quad (3)$$

В тех случаях, когда бывает необходимо произвести подсчет как капитальных затрат, так и эксплуатационных расходов, стоимость первоначально установленных ламп должна войти не в капитальные затраты, а в эксплуатационные расходы, в связи с чем стоимость ламп из формулы (2) должна быть исключена и формулы (2) и (3) приобретают вид:

$$\Delta K' = 1000 \left(\frac{B_A + C + M_A}{P_A} - \frac{B_H + M_H}{P_H} \right), \quad (4)$$

$$\Sigma \Delta K' = \Delta K' P_A. \quad (5)$$

Годовые эксплуатационные расходы (без стоимости амортизации осветительной сети и оплаты обслуживающего персонала) для осветительной установки складываются из стоимости электроэнергии, сменяемых ламп, амортизационных расходов на осветительные приборы и начислений на капитальные затраты (без стоимости ламп). Принимая ежегодные начисления на капитальные затраты в размере 10%, получаем величины годовых эксплуатационных расходов. Для установки с люминесцентными лампами

$$Q_A = \alpha T q + \frac{\alpha T}{P_A \tau} A_A + \frac{100 \alpha}{P_A} B_A + \frac{100 \alpha}{P_A} C + \frac{100 \alpha}{P_A} M_A + 0,1 K'_A.$$

Из предыдущего имеем:

$$0,1 K'_A = \frac{100 \alpha}{P_A} (B_A + C + M_A).$$

Подставляя это значение в выражение Q_A и производя приведение подобных членов, получаем:

$$Q_A = \alpha T q + \frac{\alpha T}{P_A \tau} A_A + \frac{200 \alpha}{P_A} B_A + \frac{200 \alpha}{P_A} C + \frac{200 \alpha}{P_A} M_A.$$

Для упрощения дальнейших расчетов можно принять, что стоимость пусковой аппаратуры для одной люминесцентной лампы в среднем на 50% выше стоимости лампы, т. е. $C = 1,5 A_A$ (это подтверждается как данными союзной промышленности, так и каталогами иностранных фирм). Тогда

$$Q_A = \alpha T q + \frac{\alpha T}{P_A \tau} A_A + \frac{200 \alpha}{P_A} B_A + \frac{300 \alpha}{P_A} A_A + \frac{200 \alpha}{P_A} M_A.$$

Для установки с лампами накаливания

$$Q_H = T q + \frac{T}{P_H} A_H + \frac{100}{P_H} B_H + \frac{100}{P_H} M_H + 0,1 K'_H,$$

$$0,1 K'_H = \frac{100}{P_H} (B_H + M_H),$$

$$Q_H = T q + \frac{T}{P_H} A_H + \frac{200}{P_H} B_H + \frac{200}{P_H} M_H.$$

Из определения величины ΔQ следует, что

$$\Delta Q = \frac{Q_A - Q_H}{\alpha}$$

Подставляя значение Q_A и Q_H в выражение ΔQ , получаем:

$$\Delta Q = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\alpha T q + \frac{\alpha T}{P_A \tau} A_A + \frac{200 \alpha}{P_A} B_A + \frac{300 \alpha}{P_A} A_A + \frac{200 \alpha}{P_A} M_A \right) - \left(T q + \frac{T}{P_H} A_H + \frac{200}{P_H} B_H + \frac{200}{P_H} M_H \right) \right].$$

$$\Delta Q = \frac{Tqp_A + \frac{1}{\tau}TA_A + 200B_A + 300A_A + 200M_A}{P_A} - \frac{Tqp_n + TA_n + 200B_n + 200M_n}{\alpha P_n} \quad (6)$$

Для двухсменной работы при $T=2200$

$$\Delta Q_2 = 200 \left(\frac{11qp_A + \frac{11}{\tau}A_A + 1,5A_A + B_A + M_A}{P_A} - \frac{11qp_n + 11A_n + B_n + M_n}{\alpha P_n} \right) \quad (7)$$

Для трехсменной работы $T=4100$

$$\Delta Q_3 = 200 \left(\frac{20,5qp_A + \frac{20,5}{\tau}A_A + 1,5A_A + B_A + M_A}{P_A} - \frac{20,5qp_n + 20,5A_n + B_n + M_n}{\alpha P_n} \right) \quad (8)$$

Общее превышение годовых эксплуатационных расходов на всю установку с люминесцентными лампами над эксплуатационными расходами на установку с лампами накаливания $\Sigma \Delta Q$ может быть определено по формуле

$$\Sigma \Delta Q = \Delta Q P_A \quad (9)$$

Для того чтобы осветительная установка с люминесцентными лампами оказалась рентабельной, стоимость ламп должна быть такой, при которой эксплуатационные расходы установки с люминесцентными лампами не превышали бы расходы для осветительной установки того же помещения с лампами накаливания, т. е. при условии, что $\Delta Q \leq 0$.

Наибольшая допустимая стоимость ламп будет при $\Delta Q = 0$. При этом условии $A_A = A_{A1}$, и из формулы (6) после преобразований имеем:

$$A_A = \frac{\tau}{T+300\tau} \left[\frac{Tqp_A}{\alpha} - Tqp_A + \frac{P_A(TA_n + 200B_n + 200M_n)}{\alpha P_n} - 200B_A - 200M_A \right] \quad (10)$$

Для двухсменной работы при $T=2200$

$$A_{A2} = \frac{\tau}{11+1,5\tau} \left[\frac{11qp_A}{\alpha} - 11qp_A + \frac{P_A(11A_n + B_n + M_n)}{\alpha P_n} - B_A - M_A \right] \quad (11)$$

Для трехсменной работы при $T=4100$

$$A_{A3} = \frac{\tau}{20,5+1,5\tau} \left[\frac{20,5qp_A}{\alpha} - 20,5qp_A + \frac{P_A(20,5A_n + B_n + M_n)}{\alpha P_n} - B_A - M_A \right] \quad (12)$$

Пользуясь формулой (10), можно выяснить порядок цифр экономической стоимости люминесцентных ламп и влияние на нее различных факторов, как-то: числа смен работы, величины мощности ламп в сопоставляемой установке с лампами накаливания и соотношение освещенностей от люминесцентных ламп и ламп накаливания. Ниже произведены подсчеты экономической стоимости для люминесцентной лампы мощностью $P_A = 40$ вт, имеющей световой поток 1800 лм, т. е. световую отдачу $\frac{1800}{40} = 45$ лм/вт при числе смен работы 2 и 3, т. е.

при $T=2200$ час. и $T=4100$ час. в год и сроке службы лампы $\tau=2,5$ тыс. часов. Мощности ламп в сопоставляемой установке с лампами накаливания приняты 200, 300 и 500 вт, напряжением 220 в. Световая отдача этих ламп σ_n равна соответственно 12,5; 13,7; 15,1 лм/вт, а цена A_n 5 р. 13 к., 5 р. 70 к., и 8 р. 55 к. за штуку по каталогу. Соотношение освещенностей от установки с люминесцентными лампами и с лампами накаливания $\frac{E_A}{E_n}$ принято равным 1, 1,5 и 2. Тариф на электроэнергию принят 0,4 руб. за 1 квтч. Цена осветительной арматуры принята — для люминесцентных ламп σ_A — 40 руб., для ламп накаливания σ_n — 20 руб. Стоимость монтажа арматур M_A и M_n — соответственно 20 руб., 10 руб. Эти величины вполне реальны и могут иметь место на практике.

Результаты подсчетов сведены в таблицу.

Экономическая стоимость люминесцентной лампы мощностью 40 вт

Число смен работы	Мощность ламп накаливания, <i>вт</i>	Отношение освещенности от люми- несцентных ламп к освещенности от ламп накаливания		
		1	1,5	2
		Экономическая стоимость лампы, руб.		
2	200	61	25	9
	300	47	18	4
	500	38	12	< 0
3	200	68	32	15
	300	57	25	9
	500	47	18	4

Из таблицы видно, что на экономическую стоимость люминесцентных ламп наибольшее влияние оказывает величина соотношения освещенностей: при освещенности от люминесцентных ламп, в 2 раза большей, чем от ламп накаливания, экономическая стоимость ламп столь незначительна, что становится сомнительной возможность таких низких цен на лампы даже при массовом их выпуске. Отсюда можно сделать вывод, что значительное повышение освещенности в установках с люминесцентными лампами целесообразно только при условии, что в результате этого будет иметь место повышение производительности труда и тем самым компенсированы повышенные эксплуатационные расходы. Так, например, из литературных данных известно, что при освещении лампами накаливания мест ручного набора типографского шрифта производительность труда в результате изменения освещенности от 100 до 600 л повышается согласно следующим данным:

Освещенность, лк	100	150	200	250	300	400	500	600
Увеличение производительности труда, %	0	5,6	7,8	9,3	10,5	11,8	12,3	12,5
Значение функции, максимум которой определяет наивыгоднейшую освещенность...	—	2,74	3,74	4,32	4,54	4,69	4,32	3,85

Из приведенных цифр видно, что наивыгоднейшая освещенность для данного производства составляет 400 лк, т. е. более высокая освещенность оказывается выгоднее, чем более низкая, несмотря на повышенные эксплуатационные расходы.

[20. 1. 1949]

В. В. Мешков. Осветительные установки, Госэнергоиздат, стр. 220, 1947.

Оптимальный переходной процесс потока шунтового двигателя при регулировании скорости выше основной

Академик В. П. НИКИТИН и кандидат техн. наук, доц. Н. П. КУНИЦКИЙ

Москва

Рациональная схема управления двигателем при регулировании скорости выше основной в электроприводах с напряженным режимом работы, например в электроприводах реверсивных прокатных станов, должна обеспечить такое изменение потока, чтобы двигатель был полностью использован по коммутационным и тепловым свойствам. Для реверсивных прокатных двигателей по данным завода «Электросила» можно считать уменьшение допустимого максимального тока двигателя при двойной скорости на 10—25% от значения этого тока при основной скорости, причем зависимость допустимого тока $i_{\text{макс}}$ от скорости v можно приближенно выразить формулой

$$i_{\text{макс}} = i_{\text{макс}0} - \operatorname{tg} \alpha (v - 1), \quad (1)$$

где $i_{\text{макс}}$ и v — относительные ток и скорость;
 $i_{\text{макс}0}$ — ток при $v = 1$;
 α — тангенс угла наклона прямой $i_{\text{макс}} = f(v)$.

После возрастания тока двигателя до максимального значения желательно поддерживать ток на уровне, обусловленном коммутацией. Ток при этом должен изменяться сравнительно незначительно и можно пренебречь падением напряжения в якоре двигателя. Тогда ток двигателя

$$i = \frac{\mu_c}{\varphi} - \frac{1}{\varphi^3} \frac{d\varphi}{d\tau_m}, \quad (2)$$

где

φ — относительный поток;

μ_c — относительный момент сопротивления, выраженный в долях M_n ;

$\tau_m = \frac{t}{T_m}$ — относительное время;

$T_m = \frac{GD^2 n_0}{375 M_n}$ — электромеханическая постоянная привода;

M_n — номинальный момент двигателя, состоящий из статической составляющей $\frac{\mu_c}{\varphi}$ и динамической $\frac{d\varphi}{\varphi^3 d\tau_m}$. Величины φ и $i_{\text{макс}}$ отнесены к номинальной скорости, а v к скорости холостого хода n .

Оптимальный закон изменения потока, при котором ток двигателя будет равен максимально допустимому, описывается уравнением

$$\frac{d\varphi}{d\tau_m} = \varphi^2 (\mu_c \pm \operatorname{tg} \alpha) \mp \varphi^3 (i_{\text{макс}0} \pm \operatorname{tg} \alpha). \quad (3)$$

Из двойных знаков для ослабления потока надо взять верхние, а для усиления — нижние.

Если проинтегрировать уравнение (3), то оптимальную зависимость φ от τ_m можно графически представить в виде кривых на рис. 1 для ослабления φ и на рис. 2 для усиления

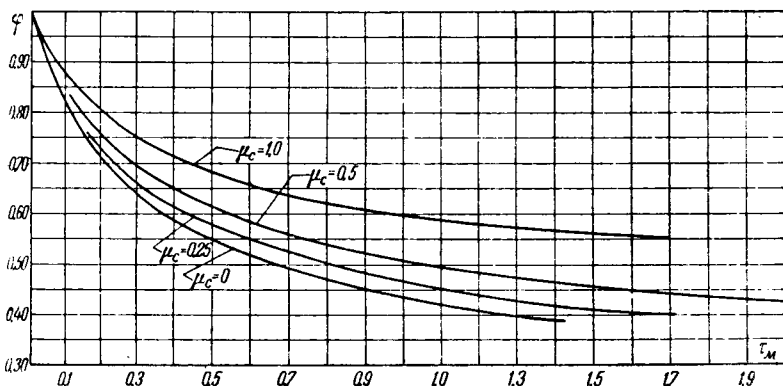


Рис. 1. Оптимальная кривая изменения потока φ при ослаблении.

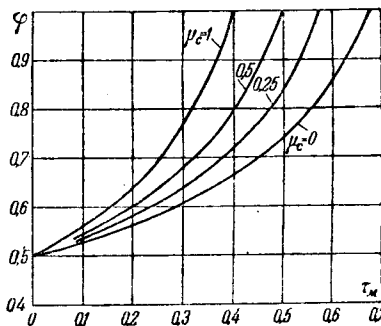


Рис. 2. Оптимальная кривая изменения потока φ при усилении.

Кривые $\varphi = f(\tau_m)$ построены для $\operatorname{tg} \alpha = 0,5$ и различных значений μ_c . Из рис. 1 и 2 следует, что для получения оптимального процесса изменения тока двигателя при скоростях, выше основной, необходимо, чтобы поток двигателя изменялся сильно при больших его значениях и замедленно — при малых значениях. При повышении скорости поток вначале должен резко падать, затем падение потока должно замедляться. При понижении же скорости поток, наоборот, сначала должен расти медленно, а затем все быстрее и быстрее.

Практически осуществить оптимальный закон изменения потока можно с тем или иным приближением либо изменением напряжения возбуждения, питающего обмотку возбуждения при неизменном сопротивлении его цепи возбуждения, либо, наоборот, изменением этого сопротивления при неизменном напряжении возбуждения, либо, наконец, комбинацией обоих этих способов.

Для наиболее общего случая — одновременного изменения напряжения возбуждения и сопротивления в цепи возбуждения, имеем уравнение

$$e_s = i_s \rho_s + \delta_n \frac{d\varphi}{d\tau_m},$$

где

i_s — относительный ток возбуждения двигателя;

e_s — относительная э. д. с. возбуждения, отнесенная к ее номинальному значению, равному $E_{s.n} = I_{s.n} R_{s.n}$, $I_{s.n}$ — номинальный ток возбуждения двигателя; $R_{s.n}$ — номинальное сопротивление цепи возбуждения двигателя;

$\rho_s = \frac{R_s}{R_{s.n}}$ и R_s — относительное и абсолютное сопротивление этой цепи;

$\delta_n = \frac{T_{s.n}}{T_m}$, $T_{s.n}$ — номинальная электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения при номинальном сопротивлении.

Для случая, когда получение оптимального закона изменения потока осуществляется изменением э. д. с. возбуждения, а сопротивление цепи возбуждения неизменно,

$$\rho_s = 1 \text{ и } e_s = i_s + \delta_n \frac{d\varphi}{d\tau_m}. \quad (4)$$

Заменяя $\frac{d\varphi}{d\tau_m}$ его значением (3), получим:

$$e_s = i_s + \delta_n \varphi^2 (\mu_c \pm \operatorname{tg} \alpha) \mp \delta_n \varphi^3 (i_{\max} + \operatorname{tg} \alpha). \quad (5)$$

Электродвижущая сила возбуждения состоит из двух составляющих — статической i_s и динамической $\delta_n \frac{d\varphi}{d\tau_m}$.

При возрастании скорости динамическая составляющая отрицательна; э. д. с. возбуждения, являющаяся разностью статической и динамической составляющих, сначала сразу должна резко уменьшиться; при больших значениях δ_n э. д. с. e_s становится отрицательной, и чем больше δ_n , тем большее отрицательное значение должна иметь э. д. с. При малых же δ_n э. д. с. уменьшается вначале процесса, но все же остается положительной.

С увеличением μ_c э. д. с. e_s алгебраически увеличивается. По мере повышения скорости e_s должна алгебраически возрастать. Когда скорость двигателя достигнет установившейся, происходит отсечка форсировки возбуждения. При усилении потока э. д. с. возбуждения положительна и растет одновременно со скоростью, особенно при больших δ_n и μ_c , сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее.

Литература

1. В. П. Никитин и Н. П. Куницкий. Оптимальная форма изменения потока шунтового двигателя постоянного тока при регулировании скорости выше основной. Известия ОТН АН СССР, № 9, 1948.

[10. 4. 1943]



того хода для $v=1$ без учета насыщения, обозначаемый далее $i'_{x, x, n}$; реактивность x , активная мощность p_a , реактивная p_r , причем за единицу мощности принята номинальная кажущаяся мощность генератора.

Значение e_i можно найти по формуле, получаемой из рис. 1:

$$e_i = \frac{v}{p_s} \sqrt{(p_s + p_r)^2 + p_a^2}, \quad (2)$$

где

$$p_s = \frac{v^2}{x_s}. \quad (3)$$

Таким образом, для данного генератора могут быть построены кривые коэффициента насыщения в зависимости от p_a и p_r .

Обратимся теперь к приведенному на рис. 2 построению с целью выяснения вопроса о величине синхронного реактивного сопротивления и мощности в этой диаграмме.

Из треугольника $sm_n p$

$$cI \cos \varphi = sm_n \sin \delta,$$

откуда активная мощность на зажимах генератора

$$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi = \frac{\sqrt{3} U sm_n \sin \delta}{c}, \quad (A)$$

где c — коэффициент соотношения ампервитков статора и ротора.

Для определения sm_n из подобия треугольников $om_n q$ и $sm_n p$

$$\frac{i}{sm_n} = 1 + \frac{\sqrt{3} \cdot X_s}{c \cdot g \cdot \tan \alpha}, \quad (B)$$

где g — отношение масштабов единиц, откладываемых по осям диаграммы.

Далее из построения треугольника Потье при режиме к. з:

$$\frac{\sqrt{3} \cdot X_a}{c \cdot g \cdot \tan \alpha} = 1. \quad (B)$$

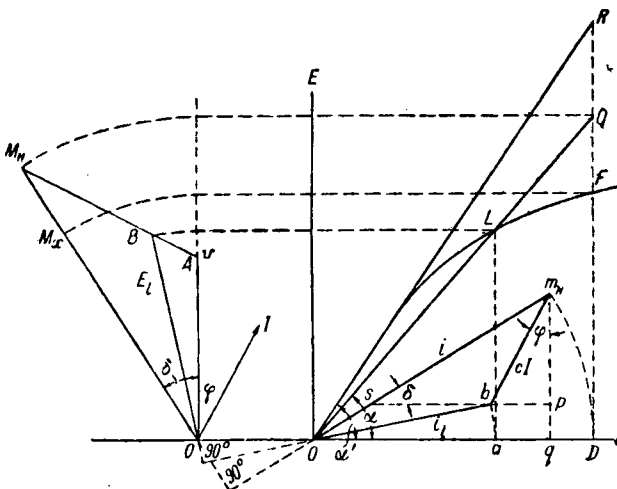


Рис. 2.

Подставляя (Б) и (В) в (А), найдем, учитывая (1):

$$P_a = \frac{i \cdot g \cdot \tan \alpha U \sin \delta}{\frac{X_a}{k} + X_s}. \quad (Г)$$

Как видно из рис. 2, $i \cdot g \cdot \tan \alpha = QD$, представляющей собой э. д. с., зависящую от величины возбуждения и степени насыщения генератора.

Обозначим $QD = E_d^n$ и

$$\frac{x_a}{k} + x_s = \frac{x_d - x_s}{k} + x_s = x_d^n. \quad (4)$$

Тогда (в относительных единицах)

$$P_a = \frac{e_d^n \cdot v \cdot \sin \delta}{x_d^n}. \quad (5)$$

Далее из рис. 2

$$E_d^n = QD = \frac{RD}{k} = \frac{E_d}{k}, \quad (6)$$

где E_d — э. д. с. за синхронной реактивностью X_a , определяемая без учета насыщения.

Кроме того, как нетрудно убедиться,

$$OM_n = QD = E_d^n, \quad BM_n = \sqrt{3} I \frac{X_a}{k}$$

$$\text{и} \quad AM_n = \sqrt{3} I \left(\frac{X_a}{k} + X_s \right) = \sqrt{3} I X_d^n.$$

Изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Уравнение активной мощности генератора (5) с учетом насыщения может быть получено непосредственно из построения Потье; оно аналогично общеизвестному уравнению без учета насыщения.

2. В уравнении (5) величины синхронной реактивности x_d^n и э. д. с. за ним e_d^n с учетом насыщения определяются в зависимости от коэффициента насыщения k . Величина e_d^n определяется прямой OL , проведенной через рабочую точку L действительной характеристики холостого хода, учитывающую насыщение генератора при данном режиме.

3. Составляющие диаграмму $OABM_n$ векторы должны быть построены для возбуждения и насыщения, соответствующих данному режиму работы, что характеризует физический смысл такого построения.

Уравнения (4) и (6) были предложены [Л. 6] на основе общих соображений о работе неявнополюсного генератора с насыщением. Однако, как видно из вышеизложенного, все соотношения, а также, что особенно важно, и активная мощность могут быть получены из построения рис. 2.

Из этой же диаграммы

$$p_r = \frac{e_d^n \cdot v \cdot \cos \delta - v^2}{x_d^n}. \quad (7)$$

Из уравнений (5) и (7) получаем:

$$\tan \delta = \frac{p_a}{p_d^n + p_r}, \quad (8)$$

где

$$p_d^H = \frac{v^2}{x_d^H}. \quad (9)$$

Анализ погрешности при определении δ предложенным способом по сравнению с уравнением (8) показывает, что она не превышает 2%.

Кривые синхронного реактивного сопротивления в зависимости от p , для крайних значений $p_a = 0$ и $p_a = 1$ легко могут быть нанесены по точкам по формуле (4).

Рабочая диаграмма является развитием метода, предложенного автором еще в 1940 г. [Л. 10] и получившего в свое время положительную оценку [Л. 11]. Предлагаемые рабочие диаграммы и формулы проверялись на протяжении 1940—1948 гг. на большом количестве генераторов (более 20) разных типов, выпускаемых различными заводами и установленными в системах Киевэнерго и Уфимэнерго и др. В частности, данный метод подтвержден также результатами испытаний одного из турбогенераторов Киевэнерго с замером угла δ , проведенных в 1948 г. Институтом электротехники Академии наук УССР. Методика автора использована на институте при расчетах компаундирования генераторов.

На рис. 4 приведена рабочая диаграмма турбогенератора 31,25 мва, установленного на одной из электростанций МЭС СССР. Построение такой диаграммы при некотором навыке требует сравнительно небольшого времени. Для каждого генератора следует построить несколько рабочих диаграмм для разных напряжений и частот. Наглядность, простота и удобства предлагаемых диаграмм при минимуме необходимых исходных данных дают основания предполагать, что они будут полезны как для эксплуатирующего персонала электростанций и систем, так и при проектных и режимных расчетах.

Литература

1. П. С. Жданов и С. А. Лебедев. Устойчивость параллельной работы электрических систем, 1934.
2. Г. Н. Петров. Влияние насыщения на угловые характеристики синхронных машин. Электричество, № 4. 1945.

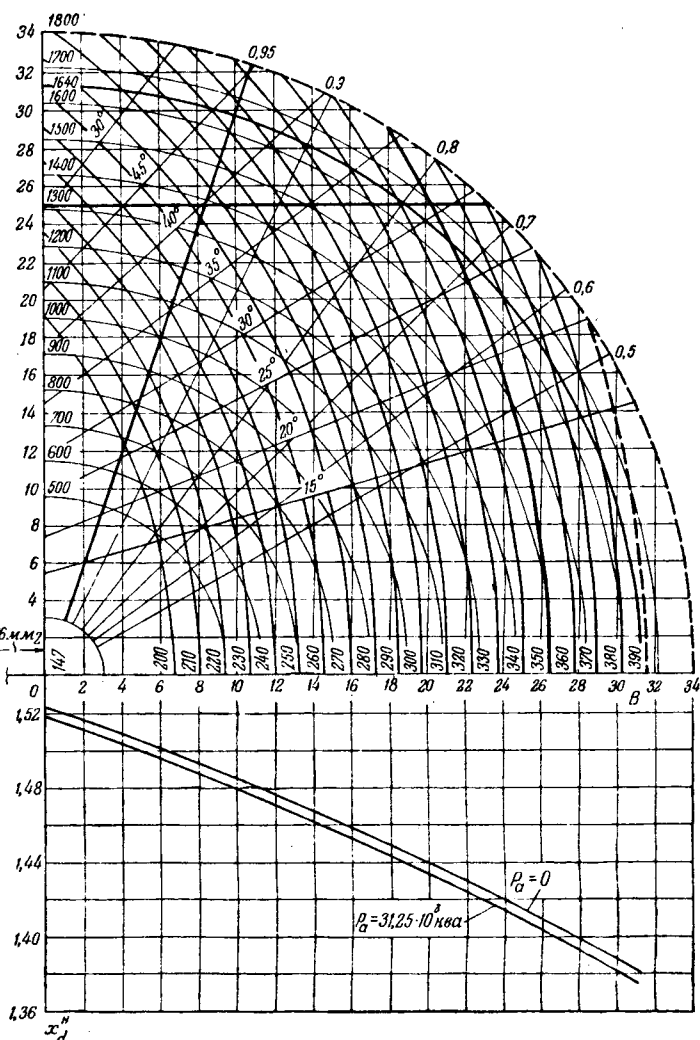


Рис. 4.

3. Г. Н. Петров. Электрические машины, ч. 1, 1940.
4. Д. А. Городский. Влияние насыщения на статическую устойчивость. Труды ВЭИ, вып. 40, 1940.
5. В. М. Горнштейн. Располагаемая реактивная мощность генераторов. Эл. станции, № 12, 1939.
6. Kingsley. Saturated Synchronous Reactance. Trans. AIEE, 1935.
7. Crary и др. Equivalent Reactance of Synchronous Machines, El. Eng., № 1, 1934.
8. Даль. Электрические цепи, т. 1, 1933.
9. Szwander. Fundamental El. Characteristics of Synchronous Generators. JIEE, № 21, 1944.
10. Г. И. Шерман. Эксплуатационная диаграмма синхронного генератора. Электричество, № 3, 1940.
11. М. А. Беркович, Н. В. Чернобровов и Н. И. Соколов. Сборник „Релейная защита и системная автоматика“. Мосэнерго, 1946.

[7. 8. 1948.]



Об устойчивости установившегося режима серийного синхронного компенсатора

Кандидат техн. наук, доц. Г. Е. ПУХОВ

Львовский политехнический институт

Выясним условия устойчивости серийного компенсатора, приводимого во вращение синхронным двигателем. Будем предполагать, что компенсатор выполнен по типу индукционной машины, имеющей симметричную обмотку на роторе.

Дифференциальные уравнения компенсатора. Электрическую машину с многофазной обмоткой возбуждения всегда можно заменить эквивалентной, имеющей две обмотки, оси которых смещены на половину полюсного деления. Для такой машины при помощи метода А. А. Горева [Л. 3] могут быть выведены следующие дифференциальные уравнения (обозначения см. в приложении):

$$\left. \begin{aligned} (r+xp)i_a + [1+(p\vartheta)](xi_q + E_q) + pE_d &= U_d, \\ (r+xp)i_q - [1+(p\vartheta)](xi_d + E_d) + \\ + pE_q &= U_q, \\ T_p x p i_a + (1+Tp)E_d &= E_{de}, \\ T_p x p i_q + (1+Tp)E_q &= E_{qe}, \\ Mp^2\vartheta + E_d i_q - E_q i_d &= D. \end{aligned} \right\} (1)$$

Для нахождения уравнений первого приближения, необходимых для исследования состояния равновесия, введем в (1) новые зависимые переменные:

$$\Delta A = A - A_0, (\Delta A = \Delta i_d, \Delta i_q, \Delta E_d, \Delta E_q, \Delta E_{de}, \Delta E_{qe}, \Delta\vartheta, \Delta D). \quad (2)$$

Делая соответствующую подстановку и отбрасывая нелинейные члены, получим требуемые уравнения в виде:

$$\left. \begin{aligned} (r+xp)\Delta i_d + x\Delta i_q + p\Delta E_d + \Delta E_q + \\ + (U_{d0}p + U_{q0})\Delta\vartheta &= 0, \\ -x\Delta i_d + (r+xp)\Delta i_q - \Delta E_d + p\Delta E_q + \\ + (-U_{d0} + U_{q0}p)\Delta\vartheta &= 0, \\ T_p x p \Delta i_d + (1+Tp)\Delta E_d &= \Delta E_{de}, \\ T_p x p \Delta i_q + (1+Tp)\Delta E_q &= \Delta E_{qe}, \\ Mp^2\Delta\vartheta + i_{q0}\Delta E_d + E_{d0}\Delta i_q - i_{d0}\Delta E_q - \\ - E_{q0}\Delta i_d &= \Delta D. \end{aligned} \right\} (3)$$

Условия устойчивости установившегося режима компенсатора. Рассмотрим устойчивость режима компенсации при различных способах регулирования токов в обмотках возбуждения компенсатора.

Дальнейшие выражения получены при пренебрежении активными сопротивлениями цепи статора ($r=0$).

Условия устойчивости при ручном регулировании токов возбуждения. В этом случае

ввиду медленности регулирования нужно считать $\Delta E_{de} = \Delta E_{qe} = 0$. Подставляя это условие в (3), находим уравнение возмущенного движения ротора:

$$\left[p^3 + \frac{1}{\sigma T} p^2 + \frac{1}{M} \left(S_\vartheta - S_\kappa + \frac{\mu}{\sigma} \frac{U^2}{x} \right) p + \right. \\ \left. + \frac{S_\vartheta - S_\kappa}{M\sigma T} \right] \Delta\vartheta = 0. \quad (4)$$

Для устойчивости состояния необходимо, очевидно, выполнение единственного условия

$$S_\vartheta \geq S_\kappa, \quad (5)$$

которое указывает на то, что мощность синхронного двигателя должна быть больше мощности компенсатора. Этот результат впервые был получен И. С. Бруком [Л. 1].

Таким образом, при ручном регулировании рассматриваемая схема в отношении необходимой мощности приводного двигателя не имеет преимуществ перед известной ранее схемой [Л. 4]. Ниже показывается, что при наличии автоматического регулирования мощность синхронного двигателя может быть значительно уменьшена.

Условия устойчивости при пропорциональном регулировании и при пренебрежении перекрестными электромагнитными процессами в компенсаторе. В этом случае мы должны положить, что $T=0$. Пропорциональное регулирование проще всего осуществить, питая обмотки возбуждения от многофазного коллекторного возбудителя и регулируя соответствующим образом напряжение, подводимое к возбудителю.

Уравнения регулирования могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \Delta E_{de} &= -x_\kappa \Delta i_d, \\ \Delta E_{qe} &= -x_\kappa \Delta i_q. \end{aligned} \quad (6)$$

Совместное решение (3) и (6) приводит к уравнению движения ротора

$$(Mp^2 + S_\vartheta) \Delta\vartheta = 0. \quad (7)$$

Условие устойчивости

$$S_\vartheta \geq 0 \quad (8)$$

указывает на то, что двигатель может иметь мощность, достаточную лишь для покрытия потерь холостого хода агрегата. Физически этот результат объясняется тем, что при отсутствии индуктивности в цепях возбуждения компенсатора ($L=0$) магнитные потоки статора и ротора вследствие мгновенного регулирования, будучи постоянно направленными навстречу друг другу, не создают опрокидывающего момента и ротор

компенсатора находится поэтому в положении безразличного равновесия.

Условия устойчивости при пропорциональном регулировании и учете переходных процессов в компенсаторе. Решая уравнения (3) и (6) при $T \neq 0$, получим:

$$\left[p^3 + \frac{x-x_k}{c_x T} p^2 + \frac{1}{M} \left(S_\partial - S_k + \frac{\mu}{\sigma} \frac{U^2}{x} \right) p + \frac{x-x_k}{M\sigma x T} S_\partial \right] \Delta \vartheta = 0. \quad (9)$$

Условия устойчивости

$$\left. \begin{aligned} S_\partial \geq S_k - \frac{\mu}{\sigma} \frac{U^2}{x} &= \left(1 - \frac{x-x'}{x_k} \right) \frac{S_k}{\sigma}, \\ S_\partial \geq 0, \\ \left| \frac{x-x_k}{M\sigma x T}, \frac{1}{M} \left(S_\partial - S_k + \frac{\mu}{\sigma} \frac{U^2}{x} \right) \right| &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Последнее неравенство после преобразований приводится к виду

$$x_k \ll x - x'. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что условием устойчивости работы компенсатора является выполнение неравенства (11), причем, как это следует из (10), мощность синхронного двигателя и в этом случае может быть весьма малой.

Заключение. Следует считать, что применение синхронного двигателя для привода серийного компенсатора ведет к улучшению устойчивости его работы. Устойчивый режим компенсации возможен при весьма простом способе регулирования — питания обмоток возбуждения компенсатора от трансформаторов тока через какой-либо коллекторный возбудитель. При учете запаздывания возбудителя мощность синхронного двигателя может составлять всего 5 ÷ 10% от мощности компенсатора (соответствующие подсчеты здесь не приводятся ввиду ограниченного объема автореферата).

Для сравнения следует упомянуть о том, что при вращении агрегата асинхронным двигателем [Л. 1, 2] устойчивый режим компенсации при обычном пропорциональном регулировании невозможен и достигается лишь после принятия мер, направленных к нейтрализации влияния напряжения скольжения, индуцирующегося в обмотках ротора компенсатора при асинхронном вращении.

Список обозначений

- x, x' — синхронное и переходное реактивные сопротивления (включая внешнее);
 $\sigma = \frac{x'}{x}$ — коэффициент рассеяния;
 $1 - \sigma = \mu$ — коэффициент магнитной связи;
 T — постоянная времени обмотки возбуждения, выраженная в радианах;
 M — постоянная инерции агрегата, выраженная в радианах;
 E_d, E_q — э. д. с. за синхронным реактивным сопротивлением в продольной и поперечной осях;
 E_{de}, E_{qe} — э. д. с. за синхронным реактивным сопротивлением, соответствующие напряжениям возбудителя в данный момент при закончившемся переходном процессе в компенсаторе;
 x_k — скомпенсированное реактивное сопротивление цепи;
 i_d, i_q — продольная и поперечная составляющие тока статора;
 U — внешнее напряжение, приложенное к цепи, в которую включен компенсатор;
 U_d, U_q — продольная и поперечная составляющие напряжения U ;
 ϑ — угол вылета между E_d и U ;
 D — вращающий момент приводного двигателя;
 p — оператор;
 Δ — символ малых отклонений;
 S_k, S_∂ — амплитуды статических моментно-угловых характеристик компенсатора и двигателя, причем

$$S_k = \frac{E_{d0} U_{q0} - E_{q0} U_{d0}}{x},$$

где E_{d0}, U_{d0} и т. д. — значения соответствующих величин при установившемся режиме.

Литература

1. И. С. Брук. Продольная компенсация линий электропередач. Электричество, № 13, 1936.
2. Л. В. Цукерник. Серийная компенсация реактивности мощных электропередач. Сборник научно-технических статей ХЭТИ, вып. III, 1937.
3. А. А. Горев. Основные уравнения переходных процессов синхронной машины. Электричество, № 2, 1938.
4. T. H. Morgan. Series Synchronous Condensers for Generation of Voltage Consumed by Line Inductance. AIEE стр. 872, 1929.

[30. 1. 1948]



Дальнейшее развитие характеристик асинхронных двигателей в системе относительных единиц

Кандидат техн. наук, доц. Н. И. КОНОВАЛОВ

Ивановский энергетический институт им. Ленина

В статье автора „Характеристики асинхронных двигателей в системе относительных единиц“ [Л. 1] приведены некоторые положения, которые дают возможность представить в известной форме ряд характеристик асинхронных двигателей, имеющих существенное значение при изучении эксплуатационных свойств и показателей их работы. В настоящей работе автор развивает эти положения.

Относительные потери. Из уравнения (4) цитированной выше работы следует, что суммарные потери в асинхронных двигателях P_c при любом значении относительной полезной нагрузки $p = \frac{P}{P_n}$ складываются из потерь холостого хода P_{a0} и приращения нагрузочных потерь в меди их обмоток $\Delta P_m = p^2 \cdot \Delta P_{m,n} = p^3 (P_{cn} - P_{a0})$. Относя эти потери к номинальной мощности двигателя P_n , находим:

$$p_c = p_{a0} - p^2 \cdot \Delta P_{m,n} = \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{f_a + p^2}{f_a + 1}. \quad (1)$$

Характеристики относительных потерь асинхронных двигателей $p_c = f(p)$, построенные по уравнению (1), представлены на рис. 1.

Характеристики¹ $\cos \varphi = f(p)$. Известно, что

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi^* \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}. \quad (2)$$

¹ Звездочкой обозначены эксплуатационные показатели, отнесенные к соответствующим номинальным показателям, например $\operatorname{tg} \varphi^* = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_n}$.

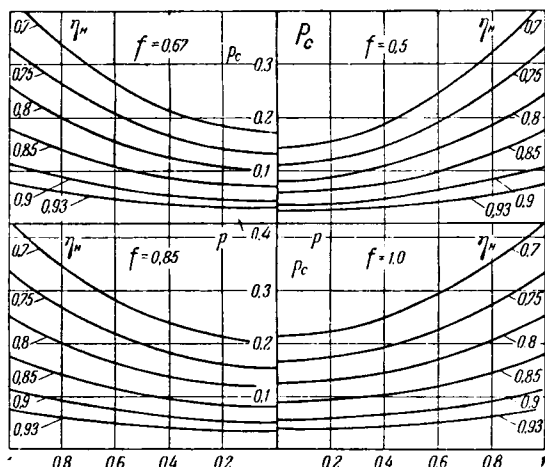


Рис. 1. Зависимость относительных потерь от коэффициента загрузки асинхронных двигателей, $p_c = f(p)$.

Пользуясь уравнением (15) [Л. 1], находим:

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{p_p}{p} \eta^*\right)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_n}}. \quad (2a)$$

Выразим знаменатель уравнения (2a) через паспортные данные. Используя (5) [Л. 1], имеем:

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_n \left[\frac{1 + p^2 f_p}{(1 + f_p)(p \eta_n + \frac{(1 - \eta_n)(f_a + p^2)}{(1 + f_a)})} \right]^2}}. \quad (2b)$$

где $f_p = \frac{\sin \varphi_n}{i_0}$ — коэффициент формы кривой $\cos \varphi$ [Л. 1].

На рис. 2 по этому уравнению построены характеристики

$$\cos \varphi = f(p).$$

Токковые характеристики и $\cos \varphi = f(i)$. Относительный эксплуатационный ток нагрузки $i = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{p \cos \varphi_n \eta_n}{\cos \varphi} = \frac{p}{\eta^* \cos \varphi^*} = \frac{1}{\frac{\eta^*}{p} \cdot \cos \varphi^*}$. (3)

Введя номинальные показатели, получаем (рис. 3):

$$i = \frac{p \eta_n + (1 - \eta_n) \frac{f_a + p^2}{f_a + 1}}{\cos \varphi^*} = \frac{p \eta_n + (1 - \eta_n) \frac{f_a + p^2}{f_a + 1}}{\frac{1}{\cos \varphi_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}}. \quad (3a)$$

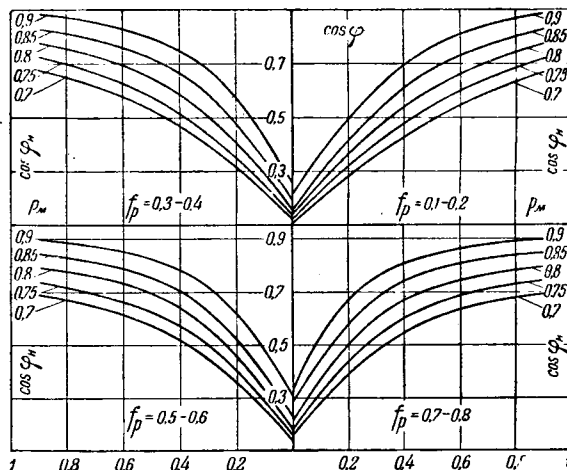


Рис. 2. Зависимость коэффициента мощности от коэффициента загрузки асинхронных двигателей, $\cos \varphi = f(p)$.

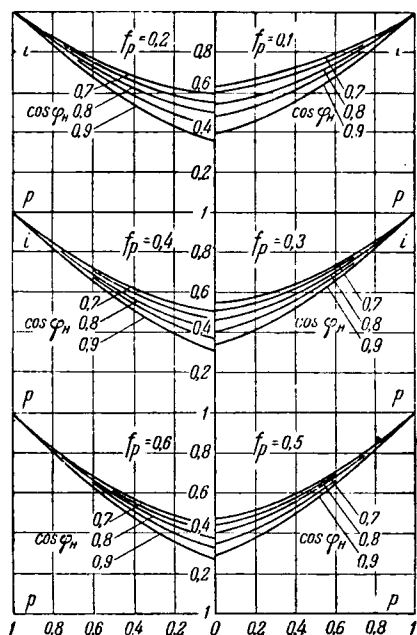


Рис. 3. Зависимость относительного тока нагрузки от коэффициента загрузки асинхронных двигателей, $i = f(p)$.

Наличие определенной взаимосвязи между относительными нагрузками по току i и мощностью p дает возможность переписать выражение (3) с целью установления функциональной зависимости $\cos \varphi = f(i)$ (рис. 4):

$$\cos \varphi^* = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_n} = \frac{p}{i^* \cdot i} \text{ или } \cos \varphi = \cos \varphi_n \cdot \frac{p}{i^* i}. \quad (4)$$

Относительное скольжение. Относительная нагрузка двигателя p может быть связана со скольжением следующим уравнением:

$$p = \frac{P}{P_n} \approx \frac{P + P_{\text{мех}}}{P_n + P_{\text{мех}}} \approx \frac{S(1-S)}{S_n(1-S_n)}. \quad (5)$$

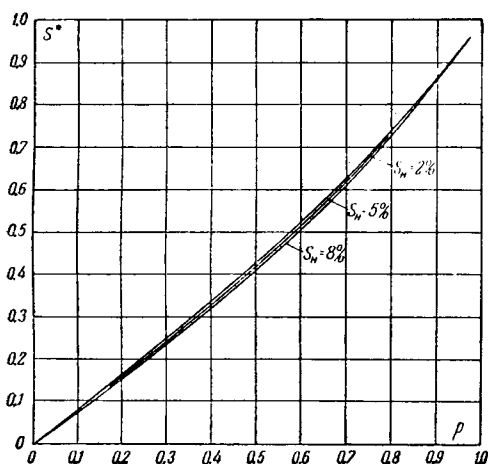


Рис. 5. Зависимость относительного скольжения от коэффициента загрузки асинхронного двигателя, $p = f(s)$.

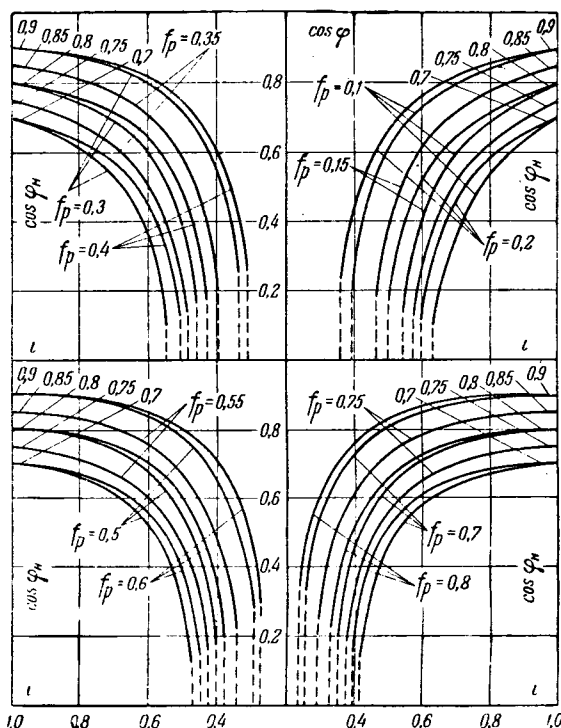


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности от тока нагрузки асинхронных двигателей, $\cos \varphi = f(i)$.

Уравнение дает несколько преуменьшенную величину относительной нагрузки в функции скольжения. Оно не учитывает изменения активного и реактивного сопротивлений ротора в связи с изменением потерь и частоты в нем. Учтя эти факторы (приложение 1) и принимая в среднем перегрев роторной обмотки при номинальной нагрузке $\tau_n = 40^\circ$ и коэффициент удельного увеличения сопротивления для меди и алюминия $\alpha = 0,004$, получаем уточненную зависимость (рис. 5)

$$p = \frac{S^* \left(\frac{1}{S_n} - S^* \right)}{\left(\frac{1}{S_n} - 1 \right) [1 - 0,16 (1 - S^*)]}. \quad (5a)$$

Заключение. Анализируя изложенное, заключаем, что дополнение паспортных данных (P_n , η_n , I_n , $\cos \varphi_n$ и S_n) коэффициентами форм кривых к. п. д. — f_a и $\cos \varphi = f_p$ обращает статические номинальные показатели работы асинхронных двигателей в динамически развертывающиеся эксплуатационные характеристики.

Относительные характеристики асинхронных двигателей могут быть использованы в условиях эксплуатации при организации работ по экономии электроэнергии и при проектировании с целью выбора наиболее рационального типа электропривода.

Приложение 1. Из уравнения (5) следует:

$$p \approx \frac{P + P_{\text{мех}}}{P_n + P_{\text{мех}}} = \frac{P_{\text{э.м.}} - P_{2\text{м.}}}{P_{\text{э.м.н.}} - P_{2\text{м.н.}}} = \frac{P_{\text{э.м.}}(1-S)}{P_{\text{э.м.н.}}(1-S_n)} =$$

$$= \frac{S(1-S) \cos \varphi_{2s}}{S_n(1-S_n) \frac{Z_{2s}}{Z_{2n}}} = \frac{S^* \left(\frac{1}{S_n} - S^* \right)}{\left(\frac{1}{S_n} - 1 \right) \frac{R_{2s}}{R_{2n}} \left(\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2s}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2n}} \right)}.$$

Отношение полных механических мощностей двигателя дает несколько преувеличенное значение p , при относительных нагрузках меньше единицы — третий множитель знаменателя всегда несколько меньше единицы. Приняв его равным единице, будем иметь приближение к действительной относительной нагрузке двигателя.

Относительное изменение активного сопротивления обмотки ротора при нагрузках меньше номинальной

$$\frac{R_{2s}}{R_{2n}} \approx 1 - \alpha \tau_{2n} \left(1 - \frac{\tau_{2s}}{\tau_{2n}} \right) = 1 - \alpha \tau_{2n} (1 - s^*).$$

Приложение 2 (пример). Найти эксплуатационные показатели работы и электробаланс электропривода группы однотипных станков. Паспорт двигателя: $P_n = 10$ кВт; $I_n = 20,5$ а; $\eta_n = 0,896$; $\cos \varphi_n = 0,83$; $S_n = 4,15\%$; $U_n = 380$ в. Из опыта холостого хода имеем: $I_0 = 8$ а или $i_0 = 0,39$; потери холостого хода $P_{a0} = 400$ вт или $p_{a0} = 0,04$.

Пополним паспортные данные величинами коэффициентов f_a и f_p . Суммарные потери при номинальной на-

$$\text{грузке } p_{c.n} = \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} = \frac{1 - 0,896}{0,896} = 0,116.$$

$$\text{Коэффициент формы кривой к. п. д. — } f_a = \frac{P_{a0}}{P_{c.n} - P_{a0}} = \frac{0,04}{0,116 - 0,04} = 0,527.$$

$$\text{Коэффициент формы кривой } \cos \varphi - f_p = \frac{\sin \varphi_n}{i_0} - 1 = \frac{0,554}{0,39} - 1 = 0,43.$$

Испытанием установлено:

Скольжение при холостом ходе трансмиссии $S_{mp} = 0,5\%$; скольжение при холостом ходе всех станков $S_{мех} = 2,3\%$; эксплуатационный ток при работе станков $I_{раб} = 18,7$ а.

Отнесем замеренные значения скольжения и тока к их номинальным величинам $S^*_{mp} = \frac{S_{mp}}{S_n} = \frac{0,5}{4,15} = 0,12$;

$$S^*_{мех} = 0,555; \quad i_{раб} = \frac{I_{раб}}{I_n} = \frac{18,7}{20,5} = 0,91.$$

По рис. 5 для кривой $S_n = 5\%$ находим при $S^*_{mp} = 0,12$, $p_{mp} = 0,16$ и соответственно мощность на валу двигателя $P_{mp} = p_{mp} \cdot P_n = 0,16 \cdot 10 = 1,6$ кВт; при $S^*_{мех} = 0,555$ — $p_{мех} = 0,635$ и $P_{мех} = 6,35$ кВт.

По рис. 3 для $f_p = 0,4$ (средний левый квадрант), по кривой $\cos \varphi_n = 0,83$ для $i_{раб} = 0,91$ находим: $p_{раб} = 0,89$ или $P_{раб} = 8,9$ кВт.

Установим эксплуатационные показатели работы двигателя при $p_{раб} = 0,89$. По рис. 4 находим $\cos \varphi = 0,81$ (левый верхний квадрант, $f_p = 0,3 \div 0,4$; $\cos \varphi_n = 0,83$), а по рис. 1 относительные потери (для $f_a = 0,5$, $\eta_n = 0,9$ и $p = 0,89$) — $p_c = 0,095$ или $P_c = p_c \cdot P_n = 0,095 \cdot 10 = 0,95$ кВт.

Электробаланс электропривода: механические потери станков равны: $P_{мех} - P_{mp} = 6,35 - 1,6 = 4,75$ кВт; мощность, связанная с осуществлением технологического процесса, включая и нагрузочные потери станков:

$$P_{тех} = P_{раб} - P_{мех} = 8,9 - 6,35 = 2,55 \text{ кВт.}$$

№ по пор.	Статья баланса	Мощность, кВт	%
1	Мощность, связанная с технологическим процессом	2,55	25,75
2	Механические потери всех станков	4,75	48,3
3	Потери в трансмиссии	1,6	16,3
4	Потери в двигателе	0,95	9,65
	Итого мощность, потребляемая из сети	9,85	100

Литература

1. Н. И. Коновалов. Характеристика асинхронных двигателей в системе относительных единиц. Электричество, № 9, 1945.

[1. 3. 1946]



О разбросе времени разряда длинных стержневых промежутков

Кандидат техн. наук Е. С. КУХАРКИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Закономерности разброса времени разряда длинных искровых промежутков имеют практическое значение при координации изоляции электрических систем 110—400 кв. Для правильного выбора уровня изоляции установки и проектирования рациональной защиты изоляции от перенапряжений нужно знать функцию распределения времени разряда, чтобы можно было оценить не только время разряда, но и вероятность его появления при данном разрядном напряжении.

Большим искровым промежутком посвящено сравнительно мало работ. Более подробно изучен

этот вопрос в исследованиях [Л. 1] времени разряда между стержнями 15—25 см.

В настоящей работе было предпринято экспериментальное исследование этого вопроса на стандартном стержневом промежутке длиной 100 см. Для обеих полярностей было проведено 12 серий измерений. Каждая серия состояла из ряда измерений, произведенных при одинаковых амплитудах воздействующего напряжения. Всего было проведено 291 измерение в виде съемки осциллограммы напряжения на электродах промежутка. По осциллограмме определялось время

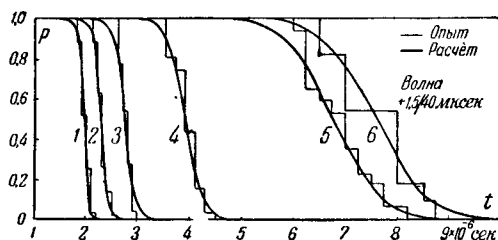


Рис. 1. Вероятность разряда стандартного стержневого промежутка 100 см при временах разряда, равных или больших t .

1 — 1200 кВ; 2 — 1100 кВ; 3 — 980 кВ; 4 — 800 кВ;
5 — 690 кВ; 6 — 670 кВ.

разряда и разрядное напряжение. Результаты опытов приведены на рис. 1, 2 и 3.

Рассмотрение полученных результатов показывает, что вероятность времени разряда при напряжениях $U > 1,2 U_{мн}$ можно характеризовать:

$$p = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

где $p = p(t)$ — вероятность разряда при времени, равном или большем t ;

τ — наиболее вероятное (и среднее) время разряда;

σ — среднее квадратичное отклонение от среднего времени разряда (дисперсия);

t — время разряда.

Степень точности, с какой нормальный закон соответствует полученным экспериментальным кривым вероятности, характеризует рис. 4. На этом рисунке экспериментальные данные сопоставлены со значениями, подсчитанными по уравнению (1) при значениях τ и σ , которые приведены в таблице. Сравнение показывает, что нормальный закон хорошо описывает вероятность разряда при временах, близких к среднему. При больших отклонениях от среднего времени — это удастся ему в меньшей степени. Дальнейшее уточнение может быть получено увеличением числа измерений и повышением точности измерения времени разряда.

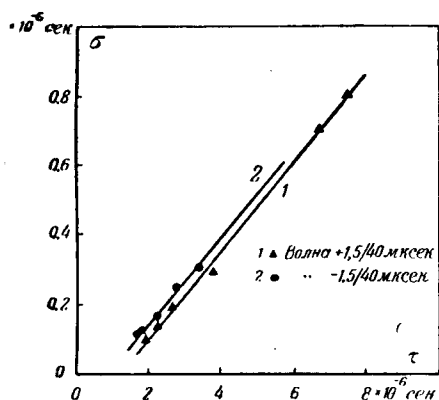


Рис. 3. Среднеквадратичное отклонение времени разряда σ в зависимости от среднего времени разряда τ .

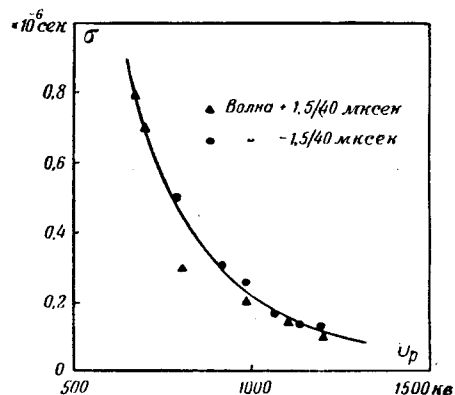


Рис. 2. Среднеквадратичное отклонение времени разряда σ в зависимости от разрядного напряжения U_p .

Серия	U_p , кВ	τ , мксек	σ , мксек	Количество точек в серии	Пределы отклонения напряжений, %
-------	------------	----------------	------------------	--------------------------	----------------------------------

При волне + 1,5/40 мксек

1	670	7,5	0,6	11	1
2	694	6,7	0,7	17	1
3	800	3,80	0,30	32	4
4	980	2,70	0,20	22	3
5	1100	2,23	0,14	35	3
6	1200	1,90	0,10	35	2

При волне — 1,5/40 мксек

1	785	5,80	0,50	18	1,5
2	910	3,40	0,30	18	1
3	980	2,75	0,25	13	1
4	1060	2,25	0,15	29	2
5	1130	1,80	0,13	20	2
6	1190	1,65	0,12	41	2

Следует отметить, что нормальный закон распределения времени разряда был обнаружен в исследованиях [Л. 1] запаздывания разряда промежутков 15—25 см, а также при статистической обработке автором результатов измерений времени разряда гирлянды подвесных изоляторов длиной 46" при стандартной волне и стержневого промежутка 20 см при волнах

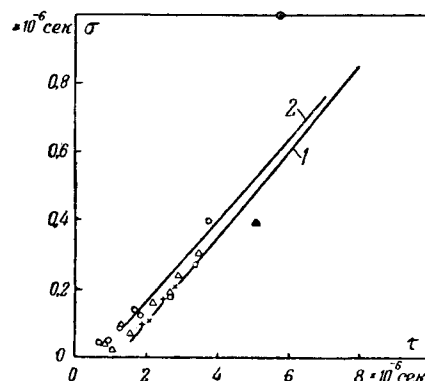


Рис. 4. Сопоставление полученных результатов (прямые 1 и 2) на стержневом промежутке 100 см с результатами статистической обработки исследований ЛЭТИ на стержневом промежутке 20 см.

○ — волна — 0,2/2 000
△ — — — 0,2/2 000
● — — — 0,3/11,5
+ — — — 0,3/11,5

0,2/2000 мксек и 0,3/11,5 мксек. Разброс в зависимости от напряжения (рис. 2) уменьшается обратно пропорционально напряжению. В области больших перенапряжений разброс уменьшается медленнее, чем при напряжениях, близких к минимальному. В пределах точности измерений разброс не зависит от полярности напряжения при одной и той же его амплитуде.

Разброс среднего значения времени разряда пропорционален среднему времени разряда. Дисперсия σ как функция среднего времени разряда τ может быть графически выражена прямой линией. Разброс при положительных импульсах меньше, чем при отрицательных при одинаковом

среднем времени разряда. Сопоставление полученной закономерности с результатами исследований ЛЭТИ подтверждает сделанный вывод (рис. 4) и позволяет считать, что разброс времени разряда в различных стержневых промежутках имеет величину одного порядка, вне зависимости от разрядного напряжения и длины искрового промежутка при одних и тех же значениях среднего времени разряда.

Литература

1. М. А. Бак и А. С. Зингерман и Н. Н. Николаевская. ЖТФ, т. 17, стр. 639, 1947.

[2. 11. 1948]



Расчетные соотношения к определению величин емкости и сопротивления растеканию тока между электродами, находящимися в неоднородных средах

Кандидат техн. наук А. П. БЕЛЯКОВ

Научно-исследовательский институт Министерства электропромышленности

Ранее нами были рассмотрены [Л. 1] некоторые случаи расположения электродов в однородных средах и указаны коэффициенты расположения P для определения емкости или сопротивления растеканию тока между электродами. В настоящей работе рассматриваются некоторые случаи расположения электродов в неоднородных средах и даны соответствующие им расчетные параметры P_1 .

Под неоднородными средами подразумеваются такие среды, которые отличаются друг от друга или величинами диэлектрических проницаемостей ϵ , или значениями удельных объемных проводимостей γ .

Емкость C между электродами, находящимися в неоднородных средах в электростатическом поле, может быть определена из соотношения

$$C = \frac{\epsilon_1}{9 \cdot 10^{11} \cdot P_1} [\phi] = \frac{\epsilon_1}{P_1} [см], \quad (1)$$

где ϵ_1 — относительная диэлектрическая проницаемость одной из сред (для воздуха $\epsilon_1 = 1$); $P_1, см^{-1}$ — коэффициент расположения.

Сопротивление растеканию тока R между электродами, находящимися в неоднородных средах в стационарном электромагнитном поле, может быть вычислено по формуле

$$R = \frac{1}{4\pi\gamma_1} \cdot P_1 [ом], \quad (2)$$

где $\gamma_1, ом^{-1}см^{-1}$ — объемная удельная проводимость одной из сред; $P_1, см^{-1}$ — коэффициент расположения.

Коэффициенты расположения P_1 должны быть выражены в зависимости от коэффициентов сред a_1, a_2, \dots, a_n . В случае определения емкости C по формуле (1) вместо коэффициентов сред a_1, a_2, \dots, a_n следует подставлять соответствующие значения диэлектрических проницаемостей сред $a_1 = \epsilon_1, a_2 = \epsilon_2, \dots, a_n = \epsilon_n$. В случае определения сопротивления R по формуле (2) следует производить подстановку соответствующих значений удельных объемных проводимостей сред $a_1 = \gamma_1; a_2 = \gamma_2, \dots, a_n = \gamma_n$. В таком случае удастся представить единые математические выражения для коэффициентов расположения P_1 для расчета емкости и сопротивлений между теми же электродами, находящимися в неоднородных средах в условиях соответственно электростатического и стационарного электромагнитного полей.

Так, например, коэффициент расположения для случая плоского круглого электрода (радиуса r), расположенного на границе двух неоднородных сред (a_1, a_2) бесконечного протяжения

$$P_1 = \left[\frac{\pi}{r \left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right)} \right],$$

и т. п. (см. таблицу).

Емкость рассматриваемого плоского круглого электрода согласно (1)

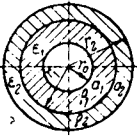
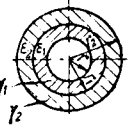
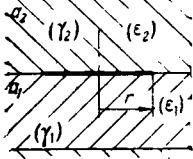
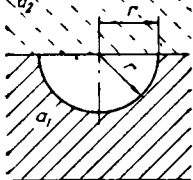
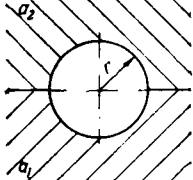
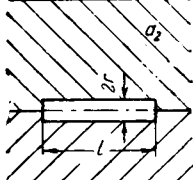
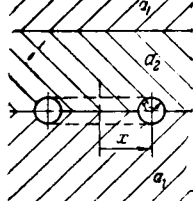
$$C = \frac{\epsilon_1 r \left(1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right)}{9 \cdot 10^{11} \cdot \pi} [\phi], \quad (3)$$

а сопротивление растеканию тока с рассматриваемого электрода

$$R = \frac{1}{4\gamma_1 r \left(1 + \frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)} [\text{ом}]. \quad (4)$$

Если пренебречь влиянием среды a_2 , то в этом частном случае получаются общеизвестные соотношения для пограничных условий ($\gamma_2 \approx 0$ или $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$).

Указанными ранее [Л. 1] и в настоящей работе способами обобщается большое число расчетных соотношений для определения емкости между электродами в электростатическом поле или сопротивления растеканию тока между ними в стационарном электромагнитном поле при расположении электродов в однородной и неоднородных средах.

Наименование		Коэффициент расположения P_1	Условия применения формул
Два concentрических электрода, разделенных двумя неоднородными средами		$P_1 = \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} + \frac{a_1}{a_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$	$r_2 > r_1 > r_0$
Два коаксиальных цилиндрических электрода, разделенных двумя неоднородными слоями (l — длина)		$P_1 = \frac{2}{l} \left[\ln \frac{r_1}{r} + \frac{a_1}{a_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right]$	$l > 2r_2;$ $r_2 > r_1 > r$
Плоский круглый электрод на границе двух неоднородных сред (b — толщина)		$P_1 = \frac{\pi}{r \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right)}$	$b \approx 0.$
Полусферический электрод на границе двух неодинаковых сред (площадь соприкосновения со средой a_1 — полусфера, со средой a_2 — круг)		$P_1 = \frac{2}{r \left(1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{a_2}{a_1}\right)}$ при $a_2 = a_1$, $P_1 = \frac{2}{r \left(1 + \frac{2}{\pi}\right)} \approx \frac{1,22}{r}$	$r > 0$
Сферический электрод в разных средах		$P_1 = \frac{2}{r \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right)}$	$r > 0$
Цилиндрический электрод на границе двух сред		$P_1 = \frac{4}{l} \frac{a + \frac{r}{l} - \sqrt{1 + \frac{r^2}{l^2}}}{1 + \frac{a_2}{a_1}}$ $P_1 = \frac{4 \ln \left(\frac{2l}{r} - 1 \right)}{l \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right)}$	$l > 2r$ $l \gg 2r$
Кольцевой цилиндрический электрод на границе двух сред		$P_1 = \frac{2}{\pi x} \frac{\ln \frac{8x}{r}}{1 + \frac{a_2}{a_1}}$ при $2\pi x = l$, $P_1 = \frac{4}{l} \frac{\ln \frac{4l}{\pi r}}{1 + \frac{a_2}{a_1}}$	$x \gg r$ $l \gg r$

$$* a = Ar \operatorname{sh} \left(\frac{l}{r} \right)$$

Литература

1. А. П. Белков. Электричество, № 6, стр. 60, 1948.
[11. 9. 1948]



Прибор для непосредственного измерения удельного сопротивления электролитов

Кандидат техн. наук, доц. Л. Ф. КУЛИКОВСКИЙ

Азербайджанский индустриальный институт им. Азизбекова

Во многих случаях практики встречается необходимость в приборе, непосредственно указывающем удельное сопротивление электролитов. Такого рода прибор был разработан автором и выполнен на кафедре Теоретических основ электротехники Азербайджанского индустриального института им. Азизбекова.

На рис. 1 приведена принципиальная схема этого прибора.

Действие прибора основано на определении напряжения U_x , пропорционального удельному сопротивлению R_x электролита, возникающему на зажимах ПП сосуда при прохождении через электролит тока I . Это напряжение U_x , подаваемое в измерительный контур, уравнивается э. д. с. U_p рамки ферродинамического измерителя. Можем написать:

$$U_p = U_1 \frac{W_p}{W} \left(1 - 2 \frac{\alpha}{\alpha_m}\right) a, \quad (1)$$

где U_1 — напряжение, приложенное к обмотке возбуждения;

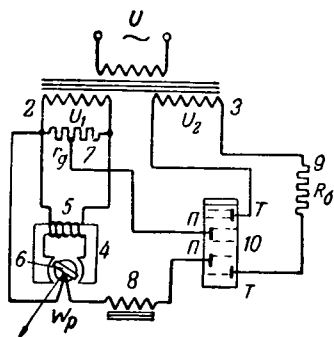
W — число витков обмотки возбуждения;

W_p — число витков рамки;

α — текущий угол поворота рамки;

α_m — максимальный угол поворота ее;

a — коэффициент использования магнитного потока, равный отношению потока, сцепленного с рамкой при ее крайнем положении, к полному потоку, создаваемому обмоткой возбуждения.



1, 2 и 3 — обмотки трансформатора питания; измеритель ферродинамического типа, имеющий: 4 — магнитопровод; 5 — обмотку возбуждения с числом витков W ; 6 — рамка с числом витков W_p ; 7 — делитель напряжения; 8 — дроссель контура рамки; 9 — балластное сопротивление; 10 — сосуд для электролита с токовыми зажимами ТТ и потенциальными ПП.

Рис. 1. Принципиальная схема прибора.

В указанном уравнении (1) за нулевое положение рамки принята крайняя левая отметка на шкале. Из выражения (1) следует, что при положительных приращениях угла α э. д. с. U_p будет менять как свою величину, так и знак. Для использования всей шкалы у прибора описываемой конструкции при однозначном изменении напряжения U_x , снимаемого с зажимов ПП,

необходимо в контур рамки ввести дополнительное напряжение U_k , смещающее рамку измерителя при $R_x = 0$ и соответственно $U_x = 0$ в крайнее левое положение. В этом случае изменение R_x от нуля до некоторого максимума вызовет перемещение рамки прибора от крайнего левого положения в крайнее правое. При наличии в измерительном контуре добавочного напряжения U_k при равновесии векторы напряжений U_k , U_x и э. д. с. U_p при их совпадении связываются уравнением $U_p = U_k - U_x$, откуда следует, что при $U_x < U_k$, U_p положительно и рамка прибора находится в левой части шкалы и соответственно при $U_x > U_k$, U_p отрицательно и рамка перемещается в правую часть шкалы. Напряжение U_k снимается с сопротивления r_g , являющегося частью сопротивления R_g делителя 7.

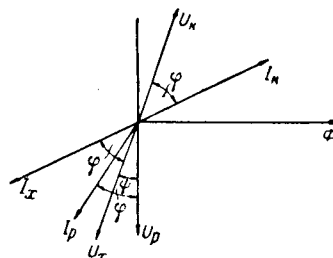


Рис. 2. Векторная диаграмма.

На рис. 2 приведена векторная диаграмма описанного прибора, где показаны: Φ — магнитный поток в зазоре прибора; U_p — э. д. с., наводимая этим потоком в рамке; U_k — напряжение, снимаемое с сопротивления r_g ; U_x — напряжение, действующее на зажимах ПП сосуда; I_p , I_k , I_x — токи, протекающие через рамку, вызываемые соответственно U_p , U_k и U_x . На диаграмме векторы U_x и U_k находятся в противофазе, что практически имеет место для выполненного прибора. Из уравнения моментов, действующих на рамку при ее равновесии, следует, что

$$I_p \sin \varphi = I_k \sin (\psi + \varphi) - I_x \sin (\psi + \varphi). \quad (2)$$

Определив из опыта холостого хода величины U_p , U_k и U_x и выразив их через напряжение источника питания U , а также найдя из опыта короткого замыкания общее сопротивление схемы относительно зажимов рамки, выражаем токи I_p , I_k и I_x через найденные напряжения и, ставя условием, что при $R_x = 0$, $\alpha = 0$, получаем уравнение шкалы прибора:

$$\alpha = 0,5 \frac{K_2}{a \cdot K_1} \cdot \frac{W}{W_p} \cdot a_m \cdot \frac{\sin (\psi + \varphi)}{\sin \varphi} \cdot \frac{R_x}{R_g + R_x + R'_x}, \quad (3)$$

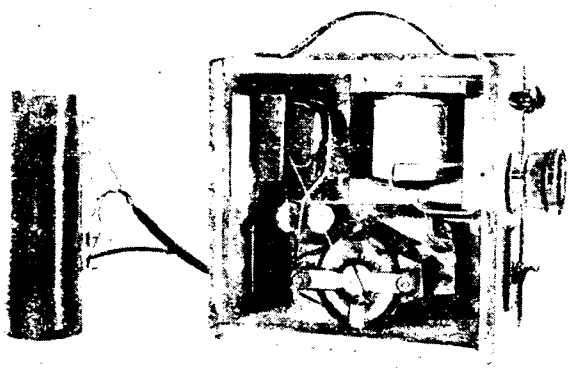


Рис. 3. Прибор для непосредственного измерения сопротивления электролита.

где $K_1 = \frac{U_1}{U}$; $K_2 = \frac{U_2}{U}$; R'_x — удвоенное сопротивление электролита между зажимами ПП. Выбирая R_δ значительно большим, чем $R_x + R'_x$, и учитывая, что $R_x = \rho_x \cdot o$, где b — постоянная сосуда, уравнение шкалы прибора примет вид:

$$\alpha = S \frac{R_x}{R_\delta} = S_0 \cdot \rho_x.$$

Необходимо указать, что в выведенном уравнении шкалы член $\frac{\sin(\psi + \varphi)}{\sin \varphi}$ принят равным единице, что практически из-за малости угла ψ может быть допущено. Угол φ выбирается равным 45° при максимальном значении R_x . Показания прибора не зависят от изменения в широких пределах величины питающего напряжения. Приведенная погрешность выполненного прибора со-

ставляет величину около 1%. Величина погрешности в основном зависит от угла ψ , который может изменяться из-за некоторого поворота вектора U_p вследствие изменения частоты питающего напряжения, а также и температуры обмотки возбуждения измерителя. Для избежания влияния угла ψ параметры схемы подбираются такими, чтобы ψ не превосходил величины $2 - 3^\circ$.

Конструктивно описанный прибор выполнен в виде двух элементов: одним является указатель, в корпусе которого кроме ферродинамического измерителя заключены: трансформатор, дроссель, балластное сопротивление и делитель напряжения; другим элементом является сосуд. Ферродинамический измеритель имеет следующие данные: напряжение питания — 12 в при токе 0,18 а; индукция в зазоре — 500 гс. Рамка имеет число витков 170, сопротивление ее 70 ом. Напряжение питания трансформатора $U = 220$ в; вторичное напряжение U_1 равно 12 в, а напряжение $U_2 = 90$ в. Балластное сопротивление $R_\delta = 10\,000$ ом. Исходя из условия, приборы выполняются на пределы измерения: 1 000 ом-см и 100 ом-см. Переход с одной шкалы на другую осуществляется изменением балластного сопротивления R_δ .

На рис. 3 изображена фотография общего вида прибора со снятыми передней стенкой и шкалой. Описанные приборы нашли применение в нефтяной промышленности для измерения удельного сопротивления пластовых вод, а также и глинистого раствора, используемого при бурении скважины. Прибор может быть выполнен и как самопишущий при соответствующей конструкции сосуда для электролита.

[13. 1. 1949]



Частный случай устранения индуктивных помех при измерении импульсного падения напряжения на активном сопротивлении

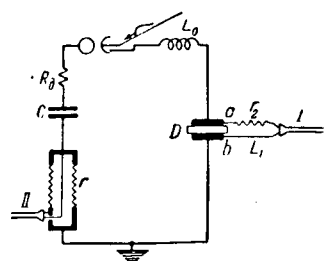
Кандидат техн. наук Л. И. ИВАНОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

При измерении больших импульсных токов или вызванных ими падений напряжения в активных сопротивлениях, как известно, существенной помехой являются э. д. с. индукции, возникающие в различных элементах измерительной схемы. Взаимным удалением или экранировкой удастся свести к практически несущественным величинам влияние импульсного контура на схемы обслуживания и управления катодного осциллографа. Выбор безиндукционной конструкции измерительных пунктов позволяет производить безошибочную регистрацию импульсного тока.

Трудности устранения индуктивной помехи возрастают при измерении падения напряжения на объекте, обтекаемом большим импульсным током, если нельзя вводить специальные проводники — зонды, которые могли бы исключить индуктированную составляющую напряжения. Частными примерами являются задачи измерения остающегося напряжения на вентильном разряднике или падения напряжения в канале трубчатого разрядника при протекании по ним импульсного тока.

Простейшим случаем, к рассмотрению которого мы и переходим, является измерение напря-



C — батарея конденсаторов;
 L_0 — сосредоточенная и распределенная индуктивность контура; R_0 — демпфирующее сопротивление; r — шунт для измерения тока; r_2 — добавочное сопротивление, регулирующее амплитуду волны тока в кабеле; I и II — кабели к катодному осциллографу; D — измеряемый диск.

Рис. 1. Принципиальная схема измерения вольтамперных характеристик рабочих сопротивлений разрядников.

жения на одном диске рабочего сопротивления вентильного разрядника. Диск включен в цепь генератора импульсных токов (рис. 1). Напряжение на диске измеряется между точками a и b ; оно складывается из активного падения напряжения в переменном (зависимом) сопротивлении диска и реактивного падения напряжения, обусловленного внутренним потоком в диске и потоком сцепления с контуром проводов, соединяющих точки a и b с кабелем (характеризуется самоиндукцией L_1 данного элемента схемы). При экспериментальном анализе ошибок измерения диск рабочего сопротивления разрядника заменялся тождественным по габаритам алюминиевым диском. Разрядная цепь генератора при этом становится линейной, и вследствие малого сопротивления алюминиевого диска реактивная компонента напряжения может быть выявлена более отчетливо.

На рис. 2 показана осциллограмма тока и напряжения на алюминиевом диске (получена на однолучевом катодном осциллографе). Отчетливо виден индуктивный характер напряжения на диске. В самом деле, если ток разряда в контуре подчиняется выражению

$$i = \frac{U_0}{\omega L_0} e^{-\delta t} \sin \omega t,$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_0 C} - \delta^2} \text{ и } \delta = \frac{R}{2L_0},$$

то напряжение на самоиндукции L_1

$$u = U_0 \frac{L_1}{L_0} e^{-\delta t} \frac{\sin \left(\arctg \frac{\omega}{\delta} - \omega t \right)}{\sin \left(\arctg \frac{\omega}{\delta} \right)}$$

при малых омических сопротивлениях стремится к

$$u \approx U_0 \frac{L_1}{L_0} e^{-\delta t} \cos \omega t.$$

Петля в вольтамперной характеристике алюминиевого диска свидетельствует о значительном сдвиге фаз между напряжением и током.

Предельно допустимое уменьшение сцепляющегося с измерительным контуром внешнего по-

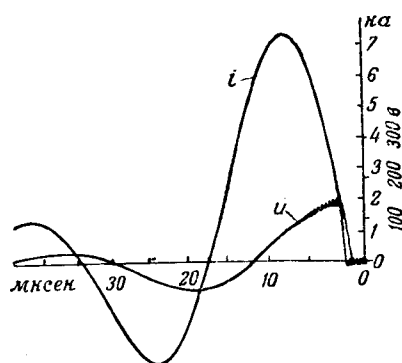


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения на алюминиевом диске (диаметр 100 мм, высота 20 мм).

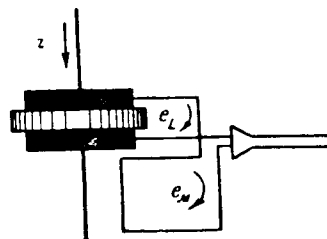


Рис. 3. Принципиальная схема компенсации индуктивного напряжения в измерительном контуре.

тока диска — укорочение проводов, удаление добавочного сопротивления r_2 и приближение кабеля к диску — не устраняет явления полностью.

При измерениях был с успехом применен искусственный прием освобождения от индуктивной составляющей в цепи измерения напряжения. Сущность метода состоит в создании дополнительного витка в цепи, измеряющей напряжение, э. д. с. взаимной индукции которого с разрядным контуром направлена навстречу э. д. с. самоиндукции (рис. 3).

Изменяя габариты рамки и ее связь с токоведущим проводом, относительно легко найти нужные соотношения, при которых исчезает петля в вольтамперной характеристике. Отсутствие петли указывает на отсутствие фазового сдвига между током в разрядной цепи и измеряемым падением напряжения, которое в данном случае становится только активным.

Описанный прием устранения индуктивных помех при измерении напряжений может быть распространен и на другие схемы. В частности, он может быть применен для компенсации индуктивной ошибки шунтов при измерении импульсных токов.

Ограничивающим условием допустимости метода является пренебрежительно малая длина волны собственных колебаний дополнительного контура по сравнению с длиной волны изучаемого процесса.

[6. 12. 1948]



Экранирование коаксиальных и симметричных кабелей

Кандидат техн. наук, доц. И. И. ГРОДНЕВ

Московский электротехнический институт инженеров связи

В настоящее время широко применяются два типа кабелей связи: коаксиальные и симметричные кабели, а также комбинированные, в которых наряду с двумя-четырьмя коаксиальными цепями располагается и определенное количество симметричных цепей (рис. 1). По коаксиальной цепи возможно одновременно передавать несколько сот телефонных связей и телевизионные программы в диапазоне частот в несколько мегагерц. Симметричные пары используются для многократной телефонной и телеграфной связи с помощью 12-и и 24-канальной аппаратуры уплотнения.

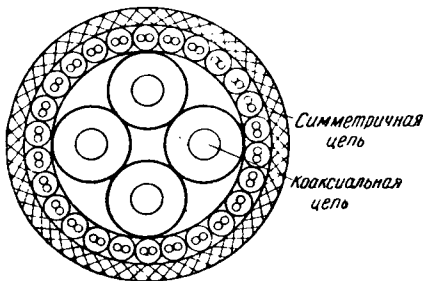


Рис. 1. Комбинированный кабель.

Довольно широко применяются высокочастотные экранированные кабели коаксиальной и симметричной конструкции также в технике радиосвязи для фидеров питания антенн пеленгаторов, радиостанций, а также для нужд радиолокации.

Одним из радикальных средств защиты коаксиальных и симметричных кабелей от взаимного влияния и от внешних источников помех является применение электромагнитных экранов.

В настоящем сообщении рассматриваются современные высокочастотные экранированные коаксиальные и симметричные цепи, дается их сравнительный анализ и приводятся формулы для расчета кабельных экранов.

Классификация экранов. Экраны, применяемые для защиты цепей связи от воздействия посторонних электрических и магнитных полей, можно разделить на электростатические, магнитостатические и электромагнитные.

Действие электромагнитных экранов основано на затухании энергии помех в металлической толще экрана за счет наводимых в нем вихревых токов. Электростатическое и магнитостатическое экранирование состоит в замыкании соответствующих полей низкочастотного спектра в металлической толще экранов благодаря повышенной электро- и магнитопроводности последних. Для магнитостатических экранов необходимо применять ферромагнитные материалы. Эффективность магнитостатических экранов ограничена низкочастотной областью передачи. С

возрастанием частоты происходит вытеснение магнитного поля из толщи экрана за счет вихревых токов, и повышенная магнитопроводность экрана теряет свое значение. Магнитостатический экран перестает действовать на принципе замыкания магнитных полей и переходит в режим работы электромагнитных экранов. Электростатическое экранирование выполняет заземленный цилиндрический экран из любого металла.

В области высоких частот при сильных переменных магнитных полях единственно эффективным средством защиты является электромагнитное экранирование.

Под коэффициентом экранирования η понимается отношение напряженности электромагнитного поля вне экрана к напряженности в той же точке без экрана.

Решив основные уравнения электромагнитного поля

$$\operatorname{rot} H = \gamma E + \varepsilon \frac{dE}{dt}; \quad \operatorname{rot} E = -\mu \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

относительно продольной составляющей электрического поля E_z , получим:

$$\nabla^2 E_z = \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} = \{j\omega\mu\gamma E_z\}, \quad (2)$$

где μ , γ , ε — соответственно магнитная проницаемость, электропроводность и диэлектрическая проницаемость.

Решением уравнения (2), как известно, является для проводников

$$E_z^{\text{np}} = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n I_n(\sigma r) + B_n K_n(\sigma r)] (M_n \cos n\varphi + N_n \sin n\varphi); \quad (3)$$

для диэлектриков

$$E_z^{\text{d}} = C_0 \ln r + D_0 + \sum_{n=0}^{\infty} (C_n r^n + D_n r^{-n}) \cos n\varphi,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$; $\sigma = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$;

A, B, C, D, M и N — постоянные интегрирования; I и K — бесселевы функции первого и второго рода.

Решая уравнение (3), получим выражение для коэффициента экранирования коаксиального кабеля

$$\eta^k = \frac{1}{\sigma c [K_1(\sigma c) I_0(\sigma b) + I_1(\sigma c) K_0(\sigma b)]}. \quad (4)$$

В области высоких частот, когда возможно использовать асимптотическое разложение в ряд

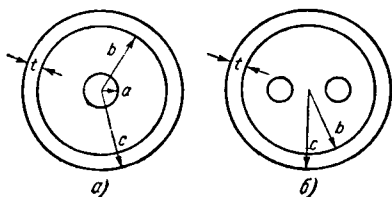


Рис. 2. Схема коаксиальной (а) и симметричной (б) цепей.

бесселевых функций (при σb или $\sigma c \geq 5$), получим:

$$\eta^k = \frac{1}{\text{ch} \sigma t}, \quad (5)$$

где $t = c - b$ — толщина экрана (рис. 2, а).

Выражая эффект экранирования через дополнительное переходное затухание, вносимое экраном, получим:

$$B_s^k = \ln \frac{1}{|\eta|} = \ln |\text{ch} \sigma t|, \quad (6)$$

или, при более высоких частотах, когда $\sigma t \geq 4 \div 5$:

$$B_s^k \approx |\sigma t| = \sqrt{\omega \mu \gamma} t. \quad (7)$$

Для кабеля симметричной конструкции коэффициент экранирования

$$\eta^c = \frac{1}{\sigma c [I_0(\sigma b) K_1(\sigma c) + I_1(\sigma c) K_0(\sigma b)] + \frac{(\sigma c)^2}{2} [I_0(\sigma c) K_0(\sigma b) - I_0(\sigma b) K_0(\sigma c)]}; \quad (8)$$

для высокочастотного диапазона (σc или $\sigma b \geq 5$) получим:

$$\eta^c = \frac{1}{\text{ch} \sigma t \left(1 + \frac{\sigma c}{2} \text{th} \sigma t \right)} = \eta_1^c \cdot \eta_2^c, \quad (9)$$

где $\eta_1^c = \frac{1}{\text{ch} \sigma t}$; $\eta_2^c = \frac{1}{1 + \frac{\sigma c}{2} \text{th} \sigma t}$ (рис. 2, б).

Переходное затухание, вносимое экраном симметричного кабеля:

$$B_s^c = \ln \frac{1}{|\eta_1^c| |\eta_2^c|} = B_1^c + B_2^c = \ln |\text{ch} \sigma t| + \ln \left| 1 + \frac{\sigma c}{2} \text{th} \sigma t \right|; \quad (10)$$

в области высоких частот, когда $\sigma t \geq 4 \div 5$, приближенно

$$B_s^c = B_1^c + B_2^c = \sqrt{\omega \mu \gamma} t + \ln \sqrt{\omega \mu \gamma} \cdot C \quad (11)$$

Анализ результатов. Особенности передачи по коаксиальному кабелю состоят в том, что его внешнее электромагнитное поле H_φ и E_z равно нулю и, кроме того, наружный провод кабеля выполняет одновременно две функции: является обратным проводом цепи передачи и действует как экранирующая оболочка.

Этим предопределяется принципиальное различие процессов экранирования в коаксиальном и симметричном кабелях. В первом случае ток непосредственно проходит по экрану, и экранирующий фактор обуславливается продольной составляющей электрического поля E_z , соответствующей падению напряжения в толще экрана (рис. 3). Показатель экранирования коаксиального кабеля η^k соответствует затуханию энер-

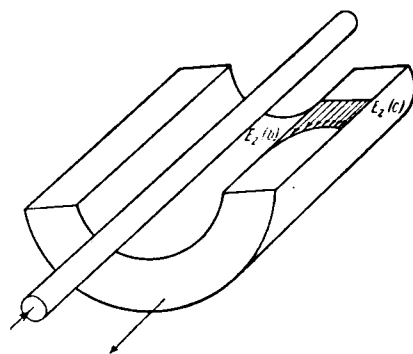


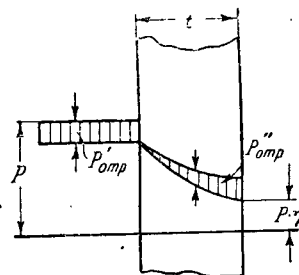
Рис. 3. Распределение плотности вихревых токов в толще экрана.

гии непосредственно в толще экрана. Поэтому как мешающее воздействие коаксиального кабеля на другие цепи, так и подверженность его помехам извне определяются лишь этим же фактором.

Отличие симметричной экранирующей цепи от коаксиальной состоит в том, что здесь ток не проходит непосредственно по экранирующей оболочке, а она находится в сфере действия электрического поля, создаваемого током, протекающим по экранируемой цепи. В соответствии с этим экранирующий эффект симметричной цепи обуславливается одновременным действием двух факторов: затуханием энергии в толще экрана η_1^c и затуханием энергии за счет отражения на границе диэлектрик-металл ($r = b$) и металл-диэлектрик ($r = c$), выражаемым коэффициентом η_2^c (рис. 4).

Рис. 4. Процесс прохождения электромагнитной энергии через экран

P — поле помех; P_η — экранированное поле; $P_{\text{отр}}^I$ — отраженное поле (диэлектрик — экран); $P_{\text{отр}}^{II}$ — отраженное поле (экран — диэлектрик).



Это положение имеет вполне логичное физическое объяснение, по которому процесс перехода энергии через экран принципиально аналогичен процессу распространения энергии вдоль цепи. Разница лишь в том, что при исследовании экранов следует рассматривать составляющие электромагнитного поля, обуславливающие распространение энергии не вдоль проводов (F_r и H_φ), а в радиальном направлении (E_z и H_φ) (рис. 5).

Так же как и в случае распространения электромагнитной энергии вдоль неоднородной цепи здесь наряду с затуханием в металлической толще экрана будет существенно сказываться затухание отражения на границах диэлектрик-экран и экран-диэлектрик; но при передаче энергии по проводам явление отражения крайне нежелательно, а применительно к процессу экранирования оно оказывается содействующим фактором.

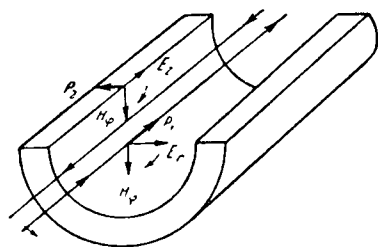


Рис. 5. Направление векторов Умова-Пойнтинга передачи P_1 и затухания в экране P_2 .

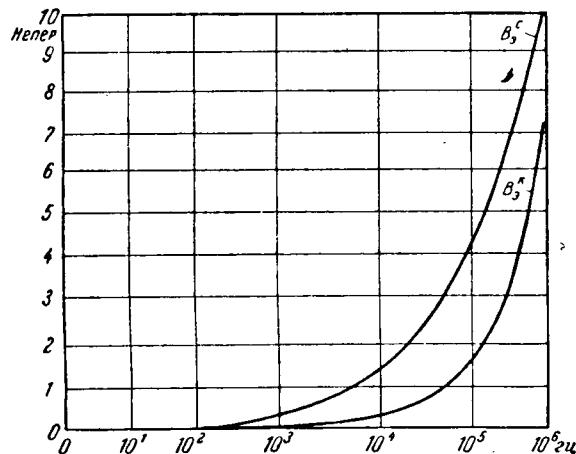


Рис. 6. Экранирующий эффект коаксиальной (B_s^k) и симметричной (B_s^c) цепей.

Результаты расчета экранирующего действия экранов коаксиальной и симметричной цепей в широком диапазоне частот приведены на рис. 6. На рис. 7 приведена удельная роль затухания в металле (B_1^c) и затухания отражения (B_2^c) симметричных экранированных цепей.

Экранирующий эффект возрастает в прямой зависимости от коэффициента вихревых токов $\sigma = \sqrt{j\omega\mu\eta}$ и толщины экрана t . Величина η изменяется от 1 до 0, практически характеризуя в последнем случае наивысший экранирующий эффект. Коэффициент экранирования η выражается в комплексной форме. Модуль характеризует степень экранирования, а угол показывает сдвиг фазы, который претерпевает электромагнитное поле на пути диэлектрик-экран-диэлектрик.

Величина η , характеризующая затухание в металле в коаксиальной и симметричной цепях с возрастанием частоты f уменьшается довольно резко по закону $\frac{1}{\sqrt{f}}$. Показатель η_2^c , со-

ответствующий затуханию отражения в симметричных цепях, изменяется по волнообразному закону, обусловленному колебанием $\text{th } \sigma t$ вокруг значения $\frac{\sigma c}{2}$ (рис. 8). Чем больше коэффициент вихревых токов и толщина экрана, тем быстрее эта волнистость затухает и соответственно уменьшается роль второго слагаемого (экран-диэлектрик) в формуле затухания.

Сравнивая относительную значимость составляющих B_1^c (затухание в металле) и B_2^c (затухание отражения) в общей системе затухания экра-

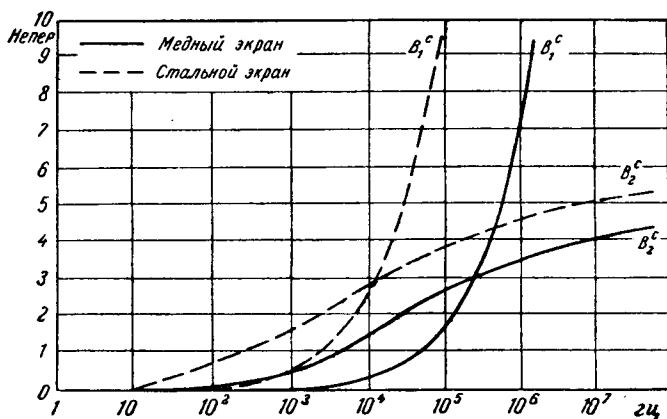


Рис. 7. Экранирующий эффект затухания в экране (B_1^c) и затухания отражения (B_2^c).

— стальной экран; — медный экран.

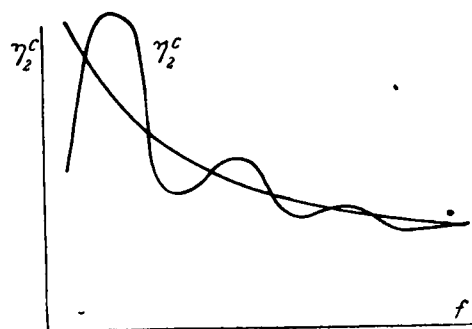


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициента экранирования за счет отражения η_2^c .

нирования симметричных цепей, можно отметить, что до определенной частоты наибольшую роль играет B_2^c , а затем становится преобладающим затухание в металле. Сравнительно со стальным экраном, медный дает преобладание затухания отражения над затуханием в металле в значительно более широком диапазоне частот (10^5 гц у меди и 10^4 гц у стали).

Экран, используемый в режиме работы коаксиального кабеля, дает экранирующий эффект, меньший по сравнению с экранированием симметричной цепи. При тех же толщине, материале экрана и частоте экран симметричного кабеля дает на B_2^c больше затухание по сравнению с экраном — наружным проводом коаксиального кабеля.

Рассматривая экранирующую способность различных типов экранов в зависимости от магнитной проницаемости μ используемого металла, следует отметить, что в исследуемом спектре частот (10^6 гц) стальной экран дает существенно большее экранирующее действие по сравнению с медным экраном. С возрастанием частоты эта разница уменьшается, но одновременно происходит существенное увеличение потерь на вихревые токи в стальном экране. Поэтому при выборе типа экрана следует учитывать не только его экранирующий эффект, но и потери, вносимые экраном в цепь передачи.

[23. 11. 1948.]

К статье А. А. Глазунова и С. А. Геликонского

ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНАЯ ШКАЛА СТАНДАРТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ 10—220 кВ
(Электричество, № 11, 1948)

Проф. С. А. БУРГУЧЕВ

*Московский институт механизации
и электрификации сельского хозяйства*

В настоящее время в различных инженерных кругах вновь усиленно дебатруется вопрос о необходимости обязательного введения промежуточного напряжения между 10 и 35 кВ; в частности, называется напряжение в 17 кВ (в особенности для сельскохозяйственных районов). Доводы в пользу этого напряжения элементарны: по сравнению с 10 кВ увеличивается радиус обслуживаемого района, а по сравнению с 35 кВ стоимость установленного киловольтметра или стоимость километра линии обходится дешевле. Кроме того, в пользу этого напряжения выдвигается еще один довод, заключающийся в том, что к системе 17 кВ с выведенным нулем представляется возможным присоединить однофазных потребителей на 10 кВ. Но все эти соображения не сопровождаются ни конкретными примерами, ни вариантами сравнениями. В лучшем случае один какой-либо случайный пример сразу используется для того, чтобы поднять вопрос о необходимости введения нового напряжения. Однако, при этом часто учитываются лишь капитальные затраты и экономия в цветных металлах, а эксплуатационные расходы упускаются из виду. Упускается из виду и увеличение стоимости складского резерва благодаря его разнообразию. Не принимаются во внимание затруднения и усложнения в производстве, связанные с каждой новой номенклатурой изделий.

Периодическую ревизию действующих стандартов в принципе нужно признать правильной, однако введение изменений должно быть обосновано цифровыми материалами, полученными путем вариантов сравнений, проведенных на длинном ряде конкретных объектов. Напомним, что такой же метод был применен в свое время и для выявления целесообразности потребительских напряжений для освещения 120 и 220 В, когда все проектные организации в течение определенного периода должны были выполнять проекты освещения крупных предприятий обязательно в двух вариантах, давая предпочтение тому, который экономически окажется более выгодным.

Путь этот долгий и не дешевый, но во всяком случае он менее дорогой, чем введение новой ступени напряжения без надлежащего ее обоснования.

Задача должна быть разрешена коллективами проектных организаций или же на базе материалов этих организаций.

Весьма ценная в отношении теоретического исследования статья А. А. Глазунова и С. А. Геликонского, к сожалению, не свободна от упрека с точки зрения вышеизложенных соображений, в особенности в части требования введения напряжения 154 кВ. Авторы указывают на то, что многообразие структур существующих электрических систем не позволяет провести исследование вопроса об экономически целесообразной шкале стандартных напряжений на конкретных примерах. Но тогда тем более

нельзя делать никаких выводов и на базе условных схем, рассмотренных в статье. Отдавая должное в данном вопросе теоретическому анализу условных схем, результаты, полученные таким путем, нужно считать контрольными, но ни в коем случае не решающими. Основные результаты должны получиться, как об этом уже упоминалось выше, на базе вариантных сравнений проектов, касающихся конкретных объектов. Тем более это справедливо, что сами авторы отмечают большое разнообразие в структуре систем.

Более того при суждении о низких ступенях шкалы напряжения (10—20 кВ) нельзя принимать то или иное решение оторванно от стандарта на генераторные напряжения, тем более, когда речь идет о распределении больших мощностей в крупных предприятиях, питаемых от собственных тэц и через кабельную сеть. Наконец, применение глубоких вводов непосредственно в производственные цехи не может не оказать своего воздействия на окончательное решение вопроса о необходимости введения промежуточного напряжения между 10 и 35 кВ.

Имеется достаточное количество действующих, а также вновь проектируемых электрических установок и линий электропередачи, применительно к которым возможно выполнить варианты расчетов на те или иные сомнительные напряжения и, таким образом, установить необходимость введения новых ступеней в действующую шкалу стандартных напряжений.

На организации, занимающиеся проектированием электрических установок, должна быть возложена обязанность выполнять характерные проекты в нескольких вариантах с применением различных дискутируемых напряжений. По мере накопления материалов вариантных сравнений, дающих основание для пересмотра существующей шкалы, специальная комиссия из заинтересованных организаций должна подготовить более совершенную шкалу стандартных напряжений; до этого никаких изменений в существующий стандарт вводить не следует.

Инж. М. М. ЛЕБЕДЕВ

*Лаборатория электротехники Академии наук
Армянской ССР*

Постановка вопроса о введении дополнительных напряжений в стандарт совершенно правильна и своевременна. Масштабы выпуска электрооборудования в предстоящие годы таковы, что могут оправдать освоение дополнительных серий, связанных с расширением шкалы напряжения. Поэтому авторы совершенно правы, когда рассматривают задачу только в энерго-экономическом аспекте.

Поставленная авторами задача весьма трудна: имеющиеся у нас сети нестандартных промежуточных напряжений находятся на грани отмирания и не показательны; зарубежные же системы в вопросах выбора напряжений в подавляющем большинстве случаев находятся в плену интересов устарелого основного капитала, что

приводит к разноречию и излишней большой шкале напряжений. Поэтому метод условных схем, примененных авторами, не может встретить возражений. С правильности метода говорит и тот результат, к которому пришли авторы, а именно полное подтверждение существующей шкалы напряжений, неоднократно проверенной в отдельных проектировках. Поэтому и выводы в части напряжения 154 кВ не могут встретить возражений.

Однако, если примененный метод является исчерпывающим для включения того или иного напряжения в шкалу, то он не может дать окончательных выводов о целесообразности исключения из шкалы того или иного напряжения. В самом деле, авторы отказываются от рассмотрения конкретных систем, ввиду многообразия их структуры, и рассматривают вопрос для систем с той или иной степенью неравномерности распределения нагрузки, но всегда однородных. Между тем, нужда в промежуточных напряжениях в шкале может возникнуть именно из-за неоднородности систем. При рассмотрении конкретных систем оказывается, что под принятой авторами схемой подходят весьма немногие системы, а для большинства будет характерно резкое изменение плотности нагрузки. Так, ряд систем характеризуется ростом нагрузки от периферии к центру; ряд систем представляет узкую полосу больших нагрузок, за пределами которой плотность нагрузок сильно снижается; ряд систем представляет как бы кольцо крупных нагрузок, в центре которого плотность нагрузки низка.

Сильно варьируют размеры площади, охватываемой системами. Наконец, мощность и конфигурация сети сильно изменяются в процессе развития системы. Именно эти отклонения от средней и способны вызывать к жизни промежуточные напряжения. Поэтому, рассматривая обсуждаемую статью как первый этап большой работы по стандартам, давший крайне важный результат в виде подтверждения действующей шкалы, необходимо дополнительно провести силами проектных и научных организаций исследование действующих и проектируемых сетей. Это исследование должно показать, какой эффект дало бы применение промежуточных напряжений в процессе постепенного развития этих сетей. Только после получения большого и разнообразного материала такого рода можно говорить о ненужности того или иного из промежуточных напряжений.

Шкала 10—20—35—66—110—154—220 кВ вместе с предлагаемым П. С. Ждановым напряжением 350—400 кВ позволит обеспечить не только осредненные условия электроснабжения, но и все возможные характерные случаи отклонения от них, что приведет к обеспечению одновременно экономии энергии, провода, изоляторов и оборудования. Не следует забывать, что экономия в несколько процентов на нынешнем этапе развития электрификации численно равна годовому объему строительства на том этапе, когда устанавливалась сокращенная шкала напряжений.

Следует также отметить, что при необходимости сопряжения сетей близких напряжений в процессе их дальнейшего роста (например, 154/220 кВ, 66/110 кВ и т. д.) могут применяться не трансформаторы, а автотрансформаторы, которые при таких коэффициентах трансформации будут значительно дешевле.

Вывод авторов о нецелесообразности напряжения 20 кВ для питания промышленных объектов правилен. Однако, напряжение 20 кВ оказывается исключительно выгодным для сетей сельскохозяйственной электрификации. Достаточно указать, что это напряжение оправдало себя в таких совершенно различных по физической и экономической географии республиках, как Армянская ССР и Латвийская ССР. Если напряжение 20 кВ может быть подведено прямо к колхозу, ферме или молотильному пункту, то при действующем стандарте приходится проектировать сети 35/10 кВ, что удорожает электроснабжение и сильно увеличивает потребность в оборудовании. Анализируя данные статьи, мы приходим к тому же выводу, что для подстанции 20—50 кВ (а таковы колхозные подстанции) при питании от районной системы напряжение 20 кВ выгоднее, чем 35 кВ. При питании от малых межколхозных ГЭС преимущества

напряжения 20 кВ еще более возрастут (за счет стоимости повысительных подстанций). Поэтому уже сейчас можно уверенно говорить о необходимости включения в стандарт напряжения 20 кВ, в первую очередь—для сельской электрификации.

Труднее говорить о напряжении 66 кВ. Однако, можно указать типовые случаи, когда это напряжение, повидимому, оправдается. Это, во-первых, в сочетании с напряжением 154 кВ, например, для питания длинных отнесенных маломощных линий, отходящих от мощной системы, или для питания района вдоль электрифицируемых при 154 кВ железных дорог. Во-вторых, в городских кабельных сетях, где кабель 66 кВ, будучи значительно дешевле кабеля 110 кВ, обеспечивает пропуск мощностей значительно больших, чем кабель 35 кВ. В-третьих, в сетях небольших энергокомбинатов, площадь охвата которых меньше рассмотренной в статье.

Инж. И. С. БЕССМЕРТНЫЙ

Колмунэнэргопроект

В статье не учтены особенности развития существующих городских электрических сетей, требующие дополнительных суждений о целесообразности номинального напряжения 20 кВ.

Хотя принятое авторами основное условие сравнения вариантов сетей «теоретического» города общепотребительно, все же возникает сомнение в его достаточности для решения данной задачи. Точнее, возможны возражения не против принятого условия минимума расходов вообще, но против применения его к вариантам сети, рассматриваемой как совершенно новое сооружение. В действительности для городских электрических сетей в отличие от большей части элементов электрических систем (центральных электрических станций, подстанций, линий электропередач и др.), всегда необходимо считаться с существующим состоянием электроснабжения города и направлением и темпами его развития.

При конкретном проектировании для большого числа городов, имеющих сети 6 кВ, чрезвычайно часто возникает необходимость коренной реконструкции сети при ожидаемом росте нагрузок. Причина этого лежит в практической невозможности (а не только нецелесообразности) обеспечить передачу потребной мощности по питающей сети 6 кВ. Если при этом основным источником питания городской электросети служит районная подстанция, то решение задачи обычно находят в глубоком вводе напряжения 35 кВ. Здесь можно отметить, что подобное решение, признанное авторами нецелесообразным при промежуточной трансформации 35/10 кВ, оказывается единственно возможным для случая 35/6 кВ при действующем стандарте напряжений. Если, однако, в покрытии потребной мощности города основную роль играют местные тэц, то подобное решение чрезвычайно неэкономично, ввиду необходимости повысительной трансформации на 35 кВ с последующей понизительной—35/6 кВ при переходе к распределительной сети 6 кВ.

В то же время вариант развития тэц при напряжении 10 кВ приводит, как показал в некоторых случаях опыт, к значительным неудобствам переплетения сетей с близкими напряжениями 6 и 20 кВ, а частично к очевидно неэкономичной трансформации 10/6 кВ.

Между тем, напряжение 20 кВ позволяло бы в этих условиях не только осуществить глубокий ввод от районных подстанций или непосредственный выпуск генераторной мощности городских тэц, но и обеспечить постепенное проведение реконструкции городских сетей.

На этом пути существующая схема двух напряжений (6/0,38 кВ) первоначально усложняется наложением питающей сети третьего напряжения с промежуточной трансформацией 20/6 кВ. В дальнейшем существующая распределительная сеть 6 кВ постепенно вытесняется вновь создаваемой сетью 20 кВ и осуществляется новая схема двух напряжений повышенного уровня (20/0,38 кВ).

Напряжение 20 кВ представляет интерес прежде всего как повышающее генераторное напряжение, причем правильнее быть может говорить о напряжении порядка 20 кВ. Имеется в виду, что по сетевым условиям сказанное ранее можно распространить на напряжения

15—17,5—20 кВ, если это потребуется по производственным условиям.

Таким образом, дополнительный учет условий развития существующих городских электрических сетей 6 кВ может повлиять на выводы авторов статьи в части напряжения порядка 20 кВ и привести к признанию целесообразности включения такого напряжения в стандартную шкалу.

Инж. Я. М. БОЛЬШАМ

Центроэлектромонтаж

Авторы статьи на основании своих исследований приходят к заключению о нецелесообразности введения в ГОСТ напряжения 20 кВ. Нельзя согласиться с этим выводом для той части промышленных установок, в которых распределяются значительные мощности на протяженных площадках (металлургические, химические и другие энергоемкие производства).

По имеющимся данным при напряжении 20 кВ аппаратура обходится в 1½ раза дешевле, чем при напряжении 35 кВ. Кабели на 20 кВ также значительно дешевле и легче кабелей на 35 кВ и могут изготавливаться на меньшие минимальные сечения, чем кабели на 35 кВ. В связи с этим можно полагать, что авторы статьи в своих исследованиях принимали завышенную стоимость установки при напряжении 20 кВ, иначе капитальные затраты при этом напряжении не могли быть выше, чем при напряжении 35 кВ. При правильной оценке стоимости установки на 20 кВ представляется экономически целесообразным для значительного числа промышленных энергоемких предприятий выполнять питание при напряжении 20 кВ как от собственных тэс с генераторами на 20 кВ, так и от районных подстанций.

Статья не дает достаточных оснований для отказа от напряжения 20 кВ. Было бы весьма полезно, если бы авторы статьи указали те соотношения между стоимостями, которые они приняли в своих расчетах для напряжений 20 и 66 кВ, для которых отечественная промышленность в настоящее время не изготавливает электрооборудования.

Кандидат техн. наук, Г. С. ПЛИСС

Управление по стандартизации

Авторами статьи рассматривается шкала напряжений в диапазоне 10—220 кВ и при этом они ссылаются на ОСТ 4760, утвержденный в 1932 г. взамен ОСТ 569. Сле-

дует отметить, что в настоящее время взамен ОСТ 4760 действует ГОСТ 721-41 «Номинальные напряжения приемников электрической энергии, генераторов и трансформаторов», утвержденный в 1941 г. Таким образом, речь идет о пересмотре именно ГОСТ 721-41, а не ОСТ 4760.

Номинальные напряжения трехфазного тока свыше 6 кВ по ГОСТ 721-41 приняты 10; 35; 110 (154); 220 кВ. Применение номинального напряжения поставленного в скобках (154) ГОСТ не рекомендуется. Авторы статьи предлагают снять скобки с номинального напряжения 154 кВ и ввести его в шкалу напряжений на равных правах с напряжениями 110 и 220 кВ. Учитывая, что капитальные затраты на сооружение сети 154 кВ приближаются к капитальным затратам при сети 110 кВ (возрастают на 10—25%), а эксплуатационные расходы и потери энергии в сети, являющиеся постоянно действующими факторами уменьшаются, предложение о снятии скобок с номинального напряжения 154 кВ целесообразно рассмотреть при подготовке к утверждению проекта нового стандарта на номинальные напряжения.

Производство электрооборудования на напряжении 154 кВ в свое время было освоено. На это напряжение выпускались трансформаторы, выключатели, разъединители и трансформаторы напряжения. Протяженность сетей на номинальное напряжение 154 кВ к 1938 г. достигла в СССР примерно 500 км.

В 1949 г. должен быть закончен и представлен на утверждение проект нового стандарта на номинальные напряжения взамен ГОСТ 721-41. Пересмотр этого стандарта имеет большое значение, так как стандартные номинальные напряжения служат базой стандартизации всего электрооборудования. При пересмотре стандарта встает ряд важнейших вопросов, не затронутых в статье, например, о введении нового напряжения 660 в (660/380 в) для системы напряжения распределительных низковольтных сетей (Электричество, № 6, 1948) и напряжения 380 кВ (Электричество, № 11, 1948); об установлении стандартом требований, гарантирующих качество электроэнергии (допустимые колебания напряжения и частоты).

Вопрос об установлении в стандарте требований, гарантирующих качество электроэнергии, особенно важен в связи с законом о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг., в котором указывается на необходимость обеспечения высокого качества электроэнергии.

Было бы полезно опубликовать в журнале «Электричество» полный проект стандарта, разрабатываемый Министерством электростанций, и затем обсудить его на страницах журнала.

(Продолжение дискуссии в № 6)

КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Для выявления и обсуждения запросов читателей к журналу „Электричество“ редакция совместно с организациями ВНИТОЭ проведет в 1949 г. однодневные читательские конференции:

в Киеве	в мае,
в Ленинграде	в июне,
в Свердловске	в сентябре.

Редакция журнала и Правление ВНИТОЭ приглашают читателей журнала „Электричество“ указанных городов подготовиться к активному участию в работе конференции, о дне и месте открытия которой будет помещена информация в местной прессе.

К составлению электротехнических правил и норм

(Электричество, № 10, 1948)

Инж. Н. Р. ШУКЮРОВ и инж. М. С. ТРИФЕЛЬ

Всесоюзный научно-исследовательский институт по технике безопасности
в нефтяной промышленности

Редакционная передовая статья в № 10 журнала своевременно привлекла внимание к задаче составления электротехнических правил и норм. Следует быстрее принять согласованные решения по принципиальным вопросам этих важнейших технических руководств, которые должны способствовать дальнейшему росту электрификации страны на высоком техническом уровне.

Однако, упоминаемая выше статья, отражая в значительной мере точку зрения МЭС и удовлетворяя все специальные требования энергосистем и электроснабжающих организаций, не удовлетворяет требований электротехнических хозяйств промышленных предприятий, вообще, и нефтяной промышленности, в частности.

Излагаемые ниже соображения о том, какова должна быть структура правил и норм, обобщают мнения большого числа энергетиков-нефтяников и являются выводом, к которому пришел Всесоюзный научно-исследовательский институт по технике безопасности в нефтяной промышленности (ВНИИТБ) в результате многолетней работы в этой области.

Структура правил и норм. Требования стройности всего комплекта правил и норм не должно иметь оторванного от практических условий характера и не должно приводить к неудобству применения Правил. В самом деле, предлагаемый в статье в № 10 журнал комплекс Правил и норм должен состоять из: а) 4 книжек правил безопасности (для станций и подстанций, для линий высокого напряжения, для городских и сельских сетей, для промышленных предприятий и низковольтных установок) и руководящих указаний по защитным средствам; б) общих для всех отраслей промышленности правил технической эксплуатации электротехнических установок (ПТЭ), издаваемых отдельной брошюрой, и большого числа отраслевых ПТЭ, содержащих ссылки на 31 инструкцию, директивы и руководящие указания; в) общих для всех отраслей промышленности правил устройства электротехнических установок (ПУЭУ), издаваемых отдельной брошюрой, и большого числа отраслевых ПУЭУ; г) комментариев к правилам.

Наличие столь обширного свода правил и норм весьма усложнит нахождение и использование необходимого материала. Кроме того, трудности будут возникать при комплектовании правил и норм и при изучении их низ-

Излагаются соображения о структуре электротехнических правил и норм для электроустановок промышленных предприятий, вообще, и для нефтяной промышленности, в частности. Для облегчения пользования материалом предлагается новая схема компоновки отраслевых правил и норм. Статья печатается в порядке обсуждения.

вым обслуживающим персоналом электроустановок промышленных предприятий.

Правила безопасности. Действующие правила безопасности специализированы. Это отражает существующую в электросистеме узкую специализацию обслуживающего персона-

нала. Однако, все это совершенно не характерно для энергохозяйств промышленных предприятий, в которых один и тот же персонал осуществляет эксплуатацию линий, распределительных устройств и энергоустановок. Это приводит к необходимости использования в работе нескольких правил, что сильно усложняет работу персонала и подготовку его.

Выполнение требований организации ремонтных работ в высоковольтных установках затруднено для предприятий, не имеющих специального дежурного персонала и ремонтных бригад. Поэтому сложные распределение обязанностей между лицами, оформляющими наряд, осуществляющими допуск, между производителем работ, ответственным лицом и исполнителями работ зачастую не может быть выполнено.

Отрыв от Правил безопасности и выделение в отдельную книгу основных положений «по эксплуатации защитных средств от поражения электрическим током» — искусственен, ничем не оправдан и сильно затрудняет правильную эксплуатацию защитных средств.

Не меньшее неудобство представляет требования «стройности правил и норм» в вопросе, связанном с проведением повседневных работ персонала электротехнических хозяйств промышленных предприятий по ремонту, переустройству и сооружению отдельных электротехнических установок, а также в вопросах, связанных с безопасной организацией работ.

Вопросы безопасных методов монтажа и демонтажа и способы безопасного устройства электроустановок, имеющие важнейшее значение для работников взрывоопасных и пожароопасных объектов (включенные во все отраслевые правила безопасности), полностью опущены в правила безопасности при эксплуатации электроустановок и частично искусственно перенесены в правила устройства. Это положение особо ощутительно для работников нефтяной, угольной и других отраслей производства.

Правила технической эксплуатации (ПТЭ). Выпуск единых правил технической эксплуатации для электроустановок промышленных предприятий всех отраслей промышленности не может отвечать специфическим требованиям отраслевой энергетики. ПТЭ должны быть неразрывно увязаны с условиями производства и технологии каждой отрасли промышленности. Осуществление этой задачи в рамках единых общих правил невозможно.

Выделение же общих для всех отраслей вопросов в отдельное издание нам представляется не только нецелесообразным, но даже недопустимым. Общие вопросы и положения должны составлять вводную часть отраслевых ПТЭ. Вторую часть должны составлять специальные

отраслевые положения. Обе части должны быть тесно увязаны. Первая часть отдельных отраслевых ПТЭ должна различаться лишь в деталях, связанных с положениями второго специального раздела.

Правила устройства (ПУЭ). Комплектование правил устройства в виде отдельно издаваемой общей части и ряда отдельных отраслевых правил встречает те же возражения. Наличие в нефтяной промышленности ряда различных по технологии предприятий требует создания обширных правил устройства, освещающих ряд специальных вопросов. Эти разделы должны быть тесно увязаны с общей частью. Выделение общей части в отдельную книгу не представляет никаких преимуществ, так как вторая, специально отраслевая часть самостоятельного значения иметь не может и должна употребляться лишь совместно с первой.

Общие вопросы и специальные разделы правил устройства должны быть тесно увязаны, а потому целесообразнее правила устройства комплектовать также в виде одного издания, состоящего из двух частей.

Общая часть, охватывающая общие вопросы, в каждом отраслевом ПУЭ должна быть скомпонована таким образом, чтобы в ней помещались лишь разделы, нужные для данных отраслевых ПУЭ и тесно с ними связанные.

Вопросы классификации помещений по степени опасности и другие вопросы по безопасному устройству электроустановок данной отрасли (как-то: вопросы взрывной и пожарной безопасности) должны быть включены в правила безопасности, так как эти вопросы каждодневно необходимы в большей степени для персонала эксплуатационного, чем для строительно-монтажного.

Правила устройства по своей специфике должны ориентироваться в основном на удовлетворение нужд монтажно-строительных и проектирующих организаций.

В существующих ПУЭ вопросы по безопасному устройству распылены и включены отдельными пунктами во все разделы. Такое расположение материала облегчает работу монтажно-строительных и проектных организаций, но очень затрудняет использование этого материала эксплуатационным персо-

налом, повседневно занимающимся ремонтом и переоборудованием электроустановок.

Выводы. 1. Каждая основная отрасль промышленной энергетики должна быть снабжена комплексом правил и норм в составе трех руководящих положений: а) отраслевых правил безопасности; б) отраслевых правил технической эксплуатации; в) отраслевых правил устройства. Все эти правила и нормы должны содержать общую и специальную части, тесно между собой увязанные и отвечающие всем специальным требованиям эксплуатации, проектирования и монтажа электроустановок данной отрасли промышленности.

2. Отраслевые правила безопасности должны включать разделы подстанций, сетей и электроустановок промышленных предприятий данной отрасли. Каждый раздел должен иметь общую часть, охватывающую вопросы безопасного устройства, и специальную часть, описывающую безопасные методы их эксплуатации. В правила безопасности следует ввести основные положения по применению защитных средств и защитных заземлений.

3. Отраслевые правила безопасности должны охватывать установки высокого и низкого напряжения электрохозяйств данной отрасли промышленности.

4. Отраслевые правила технической эксплуатации и правила устройства должны выпускаться отдельными изданиями, каждое из которых должно содержать общие вопросы и специальную часть, тесно увязанную с технологией данного производства.



Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетики созывает 21 июня 1949 г. в Ленинграде совещание, на котором будут обсуждены

ПРАВИЛА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ СВЫШЕ 1000 ВОЛЬТ.

Оргкомитет совещания обращается к членам ВНИТОЭ, к отделениям ВНИТОЭ и заинтересованным организациям с просьбой прислать имеющиеся предложения об изменении или дополнении Правил по адресу: Ленинград, Стремянная ул. 10, ВНИТОЭ.

В Комиссии по светотехнике при Отделении технических наук Академии наук СССР

За 1948 г. и I квартал 1949 г. Комиссия по светотехнике при ОТН Академии наук СССР, руководимая членом-корр. Академии наук СССР М. А. Шателеном, обсуждала на своих заседаниях (7 пленумах, 13 заседаниях Московского отделения и 10 заседаниях Ленинградского отделения) результаты научно-исследовательских работ по светотехнике, выполненных в различных институтах и лабораториях Москвы, Ленинграда и Харькова, а также мероприятия по координации этих работ и по внедрению их в народное хозяйство. Ниже приводится краткая информация о заслушанных Комиссией докладов.

Теоретические основы светотехники. Доктор техн. наук, проф. А. А. Гершун в докладе «Формула Гольдгаммера и ее служба в фотометрии» показал, что наилучшей эмпирической формулой для спектральной кривой чувствительности глаза (относительной видности) является формула, предложенная в 1904 г. профессором Казанского университета Д. Гольдгаммером. Вопросу «о наиболее вероятном значении светового эквивалента лучистого потока» были посвящены доклады доктора физ.-матем. наук, проф. В. В. Шаронова, доктора техн. наук, проф. П. М. Тиходеева и кандидата техн. наук В. Е. Карташевской. В результате обмена мнениями Комиссия признала необходимым принять значение второй постоянной в законе спектрального распределения лучистого потока полного излучателя $C_2 = 1,438$ и световой эквивалент лучистого потока $(V_\lambda)_{\text{макс}} = 683 \text{ лм/вт}$. Комиссия внесла предложение в Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР об утверждении этих решений и введении их в жизнь с 1 января 1950 г. Доктор техн. наук, проф. С. О. Майзель в двух докладах об определении частоты импульсов в волокнах зрительного нерва человека поделился результатами выполненной им работы. Экспериментальная работа по изучению ослепленности, вызываемой сигнальными огнями, была доложена доктором техн. наук, проф. М. В. Соколовым.

Световые измерения. О новом приборе для измерения силы света источников света и световых приборов на указанном расстоянии сообщил доктор техн. наук, проф. А. А. Гершун в докладе «Телецентрический метод измерения силы света». Серия таких приборов разработана докладчиком совместно с А. А. Андреевым и А. А. Волькенштейном и пущена в производство. Комиссией были рассмотрены теоретические расчеты и опытные образцы ряда специальных приборов и установок: для измерения малых яркостей (работы кандидата техн. наук А. А. Волькенштейна); для измерения прозрачности атмосферы днем и ночью (установки доктора физ.-матем. наук, проф. В. В. Березкина, кандидата техн. наук Б. И. Ефремова); для измерения ультрафиолетового излучения (прибор кандидата техн. наук Д. Н. Лазарева и П. П. Захарова, прибор кандидата техн. наук Д. А. Шкловера, доктора физ.-матем. наук, проф. А. Н. Бойко и др.). В настоящее время вопрос о производстве приборов для световых измерений вносится Комиссией через Комитет выставок отечественного приборостроения при Государственном политехническом музее на соответствующее рассмотрение.

Источники света и световые приборы. Наиболее актуальным вопросом в области источников света попрежнему является проблема усовершенствования и внедрения люминесцентных ламп. Доктор физ.-матем. наук, проф. В. А. Фабрикант в докладе «Новые данные об

ультрафиолетовом излучении в люминесцентных лампах» сообщил о дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях разряда в парах ртути при низком давлении (о первом этапе этой работы см. Электричество, № 10, 1947). Кандидат техн. наук Д. А. Шкловер в докладе «Спектральные и цветовые характеристики излучения люминесцентных ламп и методы их контроля» изложил результаты проведенных всесторонних исследований люминесцентных ламп и продемонстрировал для переносных прибора для измерения цветовой температуры этих ламп. Приборы одобрены Комиссией для практического использования.

Специальный пленум Комиссии, состоявшийся в январе 1949 г., был посвящен вопросам разработки новых газоразрядных ламп сверхвысокого давления и дуговых ламп с повышенной световой отдачей. Инж. В. П. Сасоров (Московский электроламповый завод) сообщил о результатах многолетней деятельности по разработке и внедрению в производство ртутных ламп сверхвысокого давления. Некоторые из этих типов (шаровые лампы) уже включены в каталог завода. Новые, более совершенные образцы изготавливаются небольшими сериями. Имеются реальные возможности дальнейшего увеличения яркости этих ламп. Инж. Д. А. Гоухберг (Московский электроламповый завод) сообщил о достижениях в разработке ламп сверхвысокого давления с инертными газами (аргон, криптон, ксенон). Особенно благоприятные результаты получены при наполнении ламп ксеноном, давление которого при горении лампы достигает 40 ат. Докладчик демонстрировал в действии разработанную им ксеноновую лампу сверхвысокого давления мощностью 125 вт при световой отдаче 25 лм/вт. Характерной особенностью этой лампы является то, что дуговой разряд ее дает непрерывный спектр в ультрафиолетовой и в видимой областях спектра и линейчатый спектр в ближней инфракрасной области. Цветовая температура лампы равна 5400° К.

Интересная идея значительного повышения световой отдачи угольной дуги была высказана и обоснована доктором техн. наук, проф. Н. А. Карякиным. В результате углубленного исследования зависимости световой отдачи от различных параметров дугового разряда Н. А. Карякин установил новые закономерности и предложил оригинальный метод введения редких земель в разряд извне. Проведенные исследования дают уверенность в реальной возможности получения дуговой лампы с весьма высокой световой отдачей.

Известным достижением в области точного расчета прожекторных отражателей являются работы сотрудников ВЭИ: кандидатов техн. наук М. Г. Мальгина «Расчет прожекторных стеклянных отражателей» и В. Д. Комиссарова «Расчет копараболоида с помощью ряда». Эти работы, обсужденные в Комиссии, получили высокую оценку и будут способствовать повышению качества советских прожекторных отражателей.

Осветительные и облучательные установки. Обследование освещения школ, проведенное по инициативе общественных организаций в Москве и Ленинграде в 1947 г. вновь обратило внимание на значение хорошего освещения для снижения утомляемости учащихся и для успешной борьбы с близорукостью детей школьного возраста. На заседании Московского отделения Комиссии в июне 1948 г. этому вопросу был посвящен доклад доктора мед. наук, проф. П. К. Варищева (Институт школьной гигиены Академии медицинских наук СССР) «Состояние и

задачи освещения школ». Проект новых норм на освещение школ находится в настоящее время на утверждении. В результате обращения Ленинградского отделения Комиссии в соответствующие инстанции, школам Ленинграда отпущена осветительная арматура и лампы требуемой мощности; за состоянием освещения организован надзор органов городской санинспекции, освещенность в классах возросла в среднем в 5 раз. Улучшение школьного освещения продолжается.

Вопросу освещения промышленных предприятий был посвящен доклад доктора техн. наук, проф. А. А. Труханова (от Ученого совета охраны труда ВЦСПС) «Состояние осветительных установок промпредприятий».

Доклад художника В. С. Баркова (МХАТ им. Горького) был посвящен вопросам театральной светотехники и, в частности, изложению результатов работ, выполненных лабораторией освещения при Московском художественном академическом театре им. А. М. Горького. Комиссия дала положительную оценку выполненным работам и поддержала перед дирекцией театра план дальнейших работ лаборатории.

Одним из новых вопросов, поставленных перед советскими светотехниками, является вопрос светокультуры растений. Этому вопросу был посвящен специальный пленум Комиссии, на котором были заслушаны доклады доктора биол. наук, проф. В. С. Мошкова (Физико-агрономический институт) «Современное состояние светокультуры растений» и кандидата биол. наук А. Ф. Клешина (Институт физиологии растений им. К. А. Тимирязева Академии наук СССР) «Теория и практика светокультуры растений». Докладчиками был сообщен обширный теоретический и экспериментальный материал, полученный в результате многолетней работы над данным вопросом. Обсуждение этих докладов показало плодотворность объединения физиологов со специалистами светотехники. Для совместной разработки ряда вопросов Комиссией по фотосинтезу Академии наук СССР и Комиссией по светотехнике создана специальная группа под председательством доктора биол. наук, проф. А. А. Нечипоровича.

Обсуждению вопросов, связанных с применением ультрафиолетового облучения в гигиене, был посвящен объединенный пленум Комиссии по светотехнике и Комитета гигиены освещения АМН СССР, состоявшийся в мае 1948 г., на котором было заслушано 12 научных докладов. Пленум организовал специальную группу, состоящую из врачей биологов и светотехников,

по применению ультрафиолетового излучения в биологии и медицине.

На пленуме Комиссии, состоявшемся 28—29 января 1949 г. в Ленинграде совместно с Ленинградским отделением Союза советских архитекторов, были заслушаны: сообщение кандидата техн. наук Д. Н. Лазарева о проектах освещения станций ленинградского метро, доклад кандидата техн. наук Н. В. Горбачева о применении люминесценции в архитектуре и в архитектурном проектировании и доклад Д. Н. Лазарева о люминесцентном освещении выставочных зал Государственного Эрмитажа.

История светотехники. В сентябре 1948 г. в Москве состоялось объединенное заседание Комиссии по светотехнике и Комиссии по истории техники Академии наук СССР, на котором доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд сделал доклад «Жизнь и деятельность Александра Ильича Шапковского» (в связи с исполнившимся 150-летием со дня его рождения). В докладе были приведены новые данные о работах русского ученого А. И. Шапковского, в том числе о светосигнальных приборах, подводных фонарях, ракетных составах и самодвигающихся минах; особо было отмечено изобретение им дуговой лампы оригинальной конструкции.

Кандидат техн. наук, Д. Н. Лазарев сделал сообщение о первом съезде по вопросам нагревания и освещения, который состоялся в Ленинграде в 1908 г.

По заданию акад. С. И. Вавилова Комиссия приступила к составлению справочной книги по светотехнике, которая в сжатой форме должна отразить современное состояние всех отраслей отечественной светотехники. Ответственным редактором справочной книги по светотехнике, утвержден акад. В. С. Кулебакин. Редакционно-издательский совет Академии наук СССР принял решение включить эту книгу в план на 1950 г. в объеме 100 печатных листов.

Доктор техн. наук, проф. М. В. СОКОЛОВ
Ученый секретарь Комиссии

ОТ РЕДАКЦИИ

Редакция журнала обращается с просьбой к читателям, имеющим предложения по тематике и другим вопросам деятельности Комиссии по светотехнике при Отделении технических наук Академии наук СССР, прислать в ближайшее время свои соображения редакции.



Днепропетровский горный институт им. АРТЕМА

ДИССЕРТАЦИИ

В Ученом совете Днепропетровского горного института защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с января по июнь 1948 г.:

Н. А. Киклевич защитил 14 января 1948 г. диссертацию на тему «Влияние неравномерного воздушного зазора на основные характеристики рудничных асинхронных электродвигателей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пироцкий и кандидат техн. наук доц. Н. Е. Кузавев.

Исследованы: распределение магнитной индукции по окружности статора при неравномерном воздушном зазоре (проедание ротора); э. д. с., индуцированные гармониками воздушного зазора в обмотках статора и ротора; гармоника зазора, создаваемые совместным воздействием м. д. с. статора и ротора; возможные способы контроля

воздушного зазора во время работы двигателя. В результате оказалось, что метод П. А. Фридкина (Электричество, № 7, 1938) не является универсальным.

Обосновано применение испытательной катушки, соединенной с вольтметром, которая приставляется к активному железу статора и позволяет «выслушивать» зазор со всех сторон.

М. Г. Лирский защитил 26 марта 1948 г. диссертацию на тему «Анализ работы низковольтной электрической сети шахтного участка». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пироцкий и доц. Т. А. Занузванный.

Дан анализ работы низковольтной кабельной сети трехфазного тока, питающей врубовые машины, качающиеся конвейеры и т. п. Исходя из характеристик электродвигателей забойных машин (Электричество, № 4, 1946) и параметров шахтной кабельной сети, разработана систе-

ма мероприятий, обеспечивающих необходимую эксплуатационную надежность.

И. И. Бодненко защитил 23 апреля 1948 г. диссертацию на тему «Безопасность эксплуатации подземных электрических сетей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пирожский и кандидат техн. наук, доц. С. Р. Маймин.

Дано математическое исследование вопроса о зависимости напряжения прикосновения к корпусам электрических машин и аппаратов от параметров шахтной сети (сопротивление изоляции, емкость). Произведены многочисленные измерения в действующих шахтах для определения указанных параметров опытным путем. Сконструированы приборы для газовых шахт, обеспечивающие безопасность от электрического удара (реле утечки тока, испытатель изоляции сети стационарный и переносный). Разработаны мероприятия для повышения безопасности: улучшена конструкция шахтных защитных заземлений, кабельных арматур, шинных коробок и вводных муфт при электродвигателях и пускателях.

Т. А. Занузданный защитил 25 июня 1948 диссертацию на тему «Электроснабжение подземной электровозной откатки на однофазном переменном токе промышленной частоты». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. П. Пирожский и кандидат техн. наук, доц. С. Р. Маймин.

Дано математическое исследование вопроса о влиянии однофазной нагрузки (электровозная откатка) на симметрию напряжений в трехфазной силовой сети. Показано, что при обычных соотношениях между мощностями трансформаторов (трехфазного силового и однофазного тягового) нарушение симметрии будет ничтожным. При таких условиях трехфазная система считается практически симметричной и необходимость в изыскании устройств, распределяющих тяговую нагрузку на все три фазы силовой сети, отпадает.

В. А. Бунько защитил 25 июня 1948 г. диссертацию на тему «О применимости высокочастотного транспорта (вчт) в шахте». Официальные оппоненты: проф. П. К. Мицкевич и кандидат техн. наук, доц. С. Р. Маймин. Отзыв прислан также доктором техн. наук, проф. Г. И. Бабатом.

Показано, что применение высокочастотного электрического транспорта в шахте технически возможно, экономически целесообразно и желательно по условиям безопасности. Определены экспериментальным путем необходимые для проектирования параметры шахтного высокочастотного транспорта, а также тяговые характеристики высокочастотных электровозов с тяговыми электродвигателями типа ТР-10 и ДК-801А. Дано математическое исследование вопроса об оптимальной частоте.

Кандидат техн. наук В. А. БУНЬКО

Ученый секретарь Днепропетровского горного института им. Артёма



В Азербайджанском отделении ВНИТОЭ

Азербайджанское отделение Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетики большое внимание в своей работе уделяет организации технических конференций и совещаний по актуальным вопросам электротехники и электрификации Азербайджанской ССР. В 1948 г. были проведены конференции и совещания по вопросам: электрификации сельского хозяйства Азербайджана, электропривода станков-качалок в нефтяной промышленности (совместно с АзНИТО нефтяников), улучшения водохимического режима электростанций, топливного снабжения и качества топочных мазутов и внедрения новых сажеебдучих аппаратов.

В 1949 г. намечается проведение Всесоюзной научно-технической сессии по электроприводу в нефтяной промышленности.

На конференции рационализаторов и изобретателей на основе обмена опытом был составлен темник на 1949 г., содержащий свыше 40 тем. На Всесоюзный конкурс было послано 48 предложений по экономии топлива и электроэнергии.

В целях повышения квалификации членов Общества отделение организовало ряд докладов и лекций по различным отраслям науки и техники. По вопросам электро-снабжения и электропривода в нефтяной промышленности состоялось 13 докладов, по электрическим сетям и системам — 15, по автоматизации производственных процессов, по защите и измерительным приборам — 10, по борьбе с коррозией станционной аппаратуры — 7, по общим вопросам энергетики Азербайджанской ССР — 11, по истории отечественной науки и техники и др. — 40 докладов и лекций. На докладах присутствовало более 2300 чел.

В шести информационно-технических бюллетенях АзНИТОЭ, выпущенных за 1948 г., членами Общества было помещено 37 статей; 13 статей были помещены в сборнике «Энергетика Азербайджана», № 5, 8 статей — в сборнике научно-технических работ ячеек АзНИТОЭ при Азербайджанском индустриальном институте и 13 статей — в союзных и республиканских периодических изданиях.

Кандидат техн. наук Н. А. ЦЕКУН



В Институте автоматики и телемеханики АН СССР

Министерством высшего образования СССР разрешено Ученому совету Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР принимать к защите кандидатские и докторские диссертации, присуждать ученую степень кандидата технических наук и представлять к утверждению в ученой степени доктора технических наук по следующим специальностям: электронная автоматика,

автоматическое регулирование, автоматическое управление (автоматизированный привод), автоматический контроль, автоматическая защита, автоматические устройства и установки, элементы автоматики и телемеханики, телеуправление, телеизмерения, каналы связи.

Н. П. ХРУНОВ

Ученый секретарь ИАТ АН СССР



Профессор Л. И. Сиротинский

К 70-летию со дня рождения

Леонид Иванович Сиротинский родился в апреле 1879 г. в г. Николаеве. После окончания гимназии, в 1897 г. он поступил в Петербургский университет, закончить который ему не пришлось—во время студенческих демонстраций 1899 г. он был арестован, уволен из университета и выслан из Петербурга. По окончании в 1903 г. Льежского электротехнического института Л. С. Сиротинский сразу вернулся на родину и в 1904—1905 гг. принимал участие в революционном движении в Москве и в Петербурге.

Начало научно-педагогической деятельности Л. И. Сиротинского относится к 1907 г., когда он принял непосредственное участие в создании первого в России среднего Электротехнического училища в Москве. В этом училище он организовал большую часть электротехнических лабораторий. Работа в этом училище, преобразованном позднее в Московский практический электротехнический институт и, наконец, в Московский энерготехникум, продолжалась свыше 25 лет.

В 1917 г. Леонид Иванович был приглашен в Московское высшее техническое училище, где годом позже был создан Электротехнический факультет, который в дальнейшем выделился из МВТУ и превратился в самостоятельный институт—Московский энергетический институт им. Молотова. Здесь развернулась основная деятельность профессора Л. И. Сиротинского как крупнейшего специалиста в области техники высоких напряжений, создавшего свою школу и имеющего многочисленных учеников, в числе которых профессор и доктор технических наук С. С. Городецкий, П. С. Жданов, В. А. Карасев, В. В. Мешков, действительный член Академии наук СССР С. А. Лебедев и многие другие.

В МВТУ и в МЭИ Л. И. Сиротинский разработал новые курсы электрического освещения, электрической тяги, техники высоких напряжений; организовал и возглавил кафедру техники высоких напряжений и создал первоклассные лаборатории этой кафедры.

Написанные Л. И. Сиротинским книги по электрическому освещению вышли в трех изданиях, а по перенапряжениям и защите от перенапряжений—в четырех изданиях. Выпущенное Л. И. Сиротинским и его учениками трехтомное издание «Техники высоких напряжений» представляет собою капитальный труд, отражающий глубокую научно-педагогическую деятельность Л. И. Сиротинского.

Л. И. Сиротинский создал Отдел высоких напряжений во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина, выросшем на базе Государственного экспериментального института, основанного в 1921 г. К. А. Кругом вместе с Л. И. Сиротинским и другими профессорами МВТУ по указанию Владимира Ильича Ленина. Научно-исследовательские работы Отдела высоких напряжений ВЭИ, руководящее участие в которых Л. И. Сиротинского продолжалось вплоть до 1932 г., сыграли выдающуюся роль в развитии отечественной электропромышленности и в строительстве высоковольтных линий электропередачи. После 1932 г. и до настоящего времени Л. И. Сиротинский яв-



ляется консультантом ВЭИ и фактически осуществляет научное руководство большой группы лаборатории.

С 1923 г. Л. И. Сиротинский являлся членом Центрального Электротехнического Совета, через который прошли все проекты электростанций и сетей плана ГОЭЛРО. В качестве члена ЦЭС, а также консультанта Главэнерго Л. И. Сиротинский участвовал в экспертизах крупнейших сооружений: Днепростроя, Свирьстроя, Сталиногорской гзс, сеги Донбасса и др.

Помимо экспертной работы и активного участия в деятельности Технического совета Министерства электростанций Леонид Иванович проводил большую работу по вопросам: изоляции высоковольтных линий электропередачи, защиты от перенапряжений, заземлений, влияния на провода связи и по другим проблемам передачи электрической энергии.

Л. И. Сиротинский был членом президиума и товарищем председателя Электротехнического общества. Позднее Леонид Иванович избран председателем секции Электрических станций, подстанций и линий электропередачи МОНИТОЭ. В течение ряда лет Леонид Иванович являлся председателем Научно-технического общества МЭИ.

К основным печатным работам Л. И. Сиротинского относится: ряд глав по электротехнике сильного тока в справочнике для электротехников, издания 1914 г.; монография «Электрификация железных дорог дальнего следования постоянным током высокого напряжения» (1917 г.); монография «Перенапряжения и защита от перенапряжений» (1923 г.); книга «Основы техники электрического освещения» (1926 г.); совместно с проф. Б. Ф. Федоровым—книга «Основы техники электрического освещения» (1934 г.); книги «Перенапряжения и защита от перенапряжений» (издания 1931, 1937, 1945 гг.) и «Техника высоких напряжений», а также трижды переизданные «Руководящие указания по защите от перенапряжений».

Л. И. Сиротинский имеет правительственные награды и поощрения. За выдающуюся деятельность в МЭИ и в ВЭИ Л. И. Сиротинский награжден орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени и орденом «Знак почета», а также медалями.

Л. И. Сиротинский имеет ученую степень доктора технических наук. За выдающуюся научно-педагогическую деятельность Леониду Ивановичу присвоено в 1942 г. звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

В настоящее время Л. И. Сиротинский руководит в МЭИ им. Молотова кафедрой «Техника высоких напряжений» и является членом Технического совета МЭС СССР.

Отмечая 70-летие Л. И. Сиротинского, электротехническая общественность Советского Союза приветствует в его лице выдающегося ученого и деятеля высшей школы, отдающего все свои силы на служение Родине.

*Доктор техн. наук, проф. П. С. ЖДАНОВ
Доктор техн. наук, проф. В. В. МЕШКОВ
Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ
Доц. А. С. СЕРГЕЕВ*



Профессор Г. Н. Петров

К 25-летию научной, инженерной и педагогической деятельности

Георгий Николаевич Петров родился в мае 1899 г. в с. Купавны под Москвой. По окончании с золотой медалью гимназии он поступил в 1917 г. в МВТУ, сначала на механический факультет, а спустя год на созданный в МВТУ электротехнический факультет, который окончил в 1924 г. с оставлением при МВТУ для подготовки к научной и педагогической деятельности. Одновременно Г. Н. Петров вел с 1923 г. работу в научно-исследовательском институте (ныне ВЭИ). С 1923 по 1928 г. Г. Н. Петров проводил под руководством академика К. И. Шенфера научную работу в области теории электрических машин и участвовал в экспериментальных исследованиях электромашиного оборудования на промышленных предприятиях, а также на новых электростанциях, создаваемых по плану ГОЭЛРО.

В 1928 г. Г. Н. Петров, работая на Московском трансформаторном заводе, принял участие в расчетах первой в СССР серии высоковольтных трансформаторов. Одновременно и вплоть до 1936 г. Г. Н. Петров руководил трансформаторной лабораторией ВЭИ, выполнявшей для электропромышленности многочисленные исследования в области высоковольтного трансформаторостроения.

Труды Г. Н. Петрова в области трансформаторостроения и электрических машин широко известны. Его научная и практическая деятельность тесно связана с развитием этой отрасли электротехники в Советском Союзе и во многом содействовала развитию отечественной электропромышленности, обеспечив успешное и оригинальное разрешение крупных проблем трансформаторостроения. Особо следует отметить разработанную Г. Н. Петровым общеную теорию магнитного рассеяния трансформаторов.

Первые советские мощные нерезонирующие трансформаторы для Днепровской гидроэлектростанции были разработаны при непосредственном участии Г. Н. Петрова. Им были впервые вскрыты причины аварий трансформаторов, питающих мощные ртутные выпрямители, и были указаны способы предотвращения этих аварий. Эта работа обеспечила возможность создания оригинальной советской конструкции мощных выпрямительных трансформаторов, за что Г. Н. Петрову совместно с работниками Московского трансформаторного завода в 1948 г. была присуждена Сталинская премия.

Свои многочисленные теоретические работы в области трансформаторостроения Г. Н. Петров изложил в фундаментальном труде «Трансформаторы», изданном в 1934 г., а также в ряде статей, опубликованных в периодической печати. Большая руководящая работа была проведена Г. Н. Петровым по разработке общесоюзных стандартов по трансформаторам.

В области электромашиностроения Г. Н. Петрову принадлежит ряд исследований по теории асинхронных и коллекторных машин, режимам и методике испытаний синхронных машин и др. Г. Н. Петровым совместно с членами кафедры электрических машин МЭИ написан учеб-



ник по общему курсу электрических машин, получивший широкое распространение. В настоящее время он успешно работает над новой проблемой построения мощных синхронных генераторов.

Г. Н. Петров неоднократно участвовал в работах экспертных комиссий Госплана по вопросам электромашиного оборудования крупных электростанций-новостроек (Куйбышевской, Камской, Мингечаурской и др.).

В 1933 г. Г. Н. Петров был утверждён в учёном звании профессора, а в 1937 г. ему была присвоена учёная степень доктора технических наук. За выдающуюся научную и практическую деятельность в области электротехники Г. Н. Петрову присвоено в 1942 г. звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

Научно-исследовательская работа Г. Н. Петрова неразрывно связана с его плодотворной педагогической деятельностью в МЭИ им. Молотова, где он свыше 10 лет руководит одной из крупнейших кафедр — Электрических машин. Педагогиче-

скую работу Г. Н. Петров совмещает с учебно-методической работой. В 1932—1934 гг. Г. Н. Петров был деканом электромашиностроительного факультета МЭИ. В течение 12 лет он был заместителем директора МЭИ им. Молотова по научной и учебной работе. Г. Н. Петров уделяет большое внимание подготовке молодых научных кадров. Его многочисленные ученики работают на электромашиностроительных заводах и на электростанциях Советского Союза. Выдающиеся заслуги Г. Н. Петрова — советского ученого, инженера и воспитателя кадров энергетиков и электротехников — высоко оценены Правительством, наградившим его орденом «Красная звезда», орденом «Знак почёта» и медалями.

Георгий Николаевич Петров ведёт большую общественную работу в качестве члена правлений ВНИТОЭ, МОНИТОЭ и НТО МЭИ. Г. Н. Петров все годы тесно связан с промышленностью, являясь членом научно-технических советов Министерства электростанций СССР, Министерства электропромышленности СССР и ряда научно-исследовательских институтов. В течение 12 лет Г. Н. Петров состоит председателем экспертной комиссии по электротехнике Высшей аттестационной комиссии МВО СССР. Он является редактором журнала «Электричество».

Отмечая 25-летие научной, инженерной и педагогической деятельности Г. Н. Петрова и 50-летие со дня его рождения, научно-техническая общественность страны выражает уверенность, что и впредь творческая, инициативная работа юбиляра будет направлена на благо нашей Родины.

Директор МЭИ, канд. техн. наук, доц. В. А. ГОЛУБЦОВА

Член-корр. АН СССР, проф. К. А. КРУГ

Доктор техн. наук, проф. Ю. С. ЧЕЧЕТ

Кандидат техн. наук, доц. Ф. А. ГОРЯИНОВ

Редакция журнала «Электричество» и Государственное энергетическое издательство, в связи с 25-летием научной, инженерной и педагогической деятельности Георгия Николаевича Петрова горячо приветствуют его — старого автора журнала «Электричество», активного члена редакционной коллегии и редактора журнала, члена редакционного совета ГЭИ — и желают ему многих лет доброго здоровья и плодотворной деятельности.

В. Ф. Миткевич, М. А. Шателен, М. П. Костенко, А. А. Глазунов, Ю. В. Буткевич, И. А. Сыромятников, Н. А. Сазонов, Д. В. Калантаров, А. Д. Смирнов, Д. Д. Рейн, И. И. Ратгауз, Б. М. Тареев, Б. А. Протопопов, М. Г. Башкова.



Пионерская деятельность русских ученых и изобретателей в области электротехники

М. А. ШАТЕЛЕН. РУССКИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА. 379 стр., ц. 15 руб.
Госэнергоиздат, тираж 10 000, 1949.

Автор книги — заслуженный деятель науки и техники, член-корреспондент Академии наук СССР, один из выдающихся профессоров отечественной электротехники — широко известен в нашей стране и далеко за ее пределами. М. А. Шателен — не только один из основоположников электротехнического образования в России, но и один из продолжателей дела Яблочкова, Чиколева и других пионеров электротехники конца XIX в. и старейший из ныне здравствующих русских электротехников.

Богатая личными встречами со многими знаменитыми учеными и изобретателями электриками и физиками истекшего века, наполненная непосредственными наблюдениями и впечатлениями жизнь Михаила Андреевича Шателена представляет благодарный источник, использованный автором в только что изданной его работе. И эта фактическая сторона имеет, как мы покажем ниже, неоспоримую ценность, поскольку этой книгой М. А. Шателен в качестве историка и мемуариста многое принес современному молодому поколению из прошлого отечественной электротехники, компетентным свидетелем и очевидцем которого он был.

Эта книга наносит вышительный удар по враждебным попыткам принизить выдающуюся роль русской науки и техники, извратить или замолчать достижения русских ученых и изобретателей, их вклад в развитие науки об электричестве и в электротехнику. Инициативу Государственного энергетического издательства, выпустившего патристический труд М. А. Шателена о русских электротехниках второй половины XIX в., можно всячески приветствовать.

Автор предпослал своей работе специальное посвящение «студентам Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина». Книга написана хорошим, живым языком и читается легко. Правильно указание издательства в аннотации о том, что книга предназначена для широкого круга читателей, интересующихся историей науки и техники.

В книге двенадцать глав. Из них восемь (с третьей по десятую) представляют отдельные очерки о пионерской деятельности, протекавшей в основном (исключая В. В. Петрова) во II половине прошлого века, восьми русских ученых и изобретателей в области электротехники: В. В. Петрова, П. Н. Яблочкова, А. Н. Лодыгина, В. Н. Чиколева, М. О. Доливо-Добровольского, Н. Н. Бенардоса, Н. Г. Славянова и А. С. Попова.

В этих очерках, охватывающих почти три четверти книги, автор, не останавливаясь сколько-нибудь подробно на сообщении биографических сведений, освещает, главным образом, выдающуюся творческую роль перечисленных русских электриков и выявляет «значение их работ для того прогресса электротехники, плоды которого пожинает теперь все человечество». Необходимо отметить, что в очерках, и вообще в книге, уделено не малое место довольно обстоятельному описанию, кроме вышеперечисленных, также многих других русских деятелей второй половины XIX в., известных своими работами по применению электричества: П. Л. Шиллинга — изобретателя первого в мире электромагнитного телеграфа, Ф. А. Пироцкого — пионера передачи электроэнергии на расстояние по рельсам для тяги трамвайного вагона, Д. А. Лачинова, открывшего метод получения электролитического водорода посредством электролиза воды, А. Г. Столетова — установившего основные законы в области фотоэлектрических явлений, Р. Э. Классона и др.

Вводные главы (первая и вторая) кратко освещают состояние учения об электрических и магнитных явлениях в конце первой половины XIX в. и развитие применений электрической энергии к концу прошлого века.

Заключительные главы (одиннадцатая и двенадцатая) посвящены: истории создания Электротехнического (VI) отдела Русского технического общества, который послужил центром объединения и организации русской электротехнической общественности в последние десятилетия XIX в., и истории возникновения в 1880 г. печатного органа русской электротехнической общественности — журнала «Электричество», ставшего летописью русской электротехники.

В книге отсутствует библиографическая справка. Список избранных автором и рекомендуемых литературных источников был бы весьма полезен для многих читателей, специально работающих над данной темой или желающих перейти к более детальному ознакомлению с предметом. Относящийся к последнему список литературы, составленный проф. Шателеном, представлял бы значительный интерес.

Автор отразил в своей книге не только литературные источники, архивные материалы, записки современников, но и многое, что ему известно по устным рассказам лиц, лично знавших великих изобретателей, и, наконец, то, что сохранилось в собственных воспоминаниях автора о большинстве ученых и изобретателей, деятельность которых описана в данной книге.

В предисловии М. А. Шателен пишет «...я имел возможность познакомиться с работой многих русских электротехников и ...воспользовался для настоящего труда своими воспоминаниями и впечатлениями». «...мне приходилось во время моей работы в компании Эдисона, во время Парижской выставки 1889 г. и после нее встречаться с П. Н. Яблочковым. Затем, по возвращении в Россию, я встречался не раз в Петербурге с А. Н. Лодыгиным и Н. Н. Бенардосом. С Н. Г. Славяновым мы встречались часто в Мотовилихе на Пермских заводах, а также во время его приездов в Петербург по делам этих заводов, начальником которых он был в течение нескольких лет и на которых он и разработал свои главнейшие изобретения. С М. О. Доливо-Добровольским нас сблизил совместная работа над организацией Электротехнического факультета Ленинградского политехнического института и встречи на Парижской всемирной выставке 1900 г. С А. С. Поповым я работал долго в Университете. Еще будучи студентом, ездил с ним, уже молодым ученым, в экспедицию по наблюдению солнечного затмения в Красноярск и был, наконец, близким свидетелем всех его работ, приведших к изобретению радиотелеграфии» (стр. 4—5).

Книга М. А. Шателена представляет собой существенный вклад в историю отечественной науки и техники. Страница за страницей проходят перед читателем яркие картины многих лет творчества главных представителей русской электротехники. Приведем некоторые из сообщений автора об их деятельности, оставившей глубокий след в истории развития электротехники и положившей начало отдельным ее отраслям¹.

С полным основанием автор отмечает, что основоположником электротехники является русский физик, профессор Медико-хирургической академии в Петербурге,

¹ Все избранные с этой целью места из текста книги отмечаются ниже ссылками в скобках на страницы.

впоследствии член Академии наук, Василий Владимирович Петров (1761—1834 гг.). Петрову мы обязаны открытием в 1802 г. того замечательного явления, которое затем получило название электрической дуги и которое вновь наблюдал в 1813 г. Деви. *Это было первое электрическое явление, которое впоследствии получило приложение на практике и которое, следовательно, положило начало новому отделу технических знаний — электротехнике* (стр. 16). Русский академик В. В. Петров не только опережал в своих научных исследованиях самых передовых европейских ученых-современников, не только был блестящим преподавателем, но отличался и как выдающийся экспериментатор. Опыту он придавал решающее значение. «Гораздо надежней, — писал он, — искать настоящего источника электрических явлений не в умственных мудрствованиях, к которым доселе только прибегали все физики, но в непосредственных следствиях самых опытов» (стр. 37). Петров выполнил ряд экспериментальных работ по восстановлению под действием электрической дуги металлических окислов. Эти опыты Петрова можно считать исследованиями, положившими начало современной электрометаллургии в дуговых печах, в которых подвергается действию электрической дуги шихта из окислов металлов с углеродом в разных видах. Наконец, исключительное место занимало изучение Петровым явлений люминесценции. Исследования этого явления Петров производил в течение 40 лет, начав их еще в 90-х годах XVIII в. (стр. 52).

Превосходной иллюстрацией пионерской деятельности русских ученых и изобретателей в различных областях применения электричества служит и такой факт. Когда знаменитый русский электротехник Павел Николаевич Яблочков в 1877—1878 гг. демонстрировал в Париже свои электрические свечи, то буквально весь Париж был заинтересован изобретением Яблочкова, говорили: «La lumière vient du Nord» (свет приходит к нам с севера). Электрический свет называли «La lumière russe» (русский свет). На стр. 100 воспроизведен интересный рисунок, на который следовало бы почаще посматривать всем тем, кто еще не освободился до конца от недуга низкопоклонства перед западом. На снимке показано сильное освещение набережной р. Темзы в Лондоне свечами Яблочкова в 1879 г. Толпа лондонцев с любопытством разглядывает дикинку — электрическое уличное освещение фонарями русского изобретателя.

Влияние, оказанное деятельностью Яблочкова на пространство электрического освещения, было очень велико. В Кронштадте, на судах и в портах Балтийского и Черного морей велась работа с электроосветительными установками. В английской прессе того времени встречаются указания, что успех русских в борьбе с турецким флотом (во главе которого стоял английский адмирал Гобарт-паша) во многом определился умелым применением на русском флоте электроосветительных установок и других электрических приспособлений (стр. 121). Заслуживает упоминания и другой факт из деятельности Яблочкова, свидетельствующий о разнообразии экспериментирования русского электротехника. С целью практического применения электрического освещения Яблочков сделал администрации Курской железной дороги предложение применить в качестве головного фонаря на паровозе для освещения пути электрическую лампу. Предложение его получило осуществление. Яблочкову было разрешено установить электрический фонарь на паровозе, отправленном из Москвы в Крым. Установлен был рефлектор с дуговой лампой. Но эта лампа была ненадежна — она требовала непрерывного наблюдения и регулировки. Яблочкову пришлось весь путь просидеть около фонаря на паровозе. Даже на остановках поезда Яблочков должен был оставаться около своего фонаря, так как при перемене паровоза надо было переносить фонарь и устраивать соединение лампы с вагоном, в котором помещалась питающая лампу батарея бузеновских элементов. С осветительной точки зрения полученные результаты были очень хороши. *Это был первый в мире, действительно реализованный, опыт применения электрического фонаря на паровозе к освещению пути на большом протяжении при сменных паровозах* (стр. 73).

Имеющееся в привилегии Яблочкова 6 апреля 1878 г. на изобретенную им электрическую свечу описание ин-

дукционной катушки и способы ее применения показывают, что *Яблочковым был изобретен и применен на практике тот прибор, который впоследствии получил название трансформатора переменного тока* (стр. 107). Этот приоритет за пределами России многократно оспаривался, но все же некоторые относительно беспристрастные историки техники за рубежом должны были его признать. О приоритете Яблочкова упоминает германский электрик Уппенборн в своей «Истории трансформаторов». Приоритет Яблочкова был в конце концов признан и в Англии. В весьма распространенном в 80-х годах французском «Курсе электротехники» Кадиа, написанном, когда история изобретения трансформаторов была еще у всех в памяти, говорится: «Принцип трансформаторов был указан впервые Яблочковым в 1876 г.». Такое же признание можно найти у многих авторов (стр. 108).

Яблочкову принадлежит и честь первой попытки применения, опять-таки для цели, которую он называл «дроблением света» и которую было бы правильнее назвать «дроблением электрической энергии», приборов другого типа — конденсаторов. Для своих статических конденсаторов Яблочков придумал и особую конструкцию, вполне аналогичную с конструкцией, применяющейся поныне (стр. 111, 115).

Тогда как изобретение П. Н. Яблочковым электрической свечи являлось практическим применением для целей освещения электрической дуги — физического явления, открытого В. В. Петровым, другой русский электротехник, А. Н. Лодыгин, изобрел первую электрическую лампу накаливания, применив тепловое действие электрического тока — физический закон, установленный в первой половине XIX в. русским академиком Э. Х. Ленцем. Александр Николаевич Лодыгин в 1873 г. публично демонстрировал изобретенную им лампу, весьма похожую по шаровой своей форме на современные многоваттные лампы. 11 июля 1874 г. за № 1619 Лодыгин получил привилегию. И так, 75 лет тому назад наш талантливый соотечественник Лодыгин, а не Эдисон, изобрел первую в мире электрическую лампу накаливания. В 1874 г. А. Н. Лодыгину Академией наук была присуждена за его изобретение Ломоносовская премия. Таким образом, идея заключения накаляемого угольного стерженька в «герметически закупоренном, пустом, прозрачном сосуде» — прообразе современной вакуумной колбы электрической лампы, равно и способ изготовления каменных тел для ламп накаливания посредством прокалывания в тиглях при малом доступе воздуха стержней органического происхождения, который несколько лет спустя был предложен как нововоз Эдисоном, принадлежали в действительности России и А. Н. Лодыгину (стр. 160, 166).

Об изобретении Лодыгина Эдисон мог узнать не только из печати. Сохранилось известие, что, близкий к кружку лиц, работавших с Лодыгиным над усовершенствованием лампы накаливания, лейтенант флота Хотинский, сам работавший над лампами накаливания и предложивший впоследствии конструкцию лампы для более высокого напряжения, чем обычные (на 200 в), уезжая в Америку, взял с собой несколько образцов изготовленных в России ламп и показывал их Эдисону. Это не могло остаться без влияния на работы Эдисона в области построения ламп накаливания (стр. 176).

Наряду с американским рекламированием Эдисона как «творца» ламп накаливания английская пресса утверждала, что «настоящим творцом» является английский изобретатель Сван. Однако, касаясь всех этих сообщений, известный всему миру электротехнический журнал того времени «La Lumière Electrique» в 1881 г. сообщал, что электрические лампы накаливания были изобретены гораздо раньше русским изобретателем Лодыгиным. Позже, касаясь сообщения американской газеты «Observer» о продаже еще одним «изобретателем» Максимоном его патента на лампы накаливания с металлической и угольными нитями американской фирме, тот же журнал «La Lumière Electrique» пишет: «А Лодыгин? А его лампы? Почему же не сказать уже, что и солнечный свет изобретен в Америке» (стр. 175).

В 1882 г. первый редактор журнала «Электричество» В. Н. Чиколев писал по этому же поводу: «не прав г. Эдисон и др., умалчивающие о заимствовании существа, вернее идеи, их способа у г. Лодыгина... без идеи Лоды-

пина и поднятого им шума не было бы до сих пор практических ламп с накаливанием» (стр. 170). Необходимо подчеркнуть, что именно Лодыгин получил патенты и из лампы накаливания с молибденовой и вольфрамовой нитью. Молибденовая и вольфрамовая лампы Лодыгина фигурировали на Парижской выставке 1900 г.

Одним из даровитейших и образованнейших инженеров-электриков и изобретателей конца прошлого столетия был Михаил Осипович Доливо-Добровольский, последние девятнадцать лет жизни и деятельности которого относятся уже к XX в. Доливо-Добровольским были созданы многие оригинальные типы электроизмерительных приборов (электромагнитные амперметры и вольтметры; ваттметры, фазометры и частотомеры, построенные по принципу двигателя с вращающимся магнитным полем). Он ввел впервые способ деления напряжения генератора постоянного тока посредством индукционной катушки (всемирно известный «делитель напряжений»). Он много работал над теорией и расчетом электрических машин. Ему принадлежат глубокие исследования над распределением магнитных потоков в машинах с зубчатыми сердечниками якорей. Доливо-Добровольский выполнил большую исследовательскую работу над генераторами переменного тока с двумя неподвижными обмотками и вращающейся железной массой. Часто идею и первое осуществление такого генератора приписывают английскому электрику Мордею. Доливо-Добровольский установил, что гораздо раньше идея эта была осуществлена русским изобретателем Клименко, который получил на нее в 1885 г. русскую привилегию за № 3085. Заявка на привилегию была им сделана еще в 1882 г. Еще раньше, чем Клименко, этот тип генератора был предложен П. Н. Яблочковым, который получил на него привилегию № 119702 от 31 июля 1877 г. (стр. 220—222).

Доливо-Добровольский дал сильный толчок развитию электрической передачи энергии на большое расстояние. Как известно, задолго до французского инженера Дебре, русский военный инженер Ф. А. Пироцкий в 1874 г. на Волковом поле, вблизи Петербурга, впервые в мире демонстрировал электрическую передачу мощности на расстояние. Теоретические обоснования и расчеты электропередачи были даны в ряде работ, напечатанных в 1880 г. (т. е. за 2 года до опытов Дебре) русским электротехником Д. А. Лачиновым (стр. 224). Но только в результате введения Доливо-Добровольским трехфазных токов и после изобретения им трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором и с ротором, имеющим пусковой резистор, а также изобретения им в 1890 г. трансформаторов трехфазного тока задача электропередачи мощности на большие расстояния получила исключительно перспективное решение. Доливо-Добровольскому принадлежала руководящая роль в организации первой в мире электрической передачи энергии на расстояние 175 км при помощи трехфазного тока, демонстрировавшейся на Электрической выставке 1891 г. во Франкфурте-на-Майне. На Первом всероссийском электротехническом съезде в декабре 1899 г., участником которого был также М. А. Шателен, Доливо-Добровольский сделал обширный доклад о своих работах по трехфазному току (стр. 227). Подробные материалы были опубликованы об этом в журнале «Электричество» в 1890 г.

Электрическая дуга Петрова послужила не только для создания мощных электрических источников света, но и для целого ряда других применений электричества. Так, уже сам В. В. Петров применял ее для восстановления металлов из окислов и тем положил начало применению дуги для металлургических целей в разнообразных дуговых электропечах. Но новое, совершенно особое, применение получила электрическая дуга в руках русского изобретателя Николая Николаевича Бенардоса, который первый предложил применять дугу для электрической сварки металлов (стр. 241). Реализация этого предложения привела к настоящему перевороту в технологических процессах машиностроения, судостроения и других отраслей промышленности. Среди многочисленных изобретений Н. Н. Бенардоса есть одно, которое прошло почти незамеченным. Это — электролитический способ покрытия больших поверхностей, в частности, корпуса железных судов, слоем меди

(стр. 248). В числе усовершенствований Бенардоса был также метод электрической спайки, в котором дуга получалась уже не между свариваемым изделием и угольным электродом, а между двумя наклонно помещенными угольными электродами, между которыми помещался стержень из металла, подлежащего расплавлению. Посредством этого расплавленного металла и производилась спайка. К этому методу впоследствии обратился германский инж. Цейнер, и этот прием остался в технике, как изобретение Цейнера, и получил отсюда свое название, хотя действительным изобретателем был Н. Н. Бенардос (стр. 256).

Усовершенствование электросварки в сравнении со способом Бенардоса ввел Н. Г. Славянов. Основное различие между способами применения электрической дуги, предложенными Бенардосом и Славяновым, заключалось в том, что угольный электрод Бенардоса заменен у Славянова металлическим, в результате плавления которого получается нужный для работы жидкий металл. Применением плавящегося металлического электрода были устранены и возможности слишком большого повышения температуры обрабатываемого предмета и опасность обуглероживания металла. Вместе с тем создана была возможность применения расплавленного дугой металлического электрода в качестве материала для отливок (стр. 261).

Из очерка, посвященного первому редактору журнала «Электричество» В. Н. Чиколеву, приведем первые же строки: «Старшим по возрасту в той плеяде русских изобретателей-электриков, которая в течение 70-х и 80-х годов прошлого века прославляла русскую электротехнику, был Владимир Николаевич Чиколев. Он был не только крупным изобретателем и электротехником, но и одновременно активнейшим пропагандистом расширения применения электричества» (стр. 181).

В 1879 г. Чиколев построил получившую широкую известность дифференциальную дуговую лампу. Чиколев создал оригинальный метод поверки рефлекторов электрического света фотографированием; метод сразу был признан крупнейшими прожекторными фирмами всех стран. Эта работа Чиколева, как и некоторые другие его предложения в области военной электротехники и светотехники, имели пионерское значение, а отдельные положения, выдвинутые Чиколевым, сохранили свое научное и практическое значение до настоящего времени.

Обширный и в высшей степени интересный материал приведен автором о гениальном изобретателе радио, профессоре физики А. С. Попове. Показан упорный и целеустремленный труд этого великого русского физика и инженера на пути к бессмертному открытию, создавшему его автору мировое имя (стр. 282).

Положительные качества книги М. А. Шателена значительны и несомненны, особенно, всюду, где автор в удивительно доступной форме рассматривает специальные научно-технические вопросы и приводит богатейший фактический материал о деятельности русских ученых и изобретателей. Каждый очерк читается с неослабным интересом и вызывает законное чувство гордости по поводу многогранной созидательной роли русских пионеров электротехники.

Историческая обстановка, в которой жили и творили деятели русской науки и техники того времени, показана в посвященных им очерках книги бледнее. Сколько о социально-экономических и политических факторах той эпохи сказано в конце книги, в Послесловии (стр. 367, 368). Отдельные очерки выпирали бы, если бы их содержание в большей степени отражало исторический фон событий. В этом отношении намерения автора, выраженные им на стр. 33: «В отдельных очерках, посвященных деятельности этих ученых и изобретателей, будет сделана попытка показать, в каких условиях они работали и каких результатов они достигли», оказались реализованными неодинаково. Намерение показать, «каких результатов они достигли», осуществлено в книге исчерпывающе и мастерски. Намерение же показать, «в каких условиях они работали», удалось значительно меньше, хотя ряд страниц, верно отображающих картину среды и условия деятельности русских электротехников XIX в., свидетельствует о том, что автор подошел к своей задаче с позиций диалектического и исторического материализма.

Издание книги с полиграфической стороны выполнено удовлетворительно. Отдельные вкравшиеся мелкие опечатки остались неоговоренными (например, на стр. 75, 14 стр. сверху, на стр. 308, 4 стр. сверху), но они нисколько не затемяют текста; досадно оставшееся, повидимому, незамеченным выпадение на стр. 168 целой строки (45)—цитата, содержащая отзыв В. Н. Чиколыва по поводу работ А. Н. Лодыгина, так и осталась незаконченной в самом интересном месте. Изложение иллюстрировано 59 рисун-

ками и 8 портретами-вклейками. Книга снабжена тисненым изящным переплетом.

Труд М. А. Шателена имеет выдающееся значение. Богатый фактический материал книги безусловно будет широко использован. Об его огромной познавательной ценности не может быть различных мнений. Книга М. А. Шателена—ценный подарок нашей молодежи, нашим инженерам и всем интересующимся богатым прошлым русской науки и техники.

Д. Р.



П. С. ЖДАНОВ. УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов. 399 стр., ц. 15 руб. Государственное энергетическое издательство, 1948.

В книге подробно рассмотрены вопросы, с которыми приходится сталкиваться инженеру-практику в области устойчивости сложных электрических систем. Вместе с тем книга написана как учебник, последовательно знакомящий читателя со всей проблемой в целом, начиная от сравнительно простых случаев работы отдельных генераторов на сеть бесконечной мощности, до сложных явлений в системах, состоящих из многих генераторов и нагрузок.

Сначала исследуется статическая устойчивость и даются методы ее расчета, заключающиеся в основном в построении зависимостей мощности от угла. При этом учитывается влияние регуляторов напряжения, а также эффект падения напряжения из зажимов нагрузки в зависимости от тока в ней. Таким образом, помимо понятия идеального предела вводятся еще понятия внутреннего и действительного пределов мощности. Четко и ясно показаны значение автоматического регулирования напряжения генераторов или их компаундирование и возможность работы в области искусственной устойчивости.

Затем излагаются динамическая устойчивость и связанные с ее расчетом правило площадей и метод последовательных интервалов. При этом рассматриваются различные виды аварий и дается сравнительная оценка их с точки зрения воздействия на устойчивость. Здесь же отмечается значение таких мер повышения устойчивости, как быстродействующее отключение коротких замыканий, повторное включение и пофазное отключение, и значение регуляторов напряжения и быстродействующих возбuditелей.

Отдельные главы посвящены влиянию регуляторов первичных двигателей, влиянию активных и реактивных сопротивлений, включаемых в нейтрали трансформаторов, нагрузочным сопротивлениям, а также различным способам компенсации параметров линий.

Книга написана хорошим языком и полностью вводит читателя в круг идей, соответствующих современному состоянию вопроса, давая при этом не только простое описание явлений, но и полную методику их расчета. Достоинства книги в этом отношении несомненны.

Можно сделать несколько замечаний, носящих скорее методический, чем принципиальный характер. Я полагаю, что правило площадей надо изложить в самом начале курса. Тогда при описании явлений динамической устойчивости легче было бы объяснить, почему генератор, достигнув первый раз положения равновесия, не останавливается в нем, но «по инерции» проходит далее. Без правила же площадей существование такой «инерции» еще не доказано. Правда, на стр. 17 в скрытой форме уже как бы содержится доказательство правила площадей, но оно не названо своим именем.

Кроме того, при выводе этого правила легко устанавливается абсолютная его точность, в результате чего процесс затухания колебаний не может быть объяснен одной только ссылкой на потери без соответствующего изменения зависимости $P=f(\delta)$. В действительности, наличие потерь находит свое выражение в изменении хода кривой $P=f(\delta)$ при увеличивающихся или уменьшающихся δ , и соответственно этому процесс затухания обязательно должен происходить по спиралевидной кривой, навивающейся на точку равновесия. Это обстоятельство недостаточно четко отражено автором.

Второе замечание касается учета насыщения синхронных машин. На стр. 69 приведено сравнение двух расчетов: с учетом насыщения и без учета насыщения генератора, причем в первом случае предельная мощность оказалась значительно большей, чем во втором. Между тем в действительности, если производить сравнение при одинаковых возбуждениях машины, точный учет насыщения (в области углов $\delta=90^\circ$ и более) дает значения мощности, почти не отличающиеся от тех, которые получаются по «ненасыщенному» значению реактивности. Это происходит потому, что при больших δ машина обычно сильно размagnичивается действием реакции якоря и «рабочая точка» на характеристике холостого хода ложится на прямолнейной ее части. Таким образом, показанная на рис. 3,21 разница между двумя кривыми может быть вызвана не учетом насыщения, а лишь применением неправильного способа учета насыщения, что, конечно, не одно и то же.

В гл. 14 в связи с исследованием асинхронного хода синхронных машин и последующей их самосинхронизации автор сделал примечание о том, что проводившиеся в последнее время опыты показали, что «характеристики турбогенераторов в асинхронном режиме гораздо более благоприятны, чем это предполагалось». Мне кажется, однако, что значение этих опытов гораздо шире. Они, в частности, показали, что втягивание в синхронизм при пониженном возбуждении происходит более успешно, чем при полном. Между тем, в книге П. С. Жданова проводится мысль о том, что синхронизация наступает тогда, когда переменная составляющая относительной скорости асинхронного режима делается достаточно большой для того, чтобы абсолютная скорость машины сделалась равной синхронной. Очевидно, это—может произойти тем скорее, чем больше возбуждение машины. В свете новых экспериментальных данных оказывается, что эта точка зрения должна быть пересмотрена или по крайней мере в нее должны быть внесены какие-то коррективы.

Последняя глава книги посвящена чисто принципиальному вопросу: установлению истинного критерия статической устойчивости. Автор решает вопрос, применяя классический метод «малых колебаний». Несомненно, именно этим путем и можно решить задачу. Однако, пора бы уже отказаться от термина «малые колебания», заменив его термином «малые отклонения», так как справедливость метода не нарушается от того, будет ли нестационарный процесс колебательным или апериодическим. Термин «малые отклонения» более соответствует существу явления и лучше подчеркивает сущность самого метода, заключающуюся в том, что процесс линеаризуется в пределах рассматриваемых отклонений, что естественно, поскольку самые отклонения считаются малыми.

Большим упущением автора является то, что он не привел списка литературы. Если и не исчерпывающую библиографию по рассматриваемому вопросу, то хотя бы основные, принципиальные работы советских авторов безусловно следовало дать.

Сделанные замечания, однако, не меняют общей оценки книги как практически весьма полезной и вместе с тем стоящей на высоком теоретическом уровне. Ее с интересом будут изучать не только студенты, но и инженеры сталкивающиеся с вопросом устойчивости электрических систем.

Доктор техн. наук, проф. Д. А. ГОРОДСКИЙ



М. П. КУТЫЛОВСКИЙ и А. И. ФЕДОТОВ. ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ТРАМВАЯ. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для техникумов городского электротранспорта. 424 стр., ц. 19 руб. Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1948.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов электромеханических техникумов системы Министерства коммунального хозяйства и состоит из двух разделов, описывающих соответственно механическую и электрическую часть подвижного состава. Настоящая рецензия относится в основном лишь к описанию электрической части.

Следует отметить, что название книги не соответствует ее содержанию; она трактует только о городских пассажирских вагонах и притом преимущественно московских; о подвижном же составе специального назначения — снегоочистителях, трамвайных электровозах, грузовиках, вагонах с вышкой, ремонтных вагонах и т. п. — в книге ничего не говорится, хотя специальный подвижной состав имеет большое значение в эксплуатации трамвая.

На первой же странице введения в книгу бросается в глаза фотоснимок «трамвайного поезда» Сименса на Берлинской выставке 1879 г., — по мнению автора, первого трамвая в мире. Трудно назвать трамваем маленькую тележку, управляемую водителем, сидящим верхом на ней; еще существеннее то, что приоритет в применении электродвигателя для движения вагона принадлежит не Сименсу, как голословно утверждают авторы, а русскому инженеру Ф. А. Пироцкому, который еще в 1876 г., за три года до появления сименсовской тележки, производил опыты передачи электроэнергии по рельсам, а затем в Петербурге применил электротягу настоящих, а не игрушечных трамвайных вагонов. На стр. 8 (табл. 3) авторы проводят сравнение наших вагонов с американскими, причем рассматривают почему-то наши вагоны устаревших конструкций. Авторы также утверждают, что быстроходные тяговые двигатели строятся только за рубежом, в то время как такие двигатели применяются на трамвайных вагонах типа МТВ-82 и КТМ-1, выпущенных нашей промышленностью в 1947 г.; производство же быстроходных двигателей заводом «Динамо» им. Кирова началось еще значительно раньше. В книге встречаются не вполне умелые ссылки на оборудование американского вагона РСС, который в настоящее время отнюдь не может считаться образцовым. Подобная необъективность авторов, тенденциозное выпячивание иностранной техники, игнорирование отечественной техники совершенно недопустимо, а учебник теряет при этом свое воспитательное значение.

В книге имеется ряд неточностей и недостаточно подробно изложенных положений. Например, на стр. 209 авторы утверждают, что «применение тяговых двигателей на номинальное напряжение 550 в является наиболее выгодным как в конструктивном, так и в тяговом отношении». Однако, современная практика опровергает это — последние типы трамвайных электродвигателей для четырехосных вагонов строятся на 275 в, в частности, завод «Динамо» еще в 1937 г. построил двигатель для вагонов на 275 в и теперь выпускает двигатель ДК-255а также на 275 в. Кроме того, утверждение о том, что в «моторных вагонах трамвая СССР применяются исключительно двигатели подвесно-осевого типа» не точно, так как уже в 1946 г. проектировались, а в 1947 г. построены как двухосные, так и четырехосные вагоны с двигателями, подвешенными независимо от осей, с карданной передачей. Нельзя утверждать, что «на моторном вагоне количество тяговых двигателей всегда бывает равным количеству осей моторного вагона»; на рижском трамвае хорошо работают четырехосные вагоны с двумя двигателями.

На стр. 214 даны допускаемые нагревы только для обмоток двигателя; о нагревах же остальных частей двигателя ничего не говорится и не приведены ни установленные нормы, ни ссылки на ГОСТ 2582-44 «Электродвигатели тяговые». Не рассмотрено влияние степени насыщения тягового двигателя на его электромеханическую характеристику.

Неверно утверждение о том, что неравномерно распределенный момент вращения между двумя ведущими колесами полуската выравнивается вследствие проскальзывания наиболее загруженного колеса; это бывает только тогда, когда реализуется большая сила тяги и при низких коэффициентах сцепления.

Содержание раздела об испытаниях тяговых двигателей (стр. 265—271) не согласовано с соответствующим ГОСТ, изложено бессистемно и иллюстрировано нечеткими схемами. Авторы применяют в схемах нестандартные обозначения.

Авторы ограничивают по условиям нагрева величину пускового тока вентилируемого двигателя значением 140% от часового тока. Между тем, как показывают расчеты и практика, полное использование двигателей хорошо энергооборуженного вагона может быть только при пусковых токах 150%. Вообще для одной и той же средней скорости движения с точки зрения экономии энергии увеличение ускорения за счет очень незначительного увеличения перегрева двигателя весьма желательно, а потому пусковой ток обычно, за исключением редких случаев, должен быть 150% часового. На стр. 355 отмечается, что двигатель типа ДМ-1А—50 квт—наиболее мощный трамвайный двигатель, тогда как двигатели типа ДТИ-60 и ДК-255а имеют мощность соответственно 60 и 55 квт.

Описание с чертежами автоматического выключателя ДДК-500, контроллеров с деревянными барабанами, плавкого предохранителя МА-13, громоотводов и других устаревших аппаратов бесполезно. Описание расположения вагонных аппаратов (стр. 207) также совершенно устарело. Взамен этого устарелого материала следовало бы ознакомить студентов с автоматическим пуском тяговых двигателей (большая работа в этой области проделана МЭИ и заводом «Динамо») с быстроходными двигателями ДК-254а и ДК-255а, с новыми взглядами на защиту трамвайной аппаратуры от перенапряжений и о целесообразности применения плавких предохранителей в силовой цепи и др.

Электрическая часть книги написана в общем хорошо, материал изложен систематически, не плохо иллюстрирован.

Механическая часть подвижного состава описана значительно хуже. Описательная часть книги касается только устаревших типов вагона московского трамвая. Новые московские трамвайные вагоны и типичные вагоны ленинградского, киевского и других трамваев, а также вагоны специального назначения совершенно не упоминаются.

При условии устранения приведенных выше неточностей и элементов низкоконтраста и внесения дополнений о достижениях в области электрооборудования трамвайных вагонов за последние два года книга может стать хорошим учебником по электрической части подвижного состава трамвая.

Кандидат техн. наук В. А. ИЗЪЮРОВ

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова



И. П. БЕРДИНСКИХ, СУШКА И СКЛЕЙКА ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

120 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Гостехиздат Украины, 1948.

Со времени выхода первой книги по высокочастотной сушке древесины (Н. С. Селюгин и др. «Сушка и нагрев древесины в поле высокой частоты», Гостехиздат, 1938 г.) прошло десять лет. За это время высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников в СССР вышел далеко за пределы лабораторных исследований. В промышленность внедрен ряд производственных высокочастотных установок, систематически выпускающих продукцию. Способы сушки и склейки древесины претерпели множество изменений; применены новые системы электродов, выбраны иные диапазоны частот, созданы новые схемы генераторов, разработана технология сушки, при которой расход энергии много ниже, чем десять лет назад. Поэтому можно было бы приветствовать инициативу Гостехиздата Украины, выпустившего книгу кандидата техн. наук И. П. Бердинских по высокочастотной сушке и склейке. Однако, никак нельзя одобрить содержание этой книги.

Судя по предисловию автора, книга рассчитана на лесотехников, эксплуатирующих высокочастотные сушильные установки. Она содержит три основных главы.

Глава о генераторах содержит описание электронных ламп, их конструкций и характеристик, схем газотронных выпрямителей; даются также общие указания по обслуживанию генераторов.

При описании генераторных ламп и их характеристик автор путает данные, относящиеся к генераторным и приемно-усилительным лампам.

Автор указывает, что с ростом напряжения на сетке генераторной лампы ток сетки остается без изменения; что в практической работе генераторной лампы сеточные токи устраняются; что угол отсечки и форма импульса анодного тока зависят только от величины сеточного смещения (амплитуда сигнала во внимание не принимается) и т. п.

Указания на необходимость периодического подзаряда аккумуляторов, применяемых для отрицательного смещения, нелепы, так как в процессе работы аккумулятора не только не разряжаются, а наоборот, заряжаются сеточным током. Описанные источники сеточного смещения, так же как и приведенная схема волномера, устарели более чем на 30 лет.

Множество ошибок и несуразностей в тексте и схемах никак не могут содействовать правильному ознакомлению читателя с ламповыми генераторами.

Глава о сушке содержит общие указания по технологии и технико-экономическим показателям сушки древесины, разработанные НИЛЭС режимы сушки и описание способа контроля режима сушки.

В основном технико-экономическом вопросе—определении расхода электроэнергии на сушку—автор приводит противоречивые данные. На стр. 67 он говорит, что при загрузке 100-кгт генератора 2 м³ древесины продолжительность сушки составляет 10 час. В то же время в табл. 8 говорится, что за 25 суток этот же генератор может высушить 300 м³. Если сопоставить две эти цифры, то получается расхождение 300%.

Ошибка в 3 раза, отразившаяся на всех рекомендациях автора в части загрузки генераторов древесиной и удельной мощности, выделяемой в древесине, повидимому, явилась результатом умножения вместо деления на ж. п. д. (60%) при анализе данных НИЛЭС, приведенных в табл. 8.

Применение рекомендованных автором удельных нагрузок на практике приведет к чрезвычайно форсированному режиму сушки и браку производства.

Глава о склейке содержит указания по технологии склейки фанеры, обшивок из г. пона, дельта-древесины и ламинированной древесины. В специальной главе изложены интересные идеи конвейеризации процесса сушки и склейки. При рассмотрении склейки дается описание поперечного и продольного нагрева клеевых швов, причем из текста невозможно установить, какому из способов и когда следует отдавать предпочтение. Говоря о поперечном расположении шва, автор сначала пишет: «В

этом случае между электродами нет ни одного пути, который отличался бы по проводимости от любого другого», а далее на той же странице об этом же способе склейки говорится: «Внутри пакета образуются пятна ожогов из-за различных дефектов в древесине пачки, имеющих различные электрические свойства». Чему верить?

Рассматривая склейку в прессах, автор ни словом не упоминает возможность возникновения стоячих волн в древесине и способы их компенсации. Мало того, на рис. 47 приведена схема прессы, на котором изображены регулируемые индуктивности для компенсации стоячих волн, однако автор по непонятной причине называет их... терморпарами, несмотря на то, что они включены на полное напряжение высокой частоты (позиция б в подрисовочной подпункте).

Понятием фактора потерь или угла диэлектрических потерь автор не пользуется вовсе, говоря, что, «как известно из электротехники, температура нагрева устанавливается соответственно емкости участка» (!).

При ведении процесса склейки автор рекомендует тщательно записывать все электрические показатели работы генератора, включая плотность тока в древесине (обозначенную, также, как и мощность, буквой Р), среднее значение выпрямленных напряжений и тока (называемые средним значением постоянной слагающей) и cos φ, определяемый как отношение мощности к току (!), и сводить их в таблицу, имеющую 17 граф. Эту таблицу он рекомендует изучать в дальнейшем, однако никаких указаний к ее изучению не дает.

Ни удельных нагрузок, ни производительности генераторов при склейке автор не приводит, ограничиваясь указанием, что расход энергии при высокочастотном нагреве выше, чем при склейке контактным электропрогревом.

При чтении каждой страницы книги возникают замечания, объяснение которым можно видеть только в некачественном написании книги и крайне небрежном ее редактировании. Так, например, говоря о древесине, автор сначала (стр. 8 и 52) говорит, что древесина — сплошной неоднородный диэлектрик, который при смазке его клеем становится полупроводником; далее (стр. 106) он пишет, что при влажности выше 30% древесина приближается к однородному (?) диэлектрику.

Говоря о конвейере для высокочастотного нагрева, автор в качестве материала для конвейерной ленты рекомендует применять материал «не изменяющий своих диэлектрических свойств под действием воды и водяных паров, обладающий огнеупорностью или по меньшей мере трудновоспламеняемостью». В качестве примера такого материала приводится хлопчатобумажная лента (!).

Книга пестрит такими оборотами речи, как: напряжение в амперах (стр. 71), джоулевые потери (стр. 8), экранирующая лампа (стр. 19), колебания высокой частоты электромагнитной волны и т. п.

Книга И. П. Бердинских представляет собой составленный с множеством ошибок обзор 12 работ, из которых только 5 посвящены высокочастотной сушке древесины. В СССР опубликовано более 60 статей по этому вопросу (см. библиографию в брошюре В. И. Калитвянского и В. М. Дегтева «Высокочастотный нагрев неметаллических материалов» и в журнале «Электричество», № 4, стр. 17, 1948), и внедрение высокочастотной сушки и склейки на много превосходило масштабы, указанные в книге (И. П. Бердинских ограничивается сушкой сапжных колодок).

Книгу И. П. Бердинских, как содержащую ряд ошибочных утверждений и устаревших данных, нельзя рекомендовать даже для поверхностного ознакомления с высокочастотной сушкой и склейкой древесины.

Доктор техн. наук **Б. М. ТАРЕВ**
Кандидат техн. наук, доц. **А. В. НЕТУШИЛ**
Инж. **М. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**
Инж. **Е. П. ПАРИНИ**

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ. Сборник технических и информационных материалов по проектированию, производству и исследованию электротермических установок. Министерство электропромышленности СССР, Производственное предприятие электротермического оборудования „Севзаппромэлектропечь“. Ленинград. Редакционная коллегия: С. М. Марголин, Д. Б. Мондрус (ответственный редактор), А. В. Донской, Н. М. Шефтель.

Рецензируемый периодический сборник издается «Севзаппромэлектропечью» с 1945 г. Ежегодно выходит 6 номеров объемом от 2,5 до 5 печатных листов. Тираж сборника за истекшие три года возрос с 80 до 200 экз.

Тематика сборника охватывает электротехнические, тепловые и конструктивные вопросы работы и расчета дуговых сталеплавильных печей, электрических печей сопротивления, индукционного и высокочастотного нагрева. Большим пробелом является отсутствие статей по индукционным плавильным печам для черных металлов, а также по дуговым ферросплавным печам. Мало освещаются вопросы автоматического управления и автоматического регулирования электротермических агрегатов.

Около половины всех статей носят теоретический характер; научный уровень отдельных статей резко различен. Наряду с интересными и оригинальными работами (инж. Д. А. Симоненко «О причинах смещения вольтовых дуг в трехфазных сталеплавильных печах», № 3, 1945; инж. Д. Б. Мондрус «Расчет индукционного нагрева внутренних поверхностей полых цилиндров», № 6, 1945; инж. Г. С. Вайнберг «Вопросы теплового расчета электропечей», № 2, 1947 и др.) печатаются элементарные статьи инж. Г. М. Бородулина («Расчет кольца крышки шахтной электропечи», № 1, 1946; «Расчет обрешетки днищ каркасов прямоугольных печей», № 4, 1946), представляющие собой решения тривиальных задач сопротивления материалов. Представляет интерес серия статей инж. С. П. Косарева, посвященная процессу теплопередачи излучением в электрических печах сопротивления (№ 5, 6, 1946; № 1, 2, 1947).

В статье Ю. Е. Ефроймовича «Автоматические регуляторы для дуговых сталеплавильных печей с электромеханическими усилителями» (№ 2, 1947) автор правильно доказывает, что введение в схему регулятора электродов дуговых печей дополнительного регулируемого параметра — первой производной тока печи по времени — может обеспечить равновысокое качество регулирования в течение всего цикла плавки.

К статьям теоретического характера следует отнести также работу А. В. Донского «К расчету индукционного нагрева ферромагнитных материалов» (№ 1, 1948) и статью Г. В. Дершварца «Некоторые вопросы конструкции и расчета индукционных плавильных печей с железным сердечником» (№ 2, 1948). В первой из упомянутых выше работ автор указывает на неправильную практику расчета мощности, передаваемой в металл при индукционном нагреве, базирующуюся на предположении постоянства магнитной проницаемости ферромагнитного материала. На основании экспериментальных данных показывается, что при напряженности магнитного поля $H > 200 \text{ эр}$ зависимость $\mu = \varphi(H)$ одинакова для всех сортов стали. Выводится и дается графически зависимость μ от удельной поверхностной мощности для различных частот. Приведенные в статье данные могут служить пособием для достаточно точных расчетов. Вторая из упомянутых статей посвящена, главным образом, уточнению метода расчета индуктивного сопротивления рассеивания на основании единого метода, разработанного Г. Н. Петровым (Электричество, № 5, 1935).

Теоретический раздел сборника следует признать наиболее интересным и удачным.

К разделу обзоров могут быть отнесены статьи Д. Б. Мондруса «Задачи восстановления производства дуговых печей», М. А. Шевцова «Краткая характеристика современных электропечей, изготовляемых в США»; М. Г. Цокуренько «Вопросы развития термических электропечей» и др. Этот раздел представляет интерес для широкого круга инженеров, работающих в области электротермии.

Ряд статей сборника посвящен описанию новых электротермических установок и вопросам их наладки. Одной из наиболее интересных статей этого раздела является работа Д. Б. Мондруса «Мощная высокочастотная установка для сушки древесины» (№ 3, 1946). Здесь дается

описание установки для сушки древесины полезной мощностью 200 кВт, выполненной по материалам НИЛЭС (эта организация не упомянута в статье) на Беломорско-Балтийском канале им. Сталина. В статье приводятся проектные и эксплуатационные данные высокочастотной сушилки — одной из самых мощных в СССР и, повидимому, не имеющей себе подобных за границей.

В статье С. М. Марголина и Д. Б. Мондруса «Работы «Севзаппромэлектропечь» в области новейших эффективных электротермических процессов, осуществленные в 1947 г.» (№ 1, 1948) дается описание серии шахтных муфельных электропечей для газовой цементации мощностью от 25 до 130 кВт. Как видно из статьи М. Л. Горелика (№ 2, 1948), дающей результаты испытаний одной из серийных печей мощностью 75 кВт, печи этой серии обладают вполне удовлетворительными техническими показателями. В статье С. М. Марголина и Д. Б. Мондруса дается также краткое описание разработанных и освоенных в 1947 г. электрических конвейерных печей для лакирования электротехнической стали (мощность 170 кВт, производительность 500 кг/час), электропечей для эмалировки проволоки, электротиглей для модификации расплавленного алюминия и электропечи для светлого обжига мелких изделий.

К сожалению, качество некоторых обзорных статей стоит на весьма низком уровне. Особенно обращает на себя внимание технически малограмотная статья Н. Н. Волковой «Дуговая электрическая сталеплавильная печь фирмы Whiting» (№ 6, 1945).

Сравнительно малое освещение получили в сборнике исследовательские и экспериментальные работы. Таковы: статья Б. М. Струнского «Работа электродов Содерберга» (№ 3, 1945), А. А. Троц, В. Н. Крылова и М. С. Максименко «К вопросу об электропроводности угольной крупки» (№ 2, 1946), Соколова «Опыт установления рациональных режимов работы современной дуговой сталеплавильной печи» (№ 2, 1947).

В статье А. В. Донского и Н. С. Бутова «Из практики электронагрева в высокочастотном электрическом поле» (№ 1, 1947) дается описание установки для измерения электрических параметров материалов. Статья носит поверхностный и недоработанный характер. Приведенные данные (табл. 2) вызывают сомнения. Так, например, $\lg \delta$ порядка 0,001 для материалов с влажностью 70% едва ли возможен в среднем диапазоне частот. Впрочем, и вся таблица не может быть использована, так как в ней не указан основной параметр измерения — частота. Применяемая для определения сопротивления загрузки формула $r = \frac{P_2}{I^2 \kappa}$ справедлива для

эквивалентного последовательного сопротивления нагрузки с параллельно подключенным конденсатором. Последнее обстоятельство не учтено авторами статьи, вследствие чего могут получиться значительно завышенные результаты. Рассуждения авторов о зависимости $\lg \delta$ материала от принятой эквивалентной схемы являются досадным недоразумением.

В разработанном авторами А. В. Донским и Фрумкинским приборе для измерения емкостей при диэлектрическом нагреве (№ 2, 1948) измерение осуществляется путем сравнения (методом нулевых биений) частот двух ламповых генераторов. В контуре одного из генераторов имеется эталонный конденсатор переменной емкости, в контуре второго генератора — измеряемая емкость. Точность измерений в пределах 3–5%. Из описания не ясны преимущества предлагаемого прибора по сравнению с другими известными методами измерения емкости.

Следует отметить хорошо поставленный информационный отдел, в котором регулярно даются обзоры наиболее интересных проектов, выпущенных «Севзаппромэлектропечью», рефераты и обширная библиография отечественной и иностранной литературы по вопросам электротермии.

Большим недостатком сборника является отсутствие на его страницах обмена опытом эксплуатации электро-термических установок. Работники эксплуатирующих электростанций заводов и технологи-электрометаллурги совершенно не привлечены к участию в сборнике, что значительно обедняет его содержание.

Издатель сборника «Севзаппромэлектропечь» является проектно-монтажным производственным предприятием. Тем более непонятно, почему в сборнике совершенно не отражены вопросы скоростного монтажа, внедрение новых монтажных методов, организация монтажных работ и производства.

Круг авторов, сотрудничающих в сборнике, чрезвычайно ограничен. Из номера в номер встречаются одни и те же фамилии, что, естественно, сужает кругозор сборника. Так, например, в шести номерах сборника за 1947 г. помещено пять статей А. В. Донского. Столь же часто печатается Д. Б. Мондрус.

Полиграфическое оформление сборника стоит на невысоком уровне. Большинство номеров сборника издано стеклографическим способом; отдельные номера — типо-

графским. До сего времени сборник выходит с большим запаздыванием. Так, например, в 1948 г. № 4 (июль-август) вышел в свет лишь в ноябре.

Несмотря на отмеченные серьезные недостатки, сборник «Электротермия» является безусловно полезным и нужным изданием.

Ограниченный тираж сборника, конечно, не может удовлетворить не только всех заинтересованных лиц, но даже и многие организации. В связи с непрерывно растущим значением высокочастотного нагрева для многих отраслей народного хозяйства, электроплавильных печей для производства специальных сталей, сплавов и пр. электротермическая техника быстро развивается. Нам кажется целесообразным и своевременным поставить вопрос о создании специального периодического журнала, посвященного вопросам электротермии, с тиражом по крайней мере 3 000—4 000 экз.

Инж. В. И. ФЕЙГИН

Центральная лаборатория автоматизации
Минметаллургпрома СССР



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

Идания 1948 г.

АРХАНГЕЛЬСКИЙ Н. К. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ. 228 стр., ц. 10 руб. Госэлектртехиздат.

АРЦЫБЫШЕВ М. Н. ЗЕМЛЯНЫЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. (Всесоюзный заочный энергетический институт). 128 стр., ц. 5 руб. 60 коп. Госэнергоиздат.

БОДЕ Г. ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ. Перевод и редакция А. А. Колосова и Л. А. Месроbian. 641 стр., ц. 38 руб. 90 коп. Гос. изд-во иностранной литературы.

* БРЕЙНЕРД Д., КЕЛЕР Г., РАЙХ Г., ВУДРУФ Л. ТЕХНИКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ. Перевод под редакцией Л. Д. Гольдштейна и С. А. Дробова. 276 стр., ц. 27 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ВОЛОТОВСКИЙ С. А. ШАХТНАЯ ЭЛЕКТРОВОЗНАЯ ОТКАТКА. Под ред. Б. М. Гуревича. (Министерство угольной промышленности западных районов). Утверждено в качестве учебника для горных техникумов. 316 стр., ц. 13 руб. 50 коп. Углетехиздат Минзапугля.

ГЕРАСИМОВ В. В., МИЛОВИДОВ И. Н., ЯГОДИН Г. В. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Под ред. Г. В. Ягодина. Изд. 2-е, переработанное. Пособие для военных училищ и офицерского состава войск связи. 464 стр., ц. 12 руб. Военное изд-во (1947 г.).

ГОРДЕЕВ Г. Н. ВОЗДУШНАЯ РАДИОНАВИГАЦИЯ В ЗАДАЧАХ. (Пособие для летного состава). Под ред. Н. Г. Ленского. 144 стр. + вклейки, ц. 5 руб. 25 коп. Военное изд-во.

ГУРЕВИЧ Б. М. ЭКСПЛУАТАЦИЯ РТУНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ. (Министерство угольной промышленности восточных районов. Всесоюзный научно-исследовательский институт). 144 стр., ц. 8 руб. 50 коп. Углетехиздат.

КОВАЛЕНКО В. И., ХРАМОЙ А. В. АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ СССР. 68 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Госпланиздат, 1948.

* КРИЗЕ С. Н. УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ. 315 стр., ц. 10 руб. Связьиздат.

ЛИХТЕРМАН Б. В. УЛЬТРАЗВУКОВОЧАСТОТНАЯ ТЕРАПИЯ ВОЕННО-ТРАВМАТИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ НЕРВОВ. 100 стр., ц. 3 руб. 25 коп. Медгиз.

МАЛИНИН В. М. ЗВУКОУСЛАВЛИВАТЕЛИ. (Справочник). 108 стр., ц. 7 руб. Судпромгиз.

МАЛИНИН Г. А. СВЕТ ИЗ РОССИИ. Жизнь и деятельность великого русского электротехника П. Н. Яблочкова. 39 стр., ц. 70 коп. Саратовское областное изд-во.

* ПАРМЕНОВ К. Я. ОПЫТЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПО ХИМИИ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ. (Академия педагогических наук РСФСР. Институт методов обучения). Изд. 2-е, дополненное. 107 стр., ц. 2 руб. Учпедгиз.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается опубликовать рецензии.

РЕМЕЗ Г. А. РАДИОИЗМЕРЕНИЯ. Допущено в качестве учебника для электротехникумов связи. 335 стр., ц. 10 руб. 50 коп. Связьиздат.

СБОРНИК ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ И ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ, ОТПУСКАЕМУЮ РАЙОННЫМИ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЯМИ, ЭНЕРГОКОМБИНАТАМИ И ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. (МЭС СССР). Утверждено Советом Министров СССР. 96 стр., ц. 5 руб. Госэнергоиздат.

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ ХАРЬКОВСКОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА. Вып. VIII. Под ред. Р. Л. Аронова, В. Ф. Бржечка, Б. Ф. Ватура, А. Л. Матвеева, А. П. Сукачев, С. М. Фертика и Г. М. Штурмана (ответственный редактор). 328 стр., ц. 15 руб. Госэнергоиздат.

Настоящим выпуском «Сборник» возобновляет свой выход в свет после Великой Отечественной войны. Сборник содержит библиографическую статью, посвященную памяти покойного профессора ХЭТИ — академика В. М. Хрущева и 18 научно-технических работ профессоров и преподавателей ХЭТИ, посвященных теоретическим и прикладным вопросам электротехники, в частности, магнитопроводным двигателям, графикам нагрузки электростанций, механическим выпрямителям, дистанционным реле и др.

СИНХРОНИЗАЦИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ. (Министерство угольной промышленности западных районов. Энерго-механическое управление). 36 стр., ц. 2 руб. Углетехиздат Минзапугля.

* СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫМ РАБОТАМ. (Министерство строительства предприятий тяжелой индустрии. Глав-электромонтаж). Под общей редакцией М. Д. Сухопольского. Изд. 2-е, дополненное и переработанное. 564 стр., ц. 23 руб. 80 коп. Госстройиздат.

ЦИМАРОВ Н. А. ШАХТНЫЙ УЧАСТКОВЫЙ ЭЛЕКТРОСЛЕ-САРЬ. (Министерство угольной промышленности западных районов. Серия учебников по техническому минимуму для рабочих угольной промышленности). 301 стр., ц. 11 руб. Углетехиздат Минзапугля.

ЭСИБЯН М. А., ТЕР-КРИКОРИН С. Б. РЕМОНТ НЕФТЕПРО-МЫСЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. 223 стр., ц. 17 руб. Азнефтеиздат.

Идания 1949 г.

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. В. М. МОЛОТОВА. ДОКЛАДЫ К НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ. 74 стр., бесплатно. Изд. МЭИ.

Сборник содержит четыре доклада: С. В. Лажневика «Идейно-политическая и воспитательная работа в институте», М. П. Вукаловича «Подготовка молодых педагогических кадров», Г. Н. Петрова «Научно-методическая работа кафедр» и М. Г. Чиликина «Органи-зующая роль деканатов в методической работе».

ШАТЕЛЕН М. А. РУССКИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА. 379 стр., ц. 15 руб. Госэнергоиздат. (Рецен-зию на эту книгу см. на стр. 89)

