

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

50



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

5

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5
1950
МАЙ

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

СОДЕРЖАНИЕ

Г. Н. Петров и С. С. Окунь — Об отрицательном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора	3
П. Л. Калантаров и Л. А. Цейтлин — К вопросу о расчете индуктивности рассеяния трансформаторов	6
Б. К. Буль — Аналитический метод определения магнитных сопротивлений и потерь в стали	10
В. Т. Ренне — Расчет электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги	16
А. Б. Шистер — Электрические свойства некоторых материалов в полях высокой частоты	19
М. И. Алябьев — Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока	23
Е. М. Лопухина — Исследование асинхронного двигателя с ротором в виде полого цилиндра	26
Л. И. Двоскин — Новая схема соединений для мощных электрических станций	32
С. Я. Дунаевский — О переходном режиме при самовозбуждении шунтового генератора	34
С. З. Барский — Анализ схем электропривода с падающей характеристикой	35
И. И. Ратгауз и С. А. Дохман — Глубокое регулирование напряжения постоянного тока дросселями насыщения	44
В. Н. Мильштейн — Общий метод оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем	47
Г. Е. Пухов — Об уравнениях четырехполюсника, включенного в сложную электрическую цепь	55
В. Е. Боголюбов — Экспериментальное определение кривой измерения среднего тока	57
Л. А. Бессонов — Аналитическое определение постоянного потока в дросселе насыщения	61
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Д. Р. — Первая электротехническая выставка (1880 г.)	66
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
ДИСКУССИИ	75
К статье А. А. Глазунова „Пути технического развития и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза“	75
К проекту стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей	78
ХРОНИКА	
Научно-техническая сессия по ремонту электрооборудования	84
Инженер-изобретатель Л. Г. Рашковский	86
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
БИБЛИОГРАФИЯ	
Г. В. Зевеке и П. А. Ионкин — Книга Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова „Теоретические основы электротехники“, ч. I	86
С. В. Страхов и А. В. Нетушил — Книга П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана „Теоретические основы электротехники“, ч. II	88
В. Ю. Ломоносов — Книга Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова „Теоретические основы электротехники“, ч. III	90
П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман — Ответ на замечания по книге	91
А. А. Воробьев — Книга И. С. Стекольников „Электронный осциллограф“	92
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	93
Номограмма для определения $\cos \varphi$ при равномерной нагрузке фаз трехфазной системы по показаниям двух ваттметров	95

ВНИМАНИЮ ГОДОВЫХ ПОДПИСЧИКОВ НА ЖУРНАЛ

В апреле с. г. годовым подписчикам на журнал „Электричество“ было разослано бесплатное приложение: карманная книжка „Календарь-справочник „Электричество“.

Годовые подписчики, не получившие указанной книжки, должны обратиться в отделения Союзпечати и в почтовые отделения по месту подписки на журнал.

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. Костенко**, 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 телеграмм: Москва Электричество
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый
ящик № 648

**Да здравствует 1 Мая — день солидарности
трудящихся мира, день братства рабочих всех
стран!**

(Из призывов ЦК ВКП(б) к 1 мая 1950 г.)

Об отрицательном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора

Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ и кандидат техн. наук С. С. ОКУНЬ

Московский энергетический институт им. Молотова

В теории трансформаторов явление двойного магнитного рассеяния достаточно хорошо известно [Л. 1], однако вопрос о том, как это явление может быть использовано для придания трансформатору требуемых характеристик, остается до сих пор не выясненным.

Для силовых трансформаторов явление двойного магнитного рассеяния имеет, главным образом, теоретический интерес, так как для характеристик трансформатора существенным является общее индуктивное падение напряжения в первичной и вторичных обмотках, независимо от распределения его по обмоткам.

Для трансформаторов тока, характеристики которых определяются параметрами, главным образом, вторичной обмотки, явление двойного магнитного рассеяния, приводящее в некоторых случаях к отрицательному вторичному индуктивному сопротивлению, может иметь, как будет показано ниже, весьма существенное значение. Понятие об отрицательном активном сопротивлении вторичной обмотки, поскольку известно нам настоящей работы, до сих пор не рассматривалось в теории трансформаторов. В дальнейшем будет показано, при каких условиях может возникнуть отрицательное активное сопротивление вторичной обмотки и как оно влияет на характеристики трансформаторов тока.

Рассмотрим трансформатор тока (рис. 1), у которого первичная обмотка 1 размещена на магнитном стержне, а вторичная 2 и 3 на двух полюсах магнитного шунта той или иной конструкции [Л. 2].

Распределение индукционных линий поля в таком трансформаторе схематически показано на рис. 1 пунктирными линиями.

Пусть, что намагничивающая сила обмотки равна $I_1 W_1$, а последовательно с ней соеди-

В трансформаторах тока, характеристики которых определяются, главным образом, параметрами вторичной обмотки, возможно использовать действие двойного магнитного рассеяния для изменения активного и индуктивного сопротивлений этой обмотки. При некоторых условиях можно достичь отрицательных значений этих сопротивлений. Это явление может быть использовано для компенсации погрешностей трансформатора тока. В работе дано аналитическое и экспериментальное исследование этого вопроса.

ненной обмотки $3 I_2 W_3$. Если намагничивающий ток принять равным нулю, то

$$-I_1 W_1 = I_2 (W_2 + W_3). \quad (1)$$

При таком допущении полный ток в окне В, (рис. 1), создающий поле рассеяния

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = -I_2 W_3, \quad (2)$$

т. е. равен полному току в окне Н, взятому с обратным знаком.

На рис. 2 представлена векторная диаграмма э. д. с., наведенных во вторичной обмотке.

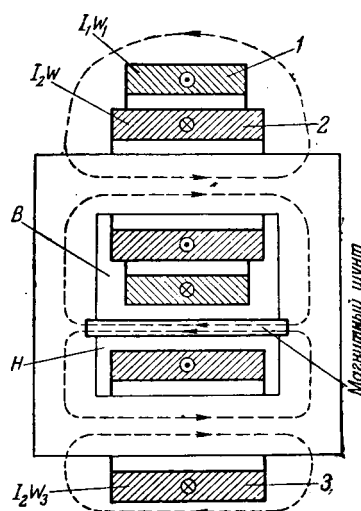


Рис. 1.

Явление двойного магнитного рассеяния в данном случае проявляется в том, что поле рассеяния верхнего стержня, создаваемое премагничивающей намагничивающей силой первичной обмотки, наводит во вторичной обмотке э. д. с.

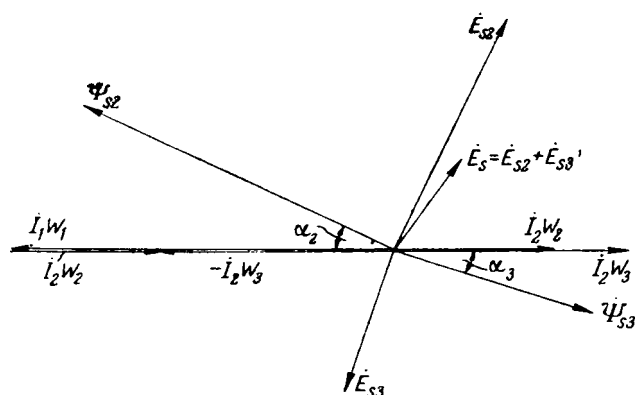


Рис. 2.

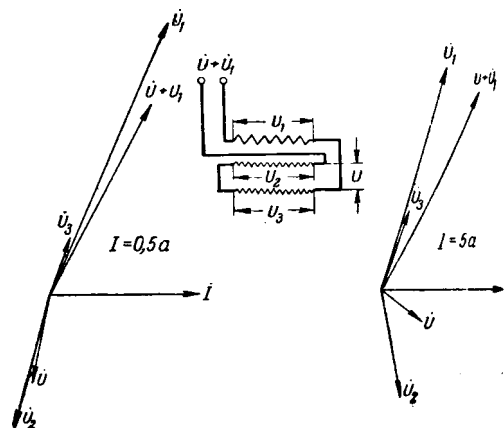


Рис. 3.

$\dot{E}_{s2}$, опережающую ток $\dot{I}_2$. При этом суммарная э. д. с. рассеяния $\dot{E}_s = \dot{E}_{s2} + \dot{E}_{s3}$ также опережает ток $\dot{I}_2$, если $E_{s2} > E_{s3}$.

Как видно из рис. 1, значительная часть поля рассеяния сосредоточена в сердечнике, поэтому оно будет создавать в стали потери, которые обусловят сдвиги по фазе α_2 и α_3 между токами и соответствующими потокоцеплениями.

Пользуясь комплексным методом, в соответствии с рис. 2 можно написать:

$$-\dot{I}_2 Z_3 = -\dot{I}_2 (r_{c3} + jx_3) = \dot{E}_{s3}, \quad (3)$$

$$-(-\dot{I}_2) Z_2 = \dot{I}_2 (r_{c2} + jx_2) = \dot{E}_{s2}; \quad (4)$$

здесь r_{c2} и r_{c3} — эквивалентные активные сопротивления, обусловленные потерями от поля рассеяния. Суммарная э. д. с. рассеяния вторичной обмотки

$$\dot{E}_s = \dot{E}_{s3} + \dot{E}_{s2} = -\dot{I}_2 [(r_{c3} - r_{c2}) + j(x_3 - x_2)]. \quad (5)$$

Полное падение напряжения во вторичной обмотке получается от сложения э. д. с. рассеяния $-\dot{E}_s$ с активным падением напряжения в обмотке

$$\dot{I}_2 (r_2 + r_3) - \dot{E}_s = \dot{I}_2 [(r_2 + r_3 + r_{c3} - r_{c2}) + j(x_3 - x_2)] = \dot{I}_2 (r + jx), \quad (6)$$

где r_2 и r_3 — активные сопротивления обмоток 2 и 3, r и x — суммарные активные и индуктивные сопротивления вторичной обмотки. Из этого равенства можно сделать следующие выводы:

1. Наличие двойного магнитного рассеяния может создать условия, при которых

$$x = x_3 - x_2 \geq 0,$$

т. е. привести к положительному, нулевому или отрицательному индуктивному сопротивлению вторичной обмотки. Знак индуктивного сопротивления определяется геометрическими размерами обмоток, сердечника, магнитного шунта, а также отношением W_2/W_3 .

2. Наличие потерь в стали, обусловленных полем двойного рассеяния, может привести к условию, когда

$$r = r_2 + r_3 + r_{c3} - r_{c2} \geq 0.$$

При $r_{c3} > r_{c2}$ потери в стали будут создавать увеличение активного сопротивления r обмотки. При $r_{c3} = r_{c2}$ они не будут оказывать какого-либо влияния и, наконец, при $r_{c2} > r_{c3}$ они уменьшат активное сопротивление r обмоток, причем $r_{c2} > r_2 + r_3 + r_{c3}$ активное сопротивление r примет отрицательное значение. Это на первый взгляд парадоксальное явление, как будет показано ниже, подтверждается опытом. Таким образом, явление двойного магнитного рассеяния в связи с потерями в стали может создавать условия, при которых как активное, так и индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора будут иметь отрицательные значения. В трансформаторах тока это явление может быть использовано для уменьшения потерь в стали.

Экспериментальная проверка вышеуказанных теоретических положений была произведена на образцах трансформаторов тока с компенсацией по методу МЭИ, принципиальное выполнение которой показано на рис. 1. Магнитный шунт был выбран таким, чтобы поле двойного магнитного рассеяния было достаточно велико и создавало значительные потери в стали.

Определение индуктивных и активных сопротивлений производилось из опыта противосоединения. Поэтому образцы трансформаторов были взяты с коэффициентом трансформации 5/5 а и с числом витков первичной обмотки равным числу витков вторичной обмотки:

$$W_1 = W_2 + W_3.$$

Первичная и вторичная обмотки были соединены навстречу друг другу (рис. 3). Ток в первичной обмотке изменялся от 10 до 100% номинального значения (от 0,5 до 5 а). Компенсационным методом измерялись напряжения на всей вторичной обмотке $\dot{U}$ и на ее двух последовательно соединенных частях $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_3$. Для контроля измерялись также приложенное напряжение $\dot{U} + \dot{U}_1$ и напряжение на первичной обмотке $\dot{U}_1$.

При указанных условиях постановки опыта в трансформаторе создавалось только магнитное поле рассеяния и измеренные на вторичной

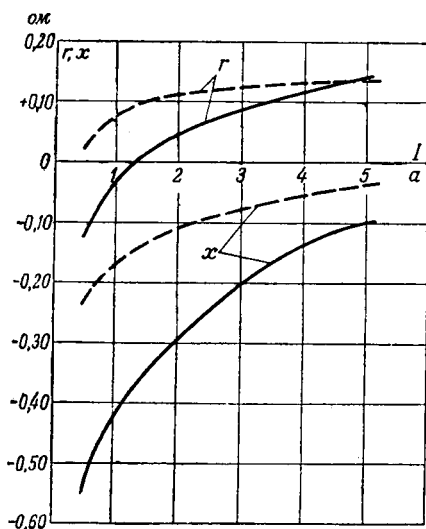


Рис. 4.

шке и на ее частях напряжения обуславливаются только активными и индуктивными сопротивлениями обмоток.

По данным измерений построены на рис. 3 в масштабе векторные диаграммы при 5 и 0,5 а.

Изменение активных и индуктивных сопротивлений вторичной обмотки в зависимости от тока показано на рис. 4 сплошными линиями. На рис. 4 для сравнения пунктирными кривыми показаны изменения сопротивлений r и x того же трансформатора при магнитном шунте, имеющем сечение в 2,5 раза меньше.

Таким образом, экспериментальные исследования полностью подтверждают приведенные выше теоретические положения о возможном влиянии двойного магнитного рассеяния в связи потерями в стали на активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки.

Данные опыта показывают, что при изменении тока и параметров магнитного шунта имеют место значительные изменения как индуктивного, так и активного сопротивлений вторичной обмотки. При отрицательном значении индуктивного сопротивления вторичной обмотки, имевшем место при опытах, вектор тока $\dot{I}$ опережает вектор напряжения $\dot{U}$. В случае, когда активное сопротивление вторичной обмотки имеет также отрицательное значение, вектор $\dot{I}$ опережает вектор $\dot{U}$ на угол, превосходящий 90° . Напряжение на всей вторичной обмотке может быть при этом меньше, чем напряжение на ее частях. Действие двойного магнитного рассеяния на изменение активного и индуктивного сопротивлений вторичной обмотки проявляется более сильно при малых значениях тока, когда магнитный шунт не насыщен. Это создает благоприят-

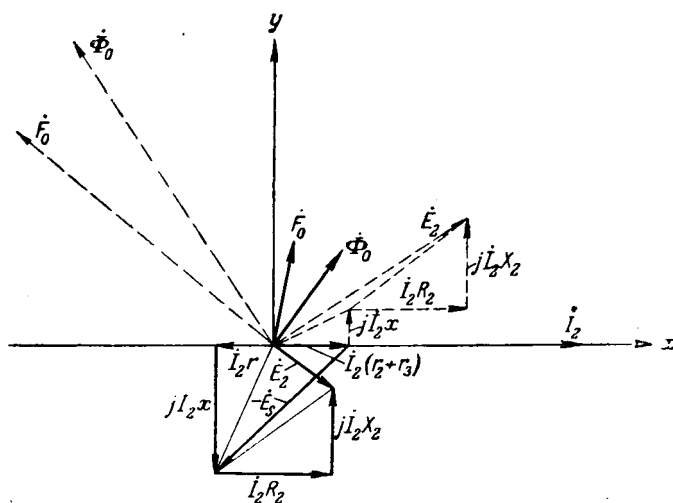


Рис. 5.

ные условия для компенсации погрешностей трансформаторов тока.

Важно отметить, что процесс изменения сопротивлений вторичной обмотки является управляемым за счет изменения параметров магнитного шунта.

Из теории трансформаторов тока известно влияние на погрешности активного и индуктивного сопротивлений вторичной обмотки. Электродвижущая сила вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 [(r + R_2) + j(x + X_2)], \quad (7)$$

где $R_2 + jX_2$ — сопротивление вторичной нагрузки.

Из рис. 5 видно, в какой мере изменения сопротивлений r и x за счет двойного магнитного рассеяния могут влиять на погрешности трансформатора тока. Пунктиром показана векторная диаграмма некомпенсированного трансформатора тока ($r > 0$ и $x > 0$). Сплошными линиями — векторная диаграмма компенсированного трансформатора при $r < 0$ и $x < 0$. Из сопоставления векторных диаграмм видно, что при правильном использовании явления двойного магнитного рассеяния проекции вектора намагничивающей силы $\dot{F}_0$ на оси x и y , определяющие погрешности, могут быть значительно уменьшены и тем самым созданы возможности для построения более совершенных трансформаторов тока.

Литература

1. Г. Н. Петров. Трансформаторы. Энергоиздат, 1934.
2. Г. Н. Петров и С. С. Окунь. Компенсация погрешностей трансформаторов тока подмагничиванием сердечника полем рассеяния. Электричество, № 8, 1946.

[27. 2. 1956.]



Работники советской науки! Обогащайте науку и технику нашей Родины новыми исследованиями, открытиями и изобретениями! Брените связь науки с производством!

(Из призывов ЦК ВКП(б) к 1 мая 1950 г.)

К вопросу о расчете индуктивности рассеяния трансформаторов

**Доктор техн. наук, проф. П. Л. КАЛАНТАРОВ
и кандидат техн. наук, доц. Л. А. ЦЕЙТЛИН**

Как показал Г. Н. Петров [Л. 1], расчет индуктивностей рассеяния трансформаторов при некоторых допущениях может быть сведен к чисто геометрической задаче, а именно, к определению средних геометрических расстояний площадей поперечных сечений обмоток от самих себя и друг от друга.

Обычно обмотки имеют прямоугольное поперечное сечение. Поэтому средние геометрические расстояния g_k площадей поперечного сечения обмоток от самих себя легко определяются по известной формуле

$$g_k = 2c(a+b), \quad (1)$$

где $2a$ и $2b$ — длины сторон рассматриваемого прямоугольника;

c — величина, зависящая от их отношения и изменяющаяся в весьма узких пределах — от $c=0,22313$ до $c=0,22369$. Значения c для различных отношений a/b могут быть взяты из таблиц, однако в большинстве случаев можно принять для c значение, равное 0,2235.

Значительно сложнее решается вторая часть задачи — определение средних геометрических расстояний g_{ki} площадей поперечных сечений обмоток друг от друга. Точная формула для среднего геометрического расстояния площадей двух прямоугольников настолько сложна, что для инженерных расчетов она совершенно непригодна. Для решения рассматриваемой задачи предлагались другие методы расчета [Л. 2, 3, 4, 5], наиболее общим из которых является метод Хемметера [Л. 2], в несколько видоизмененной форме изложенный в статье Г. Н. Петрова [Л. 5].

Сущность этого метода заключается в возможности при любом расположении на плоскости двух прямоугольников с параллельными сторо-

В развитие разработанного проф. Г. Н. Петровым общего метода, позволяющего свести расчет индуктивностей рассеяния трансформаторов к определению средних геометрических расстояний, предлагается новый способ вычисления среднего геометрического расстояния площадей двух прямоугольников. Этот способ, в особенности для прямоугольников, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, дает возможность произвести расчет, как правило, более просто и быстро, чем ранее применявшиеся методы.

нами выразить среднее геометрическое расстояние их площадей друг от друга через легко вычисляемые по формуле средние геометрические расстояния площадей нескольких (в общем случае 16) прямоугольников от самих себя. Этот

метод удобен для расчета, когда прямоугольники расположены близко друг к другу, и становится весьма неудобным и даже вообще неприемлемым, когда расстояние между прямоугольниками значительно превосходит их линейные размеры. В этом случае отдельные члены, через которые выражается искомое среднее геометрическое расстояние g_{ki} , во много раз больше результата их суммирования, так что расчет необходимо вести со степенью точности, значительно превышающей степень точности, требуемую от результата. На простых примерах можно было бы показать, что даже в случае, когда расстояние между прямоугольниками всего в несколько раз превышает их размеры, метод Хемметера по указанной причине практически непригоден для расчета и нуждается в замене каким-либо иным методом, лишенным отмеченного недостатка.

Такой метод в несколько более общей форме был разработан одним из авторов настоящей статьи. Здесь этот метод излагается применительно к интересующей нас задаче.

Рассмотрим интеграл вида

$$F_{12} = \iint_{s_1 s_2} f ds_1 ds_2,$$

распространенный по площадям s_1 и s_2 двух прямоугольников с параллельными сторонами (рис. 1). Пусть f — какая-нибудь функция расстояния r между точками P и Q одного и другого прямоугольника. Если, в частности $f = \ln r$, то $F_{12} = s_1 s_2 \ln g_{12}$, и формула (2) определяет среднее геометрическое расстояние g рассматриваемых прямоугольников друг от друга

В приложении 1 показано, что F_{12} можно представить в виде ряда

$$F_{12} = s_1 s_2 \left[1 + \frac{1+\alpha^2}{6} p^2 + \frac{1+\beta^2}{6} q^2 + \frac{(1+\alpha^2)(1+\beta^2)}{36} p^2 q^2 + \frac{3+10\alpha^2+3\alpha^4}{360} p^4 + \frac{3+10\beta^2+3\beta^4}{360} q^4 + \dots \right] f_{12}, \quad (3)$$

где $\alpha = A/a$, $\beta = B/b$ — отношения сторон прямоугольников, $p = a D_x$, $q = b D_y$, а $D_x = \frac{\partial}{\partial x}$ и $D_y = \frac{\partial}{\partial y}$ — символы дифференцирования по координатам x и y точки Q . Индекс 12 у функции f указывает, что после взятия производных следует вместо текущих координат точек P и Q подставить координаты точек O_1 и O_2 , являющихся центрами прямоугольников 1 и 2.

Для получения выражения среднего геометрического расстояния g_{12} следует в формуле (3) сложить $F_{12} = s_1 s_2 \ln g_{12}$ и вычислить несколько первых производных от

$$\ln r = \ln \sqrt{x^2 + y^2}$$

по x и y .

Исходя из того, что функция $f = \ln r$ удовлетворяет уравнению Лапласа $(D_x^2 + D_y^2)f = 0$, нетрудно показать, что

$$D_x^{2k} \cdot D_y^i = (-1)^i D_x^{2(k+i)}.$$

Поэтому в данном случае достаточно найти только производные от f по x . Дифференцируя несколько раз по x , найдем:

$$D_x^2 f_{12} = \frac{1}{R^2} (1 - 2u^2),$$

$$D_x^4 f_{12} = \frac{6}{R^4} (1 - 8u^2 + 8u^4),$$

$$D_x^6 f_{12} = \frac{120}{R^6} (1 - 18u^2 + 43u^4 - 32u^6),$$

где $u = \frac{x}{R} = \cos \theta$ (рис. 1). Подставив значения производных в формулу (2) и ограничившись нами с производными не выше четвертого порядка, получим:

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{(1+\alpha^2)a^2 - (1+\beta^2)b^2}{6R^2} (1 - 2u^2) - \frac{(3+10\alpha^2+3\alpha^4)a^4 + (3+10\beta^2+3\beta^4)b^4 - 10(1+\alpha^2)(1+\beta^2)a^2b^2}{60R^4} \times (1 - 8u^2 + 8u^4). \quad (4)$$

В частности, для подобных прямоугольников $\alpha = \beta$ и

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{(1+\alpha^2)(a^2 - b^2)}{6R^2} (1 - 2u^2) - \frac{(3+10\alpha^2+3\alpha^4)(a^4 + b^4) - 10(1+\alpha^2)^2 a^2 b^2}{60R^4} \times (1 - 8u^2 + 8u^4). \quad (5)$$

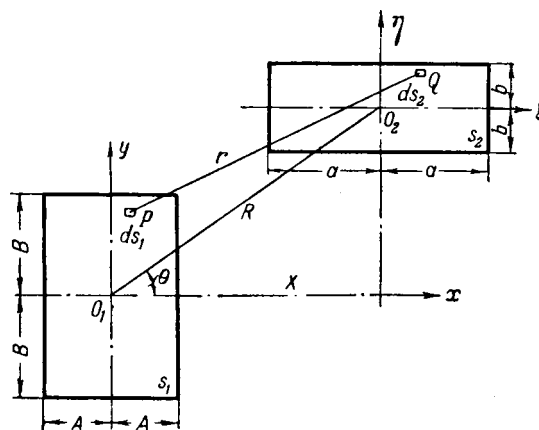


Рис. 1.

Для равных прямоугольников $\alpha = \beta = 1$ и

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{a^2 - b^2}{3R^2} (1 - 2u^2) - \frac{2}{15R^4} [2(a^4 + b^4) - 5a^2b^2] (1 - 8u^2 + 8u^4). \quad (6)$$

При $R = X$, $u = 1$, $B = b$, $\beta = 1$

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = -\frac{(1+\alpha^2)a^2 - 2b^2}{6R^2} - \frac{(3+10\alpha^2+3\alpha^4)a^4 + 16b^4 - 20(1+\alpha^2)a^2b^2}{60R^4}. \quad (7)$$

Если, кроме того, $A = a$ и $\alpha = 1$ (прямоугольники равны), то

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{b^2 - a^2}{3R^2} - \frac{4(a^4 + b^4) - 10a^2b^2}{15R^4}. \quad (8)$$

Нетрудно видеть, что формула (4), а также вытекающие из нее частные формулы (5), (6), (7) и (8) лишены недостатка, присущего методу Хемметера. Эти формулы не содержат разностей близких величин. Напротив, для прямоугольников, удаленных друг от друга на значительное расстояние, все члены в формуле (4) значительно меньше единицы, а потому могут быть вычисляемы со степенью точности, даже меньшей, чем требуемая от результата. Как правило, весь расчет по формуле (4) можно производить на логарифмической линейке. Следует, однако, иметь в виду, что формула (4) удобна для расчета лишь в тех случаях, когда расстояние между центрами прямоугольников не слишком мало по сравнению с их размерами, так как в противном случае ряд (4) сходится медленно и для обеспечения достаточной точности расчета потребовалось бы сохранение большого числа членов этого ряда.

При малых расстояниях между прямоугольниками становится возможным применение метода Хемметера. Впрочем, и в этом случае можно пользоваться формулой (4), если предварительно разбить каждый из прямоугольников на два или несколько прямоугольников с относительно небольшими размерами.

Для оценки степени точности формулы (4) достаточно рассмотреть прямоугольники, расположенные согласно рис. 2, так как при переме-

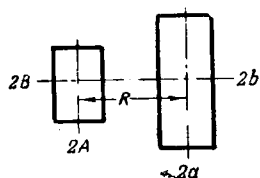


Рис. 2.

щении одного из них относительно другого в вертикальном направлении расстояние R возрастает и при неизменности размеров прямоугольников погрешность формулы (4) должна стать меньше.

Рассмотрим сначала два крайних случая, а именно, случай, когда $a = A = 0$, $B = b$ (рис. 3, а), и случай, когда $b = B = 0$, $a = A$ (рис. 3, б).

Полагая в формуле (7) $A = a = 0$ и $2b/R = \gamma$, получим:

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{\gamma^2}{12} \left(1 - \frac{\gamma^2}{5} \right), \quad (7a)$$

а полагая $b = 0$ и $2a/R = 2A/R = \gamma$, получим:

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = -\frac{\gamma^2}{12} \left(1 + \frac{\gamma^2}{5} \right), \quad (7b)$$

в то время как точные выражения будут соответственно

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{\gamma^2}{12} \left(1 - \frac{\gamma^2}{5} + \frac{\gamma^4}{14} - \frac{\gamma^6}{30} + \dots \right),$$

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = -\frac{\gamma^2}{12} \left(1 + \frac{\gamma^2}{5} + \frac{\gamma^4}{14} + \frac{\gamma^6}{30} + \dots \right).$$

Так как для расположения по рис. 3, а ряд получается знакопеременным, а для расположения по рис. 3, б — знакопостоянным, то при одинаковом значении γ погрешность будет больше во втором случае. При $\gamma = 1$ формулы (7а) и (7б) дают:

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = 0,0666, \quad g_{12} = 1,0689R,$$

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = -0,1000, \quad g_{12} = 0,9048R,$$

в то время как более точные значения равны соответственно $1,0753R$ и $0,8925R$. Следовательно, погрешность составляет около 0,6% в первом случае и около 1,4% во втором. Если размер a в первом случае и размер b во втором случае сделать отличными от нуля, то погрешность будет меньше. При $2a = 2b = R$ (рис. 3, в) она составляет только +0,2%.

Из сказанного следует, что с погрешностью, не превышающей полутора процентов, формулами (4)–(8) можно пользоваться во всех случаях, когда расстояние между центрами прямоугольников не меньше наибольшей из их сторон. Следует также иметь в виду, что погрешность весьма быстро убывает с увеличением расстояния R . Например, для рис. 3, б при $R = 3a$ и $\gamma = 2/3$ ошибка составляет только 0,07%.

Приложение 1. Покажем, каким путем получена формула (3). Рассмотрим показанные на рис. 1 прямоугольники с параллельными сторонами и выберем декартову систему координат (x, y) с началом в центре O_1 первого

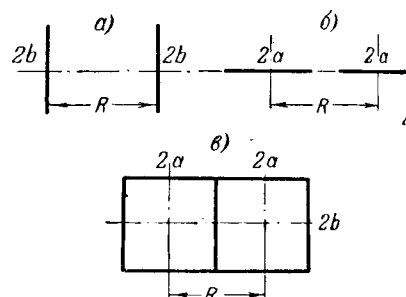


Рис. 3.

прямоугольника и с осями, параллельными его сторонам. Произведем интегрирование выражения [для F_{12} считая по площади s_2 , считая положение элемента площади фиксированным]. С этой целью применим интегральную формулу Тейлора и разложим функцию f в ряд по степеням координат ξ и η , показанных на рисунке.

Если ввести символический дифференциальный оператор

$$\delta = \xi D_x + \eta D_y,$$

где $D_x = \frac{\partial}{\partial x}$ и $D_y = \frac{\partial}{\partial y}$ — символы дифференцирования по x и y , то, учитывая, что разложение в ряд функции e^t имеет вид:

$$e^t = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^k}{k!},$$

можно разложение функции f в ряд Тейлора представить в следующей символической форме:

$$f = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\xi D_x + \eta D_y)^k}{k!} f_2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\delta^k}{k!} f_2 = e^{\delta} f_2,$$

причем значок 2 у f указывает, что значения производных по x и y должны быть взяты в точке O_2 , являющейся центром второго прямоугольника. При этом символ e^{δ} следует понимать как сумму, формально получаемую из разложения (9) при замене t на δ , иными словами, как кратченное обозначение соответствующего ряда.

Интегрируя выражение (10) по площади s_2 и принимая во внимание, что в этом выражении величины D_x , D_y , f_2 , не зависящие от переменных интегрирования, должны рассматриваться как постоянные, имеем:

$$\begin{aligned} J &= \int_{s_2} f ds_2 = \int_{-a}^a \int_{-b}^b e^{\delta} f_2 d\xi d\eta = \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\xi D_x + \eta D_y) f_2 d\xi d\eta \\ &= \frac{2}{D_x D_y} [\operatorname{ch}(a D_x + b D_y) - \operatorname{ch}(a D_x - b D_y)] f_2 \\ &= 4 \frac{\operatorname{sh}(a D_x) \operatorname{sh}(b D_y)}{D_x D_y} f_2. \end{aligned}$$

Рассматривая теперь весь интеграл J как функцию координат точки P , разлагая подобно предыдущему функцию в ряд Тейлора и интегрируя по площади, получим:

$$F_{12} = 4 \frac{\operatorname{sh}(A D_x)}{D_x} \frac{\operatorname{sh}(B D_y)}{D_y} J_1,$$

причем значок 1 у J показывает, что производные от J должны быть взяты в центре O_1 первого прямоугольника. Ставив значение J из (11) в (12), найдем:

$$F_{12} = 16 \frac{\operatorname{sh}(A D_{x1}) \operatorname{sh}(B D_{y1}) \operatorname{sh}(a D_{x2}) \operatorname{sh}(b D_{y2})}{D_{x1} D_{y1} D_{x2} D_{y2}} J_1$$

Идем D_x и D_y снабжены значками 1 и 2 для того, чтобы считать дифференцирование по координатам точек первого прямоугольника от дифференцирования по координатам точек второго прямоугольника. Значок 12 у f показывает, что производные должны быть взяты в центре O_1 первого и в центре O_2 второго прямоугольника. Ввиду симметрии функции f относительно координат точек P и Q можно утверждать, что $D_{x2} = -D_{x1}$ и $D_{y2} = -D_{y1}$. Поэтому, полагая

$$D_{x1} = -D_{x2} = D_x, aD_x = p, \frac{A}{a} = \alpha,$$

$$D_{y1} = -D_{y2} = D_y, bD_y = q, \frac{B}{b} = \beta,$$

можно иметь:

$$F_{12} = 16 a^2 b^2 \frac{\text{sh } p \text{ sh } \alpha p}{p^2} \frac{\text{sh } q \text{ sh } \beta q}{q^2} f_{12} = \frac{4a^2 b^2}{p^2 q^2} [\text{ch}(1+\alpha)p - \text{ch}(1-\alpha)p] [\text{ch}(1+\beta)q - \text{ch}(1-\beta)q] f_{12}. \quad (13)$$

Так как

$$\text{ch } \varphi = 1 + \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} + \dots,$$

$$\text{ch}(1+\alpha)p - \text{ch}(1-\alpha)p = 4p^3 \left[\frac{1}{2!} + \frac{2p^2}{4!}(1+\alpha)^2 + \frac{p^4}{6!}(3+10\alpha^2-3\alpha^4) + \dots \right]. \quad (14)$$

Подставляя выражение (14) и аналогичное выражение $\text{ch}(1+\beta)q - \text{ch}(1-\beta)q$ в формулу (13), приходим к выражению для F_{12} , данному в тексте.

Приложение 2. Приведем пример расчета по предлагаемому методу. Определим среднее геометрическое расстояние площадей прямоугольников, изображенных на рис. 4. В данном случае $a=0,8$; $b=5$; $\alpha=1,6$; $\beta=1,4$; $R=20$; $u=0,6$ и, следовательно,

$$1+\alpha^2=3,56; \quad 3+10\alpha^2+3\alpha^4=48,25, \quad \frac{a^2}{R^2}=1,6 \cdot 10^{-3},$$

$$\frac{a^4}{R^4}=2,56 \cdot 10^{-6},$$

$$1+\beta^2=2,96; \quad 3+10\beta^2+3\beta^4=34,1, \quad \frac{b^2}{R^2}=6,25 \cdot 10^{-2},$$

$$\frac{b^4}{R^4}=3,91 \cdot 10^{-3},$$

$$10(1+\alpha^2)(1+\beta^2)=105, \quad \frac{a^2 b^2}{R^2}=10^{-4},$$

$$(1-2u^2)=0,28, \quad 1-8u^2+8u^4=-0,84.$$

Подставив эти значения в формулу (4), найдем:

$$\ln \frac{g_{12}}{R} = \frac{0,28}{6} (5,7 \cdot 10^{-3} - 0,185) + \frac{0,84}{60} \times$$

$$(-0,23 \cdot 10^{-4} + 0,1335 - 0,0105) = -0,0090 + 0,0017 = -0,0074, \quad \text{т.е. } g_{12} = 0,993 R = 19,86.$$

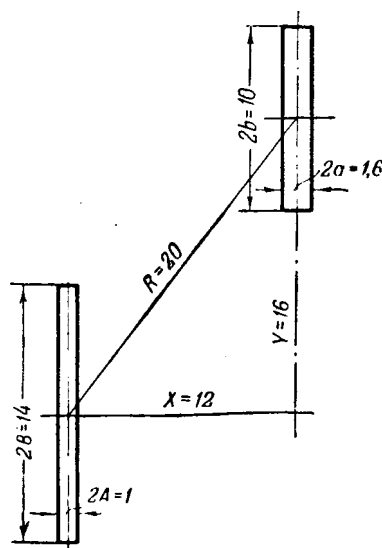


Рис. 4.

Заметим, что в данном случае член с четвертыми степенями расстояний пренебрежимо мал по сравнению с единицей, и его можно было бы не вычислять вовсе. Мы пригласили здесь полный расчет только для того, чтобы можно было составить правильное суждение об объеме вычислений в тех случаях, когда пренебрежение вторым членом в формуле (4) недопустимо.

Нетрудно убедиться, что определение величины g_{12} по методу Хемметера, даже с использованием номограммы, построенной Г. Н. Петровым [Л. 5], потребовало бы более длительных вычислений¹.

Литература

1. Г. Н. Петров. Расчет рассеяния обмоток трансформатора при произвольном расположении их на сердечнике. Бюллетень ВЭИ, № 5, 1934.
2. Н. Hemmeter. Die Induktivität von Spulen, Ringen und Stäben. Arch. f. El., 14, стр. 153, 1924.
3. Г. Н. Петров. К расчету рассеяния трансформаторов. Электричество, № 15, 1935.
4. Л. А. Цейтлин и П. Л. Калантаров. Расчет коэффициента самоиндукции системы прямолинейных параллельных шин прямоугольного сечения. Труды ЛИИ, № 7, 1936.
5. Г. Н. Петров. К теории расчета индуктивности рассеяния трансформаторов. Электричество, № 3, 1948.

[31. 10. 1949]

¹ В этом отношении пример, приведенный в статье Г. Н. Петрова, не является показательным, так как для расчета выбран очень простой случай одинаковых прямоугольников, к тому же определенным специальным образом расположенных друг относительно друга.



Аналитический метод определения магнитных сопротивлений и потерь в стали

Кандидат техн. наук, доц. Б. К. БУЛЬ

Московский энергетический институт им. Молотова

При проектировании электрических аппаратов, приборов и других электромагнитных устройств, работающих на переменном токе, очень удобно проводить расчет магнитной цепи комплексным методом [Л. 1—4]. Он просто, наглядно и в достаточной степени точно определяет необходимые магнитные и электрические величины. Особенно отчетливо преимущества комплексного метода сказываются при расчете сложных магнитных цепей [Л. 15].

Впервые понятие о комплексной магнитной проницаемости было введено в 1913 г. В. К. Аркадьевым и получило применение в ряде исследований и для расчета магнитных цепей [Л. 5—8].

При синусоидальном изменении поля катушки $H = \frac{F_\kappa}{l}$ — магнитная индукция в слабых полях будет изменяться также по синусоидальному закону. Рассматривая отношение B к H как отношение комплексов, В. К. Аркадьев получил комплексную магнитную проницаемость в виде:

$$\frac{B}{H} = \mu' - j\mu_2, \quad (1)$$

где μ_1 и μ_2 — соответственно консервативная и диссипативная (поглощающая) действующие магнитные проницаемости.

Чтобы воспользоваться законом Ома для магнитной цепи переменного тока, также напишем:

$$Z_\mu = \frac{\dot{F}_\kappa}{\dot{\Phi}}; \quad (2)$$

здесь $\dot{F}_\kappa$ и $\dot{\Phi}$ — соответственно м. д. с. катушки и магнитный поток в магнитопроводе тороида в комплексной форме;

Z_μ — комплексное магнитное сопротивление.

Дан метод определения уравнений для подсчета активного, реактивного и полного магнитного сопротивлений. Уравнения пригодны для индукции в пределах от 100—200 и до 15 000 гс и дают точность до 3—6%. Предложено уравнение для подсчета угла потерь в стали (через индукцию). Дан также ряд уравнений для подсчета потерь в стали. Эти уравнения отличны от уже известных формул Штейнметца, Рихтера и Цукермана. Формулы даны для различных частот. Расчетные уравнения магнитных сопротивлений, тангенса угла потерь и уравнения потерь в стали проверены по экспериментальным данным.

Здесь и далее ток, м. д. с., э. д. с., потери в стали, магнитный поток и индукция выражены в практической системе единиц, все размеры в см.

Выражение (2) для магнитопровода длиной l сечения S представим, аналогично как для электропровода, в таком виде:

$$Z_\mu = \frac{\dot{H}}{\dot{B}} \frac{l}{S} = \rho_z \frac{l}{S}, \quad (3)$$

где

$$\rho_z = \frac{\dot{H}}{\dot{B}}; \quad (4)$$

здесь ρ_z — удельное комплексное магнитное сопротивление магнитопровода;

$\dot{H}$, $\dot{B}$ — напряженности поля и магнитная индукция в сердечнике в комплексной форме.

Если измерить действующее значение тока в катушке $I_\kappa = \frac{F_\kappa}{w_\kappa}$ замкнутого ферромагнитного тороида, а также определить по уравнению

$$\Phi = \frac{E}{4k_e f w} \quad (5)$$

максимальное значение потока по измеренной эффективной э. д. с. E , то легко найти, пользуясь уравнением (2), модуль действующего комплексного магнитного сопротивления.

В общем случае связь между B и H нелинейна. Заменяя несинусоидальные токи, э. д. с. и токи эквивалентными синусоидами, берем коэффициент формы э. д. с. $k_e = 1,11$.

Реактивная составляющая комплексного магнитного сопротивления может быть найдена из суммарных потерь в стали. Как известно, суммарные потери в стали

$$P_c = \frac{F_c E}{W}. \quad (6)$$

Здесь н. с. компенсирующая потери в стали,

$$F_c = \Phi X_\mu = \Phi \rho_x \frac{l}{S}, \quad (7)$$

где X_μ и ρ_x — эффективное реактивное магнитное сопротивление и удельное связаны соотношением

$$X_\mu = \rho_x \frac{l}{S}. \quad (8)$$

Учитывая уравнения (5) и (7), суммарные потери в стали получим в таком виде:

$$P_c = 4 k_e f \Phi^2 \rho_x \frac{l}{S} [вт]. \quad (9)$$

Таким образом, определяя экспериментально потребляемую мощность и магнитный поток по данным измерения э. д. с., можно по уравнению (9) определить удельное реактивное магнитное сопротивление.

Обозначая через R_μ и ρ_R соответственно полное и удельное действующее активное магнитное сопротивление, получим:

$$Z_\mu = R_\mu + jX_\mu = (\rho_R + j\rho_x) \frac{l}{S}. \quad (10)$$

Следовательно,

$$\rho_x = \rho_R + j\rho_x.$$

На векторной диаграмме, представленной на рис. 1, показано построение удельных и полных магнитных сопротивлений, н. с. и магнитных потоков. На рисунке Φ и Φ_0 — общие потоки в сердечнике с учетом и без учета потерь в стали; Φ_2 — поток, создаваемый вторичными ампервитками, которые по действию эквивалентны потерям в стали.

Таким образом, определяя экспериментально Z_μ и X_μ , можно найти и R_μ согласно уравнению

$$\begin{aligned} R_\mu &= \sqrt{Z_\mu^2 - X_\mu^2} = \\ &= \sqrt{\rho_z^2 - \rho_x^2} \frac{l}{S} = \rho_R \frac{l}{S}. \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 2 построены кривые удельных эффективных магнитных сопротивлений в зависимости от напряженности поля и индукции для динамной стали типа Э1АА опытным данным Н. Шумиловского [2], снятым на переменном токе.

Учитывая уравнения (1), (4) и (11), найдем связь между со-

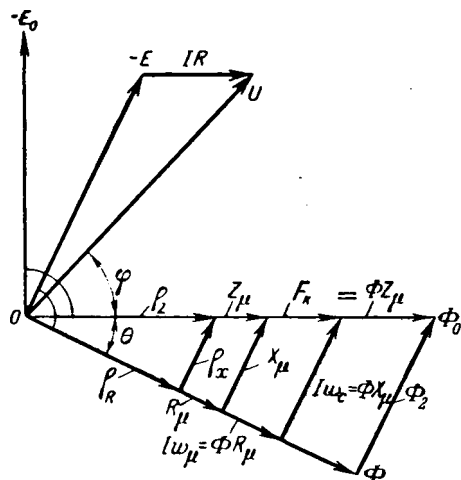


Рис. 1. Векторная диаграмма магнитной системы с учетом потерь в стали.

ставляющими комплексной магнитной проницаемости и составляющими удельного магнитного сопротивления. Так как $\rho_z = \frac{1}{\mu}$, то получаем:

$$\rho_R = \frac{\mu_1}{\mu_1^2 + \mu_2^2}, \quad (12)$$

$$\rho_x = \frac{\mu_2}{\mu_1^2 + \mu_2^2}. \quad (13)$$

Тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{X_\mu}{R_\mu} = \frac{\rho_x}{\rho_R} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (14)$$

Таким образом, имея кривые удельных магнитных сопротивлений (рис. 2) и задаваясь магнитной индукцией и размерами магнитной цепи

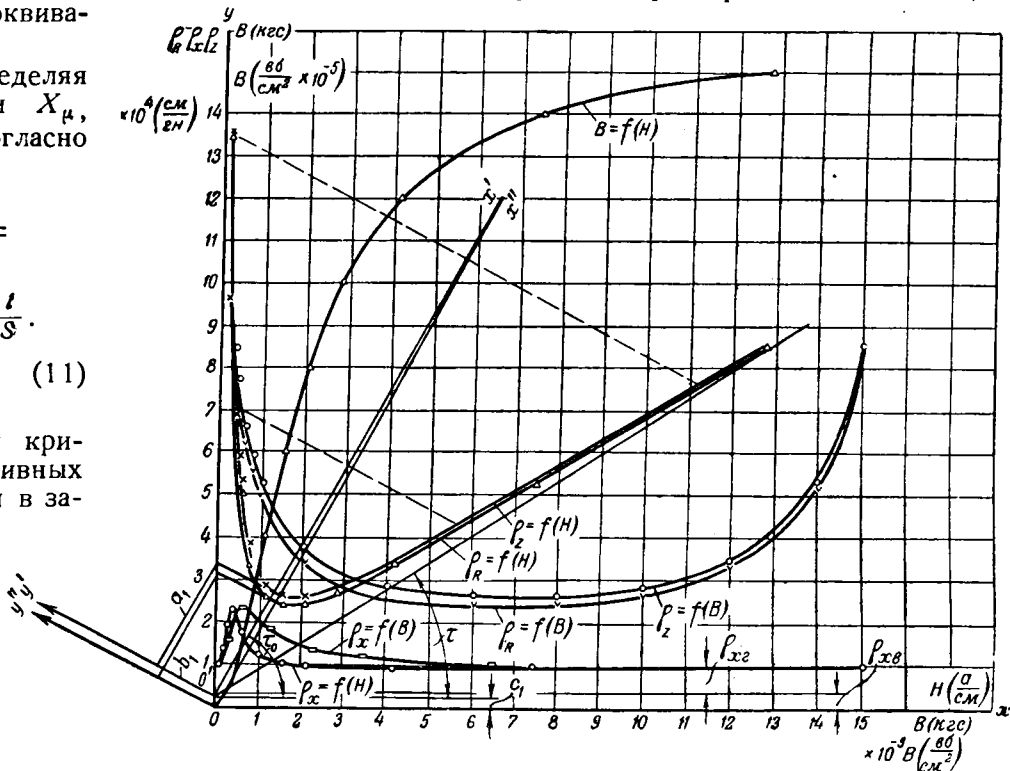


Рис. 2. Кривые магнитной индукции и магнитных сопротивлений для листов динамной стали типа Э1АА толщиной 0,5 мм при $f = 50$ Гц.

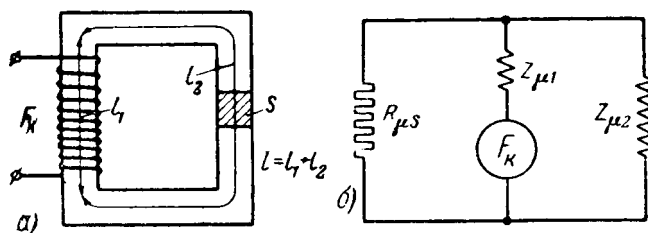


Рис. 3. Магнитная цепь и ее схема замещения.

l и S (рис. 3), легко определить комплексное магнитное сопротивление и найти по величине и фазе ампервитки намагничивающей катушки и тангенс угла потерь.

Определение удельных магнитных сопротивлений и потерь в стали, как убедился автор, с достаточной для практики точностью можно произвести аналитическим путем.

Начиная с индукции 7 кгс и выше, можно для некоторых сортов стали зависимость $\rho_R = f(H)$ представить в виде уравнения прямой [Л. 3 и 9]. Однако, много электромеанизмов работает при индукциях ниже 7 кгс. Кроме того, зависимость $\rho_R = f(H)$ для ряда сортов стали является прямолинейной при индукциях, значительно превосходящих 7 кгс. Например, для динамной стали типа Э1АА (рис. 2) прямолинейная зависимость $\rho_R = f(H)$ и $\rho_z = f(H)$ начинается только примерно с 10 кгс.

Представленные опытные кривые магнитных сопротивлений $\rho_z = f(H)$ и $\rho_R = f(H)$ сравнительно хорошо аппроксимируются уравнениями гипербол, отнесенными к координатным осям $y' o' x'$. Найдем уравнение гиперболы для $\rho_z = f(H)$. Одну асимптоту гиперболы совмещаем с осью y' , на которой отложены также удельные магнитные сопротивления стали. Другую асимптоту проводим под углом τ , таким образом, чтобы точки обеих ветвей относительно оси x' находились на одинаковом расстоянии. Уравнение гиперболы относительно координат y' и x' будет:

$$b_1^2 x'^2 - a_1^2 y'^2 = a_1^2 b_1^2. \quad (15)$$

Здесь значения a_1 и b_1 определяются из рис. 2.

При повороте осей координат x' и y' на угол τ_0 и переносе начала координат получим уравнения:

$$x' = x \cos \tau_0 + (y - c_1) \sin \tau_0, \quad (16)$$

$$y' = -x \sin \tau_0 + (y - c_1) \cos \tau_0. \quad (17)$$

После подстановки (16) и (17) в уравнение (15) и соответствующих преобразований получаем уравнение гиперболы в координатах xoy в таком виде:

$$y = -\frac{(b_1^2 - a_1^2)}{2a_1b_1}x + \frac{a_1b_1}{2x} + c_1. \quad (18)$$

Обозначая через n и m соответственно масштабы удельных ампервитков и модуль удельного комплексного магнитного сопротивления стали, будем иметь:

$$|\rho_z| = \alpha_1 + \beta_1 H + \frac{\gamma_1}{H}, \quad (19)$$

где $\alpha_1 = mc_1 = 1 \cdot 10^4 \cdot 0,275 = 27,5 \cdot 10^2$,

$$\beta_1 = \frac{b_1^2 - a_1^2}{2a_1b_1} \cdot \frac{m}{n} = + \frac{1,53^2 - 2,78^2}{2 \cdot 2,78 \cdot 1,53} \cdot \frac{1 \cdot 10^4}{1} = 63,1 \cdot 10^2. \quad (19a)$$

$$\gamma_1 = \frac{a_1b_1mn}{2} = \frac{2,78 \cdot 1,53 \cdot 1 \cdot 10^4}{2} = 2,12 \cdot 10^4. \quad (19b)$$

Пользуясь уравнением (4), выразим ρ_z через магнитную индукцию:

$$|\rho_z| = \frac{\alpha_1 B + \sqrt{\alpha_1^2 B^2 + 4\gamma_1(1 - \beta_1 B)B}}{2(1 - \beta_1 B)B}. \quad (19c)$$

Первый член подкоренного выражения при значениях индукции мал по сравнению со вторым членом. Учитывая это, получим:

$$|\rho_z| = \frac{\alpha_1}{2(1 - \beta_1 B)} + \sqrt{\frac{\gamma_1}{B(1 - \beta_1 B)}}. \quad (20)$$

По этому уравнению максимальная погрешность получается меньше 10% при изменении индукции от 0,1 до 15 кгс.

Если взять пределы изменения индукции меньшими, то точность соответственно увеличится. Так, в пределах от 0,6 до 15 кгс уравнение гиперболы (19), отнесенное к осям x' и y' , т. е. при $\alpha = 0$, дает погрешность около 6% при индукциях от 2 до 15 кгс порядка 4%.

При этом коэффициенты $\beta_1 = 65,6 \cdot 10^2$ и $\gamma_1 = 2,49 \cdot 10^4$.

Для удельного активного магнитного сопротивления при $\alpha_2 = 0$ получим аналогичное уравнение гиперболы

$$|\rho_R| = \beta_2 H + \frac{\gamma_2}{H}, \quad (21)$$

где коэффициенты $\beta_2 = 65,2 \cdot 10^2$ и $\gamma_2 = 2,24 \cdot 10^4$ подсчитаны согласно уравнений (19a) и (19b) только для кривой $\rho_R = f(H)$. Погрешность, посчитанная по этому уравнению, составляет максимум 9% при изменении индукции от 0,3 до 15 кгс, а при изменении индукции от 2 до 15 — 4%.

Если же определить для каждого из пределов индукций постоянные коэффициенты $\beta_1 \gamma_1$; $\beta_2 \gamma_2$, как это было сделано выше (при $\alpha = 0$) погрешность (19), (21) может быть еще снижена и доведена при изменении индукции от 2 до 15 кгс до 5%. Значения указанных коэффициентов введены в табл. 1.

Модули комплексного и активного удельного магнитного сопротивлений, выраженные через магнитную индукцию, имеют вид:

$$|\rho_z| = \sqrt{\frac{\gamma_1}{B(1 - \beta_1 B)}}, \quad (22)$$

$$\rho_R = \frac{\gamma_2 + B(\gamma_1 \beta_2 - \gamma_2 \beta_1)}{\sqrt{\gamma_1 B(1 - \beta_1 B)}}. \quad (23)$$

Пользуясь (4) и (20), легко найти уравнение для кривой намагничивания

$$H = \frac{\alpha_1 B}{2(1 - \beta_1 B)} + \sqrt{\frac{\gamma_1 B}{(1 - \beta_1 B)}}, \quad (24)$$

при $\alpha_1 = 0$

$$B = \frac{H^2}{\gamma_1 + \beta_1 H^2}. \quad (25)$$

Расчетные коэффициенты для определения удельных магнитных сопротивлений стали

Таблица 1

Пределы изменения магнитной индукции, кГс	Коэффициент для полного магнитного сопротивления		Коэффициенты для активного магнитного сопротивления		σ_1	σ_2
	β_1	γ_1	β_2	γ_2		
0,2—0,6	$60,2 \cdot 10^3$	$1,672 \cdot 10^4$	$46,8 \cdot 10^3$	$1,705 \cdot 10^4$	$-11,23 \cdot 10^6$	$-2,4 \cdot 10^8$
0,6—6	$6,65 \cdot 10^3$	$2,57 \cdot 10^4$	$5,77 \cdot 10^3$	$2,35 \cdot 10^4$	$+10,82 \cdot 10^7$	$-7,99 \cdot 10^6$
6—15	$6,52 \cdot 10^3$	$2,53 \cdot 10^4$	$6,51 \cdot 10^3$	$2,17 \cdot 10^4$	$+16,92 \cdot 10^7$	$+2,3 \cdot 10^7$

Таблица 2

Сводная таблица более простых расчетных формул для удельных магнитных сопротивлений и потерь в стали

Удельный сток	Пределы изменения индукции кГс мкВб/см^2	Расчетные уравнения для магнитного сопротивления	Максимальная относительная погрешность для магнитного сопротивления, %	Значение постоянных коэффициентов	Расчетные уравнения для полных потерь в стали при $f = 50$ Гц, Вт
1	0,2 ÷ 0,6 2 ÷ 6	$\rho_R = k_1 - k_2 B$ $\rho_x = k_3 + k_4 B$	5 5	$k_1 = 1,12 \cdot 10^5$ $k_2 = 8,96 \cdot 10^9$ $k_3 = 8,4 \cdot 10^3$ $k_4 = 25,6 \cdot 10^8$	$P_c = a_1 I S (k_3 + k_4 B) B^2$, где $a_1 = 2,22 \cdot 10^2$
2	0,6 ÷ 6 6 ÷ 60	$\rho_R = k_5 + \frac{k_6}{B}$ $\rho_x = \frac{k_7}{k_8 + B}$	6 3	$k_5 = 2,0 \cdot 10^4$ $k_6 = 0,27$ $k_7 = 0,92$ $k_8 = 3,3 \cdot 10^{-5}$	$P_c = a_2 I S \frac{B^2}{k_8 + B}$, где $a_2 = 2,04 \cdot 10^2$
3	4 ÷ 10 40 ÷ 100	$\rho_R = \text{const} = 2,55 \cdot 10^4$ $\rho_x = \text{const} = 1,01 \cdot 10^4$	5 5	—	$P_c = a_3 I S B^2$, где $a_3 = 2,24 \cdot 10^6$
4	10 ÷ 15 100 ÷ 150	$\rho_R = k_9 + \frac{k_{10}}{k_{11} - B}$ $\rho_x = \text{const} = 0,98 \cdot 10^4$	4 5	$k_9 = 1,54 \cdot 10^4$ $k_{10} = 0,695$ $k_{11} = 1,6 \cdot 10^{-4}$	$P_c = a_4 I S B^2$, где $a_4 = 2,17 \cdot 10^6$

Пользуясь уравнениями (19), (21) — (23), можно выразить удельное реактивное магнитное сопротивление

$$\begin{aligned} \rho_x &= \sqrt{\rho_z^2 - \rho_R^2} = \\ &= \sqrt{\left(\beta_1 H + \frac{\gamma_1}{H}\right)^2 - \left(\beta_2 H + \frac{\gamma_2}{H}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\gamma_1 B (1 - \beta_1 B)} [(\gamma_1^2 - \gamma_2^2) - B^2 (\gamma_1 \beta_2 - \gamma_2 \beta_1)^2 - 2 \gamma_2 B (\gamma_1 \beta_2 - \gamma_2 \beta_1)]} = \\ &= \sqrt{\frac{\gamma_1^2 - (\gamma_2 + \sigma_2 B)^2}{\gamma_1 B (1 - \beta_1 B)}} = \sqrt{\frac{\sigma_1 - 2 \gamma_1 \sigma_2 B - \sigma_2^2 B^2}{\gamma_1 (1 - \beta_1 B) B}}, \quad (26) \end{aligned}$$

где $\sigma_1 = \gamma_1^2 - \gamma_2^2$, $\sigma_2 = \gamma_1 \beta_2 - \gamma_2 \beta_1$.

Третий член в подкоренном выражении (26) в пределах изменения индукции от 0,2 до 14 кГс называется очень мало и им вполне можно пренебречь по сравнению с двумя другими членами. Тангенс угла потерь в стали можно найти, если учесть уравнение (23) и (26):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\rho_x}{\rho_R} = \sqrt{\frac{\gamma_1^2}{(\gamma_2 + \sigma_2 B)^2} - 1}. \quad (27)$$

По приведенным в табл. 1 коэффициентам построена по уравнению (27) кривая изменения угла потерь в стали в функции магнитной индукции (рис. 4). Сравнивая расчетную и опытную кривую можно сказать, что уравнение дает вполне удовлетворительные результаты.

Определение аналитически удельного реактивного магнитного сопротивления ρ_x с надлежащей точностью особенно ценно, так как оно позволяет получить новые расчетные уравнения для определения суммарных потерь в стали и отдельно потерь на гистерезис и на вихревые токи.

Учитывая (9) и (26), получаем для суммарных потерь в стали:

$$P_c = 4 k_e f_0 S I B \sqrt{\frac{(\sigma_1 - 2 \sigma_2 \gamma_2 B) B}{\gamma_1 (1 - \beta_1 B)}} [\text{Вт}], \quad (28)$$

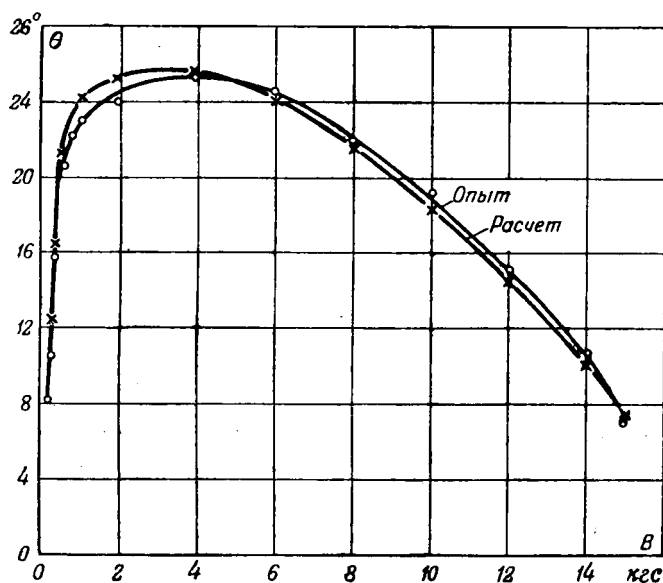


Рис. 4. Изменение угла потерь θ динамной стали типа Э1АА толщиной 0,5 мм в зависимости от индукции.

f_0 — частота переменного тока, при которой определялись магнитные сопротивления. В нашем случае $f_0 = 50$ гц.

Представленную на рис. 2 кривую $\rho_x = \varphi(B)$ в диапазоне индукции от 0,1 до 15 кГс можно также выразить уравнением следующего вида:

$$\rho_x = \frac{aB}{b + B^2} + c, \quad (29)$$

где коэффициенты при изменении индукции в пределах от 0,6 до 15 кГс следует принять: $a = 0,15$; $b = 0,25 \cdot 10^{-10}$ и $c = 8,5 \cdot 10^{-3}$, а для индукции от 0,1 до 0,6 кГс: $a = 0,305$; $b = 8,2 \cdot 10^{-11}$ и $c = 6,3 \cdot 10^{-3}$. Погрешность, подсчитанная по уравнению (29) в указанных пределах индукции, составляет максимум 6%. При индукциях свыше 4 кГс погрешность не изменяется, если в уравнении (29) положить $b = 0$.

Суммарные потери в стали в пределах индукции от 0,1 до 15 кГс будут:

$$P_c = 4k_e f_0 S l B^2 \left(c + \frac{aB}{b + B^2} \right) [см]. \quad (30)$$

При индукциях от 4 кГс и выше это уравнение переписывается так:

$$P_c = 4k_e f_0 S l (aB + cB^2).$$

Формула (9) общих потерь в стали для индукции свыше 7 кГс может быть выражена еще более просто, так как удельное реактивное магнитное сопротивление ρ_x в этом случае остается практически постоянным (рис. 2):

$$P_c = \sigma_0 k_e B^2 l S. \quad (31)$$

Для указанной марки динамной стали постоянный коэффициент

$$\sigma_0 = 4\rho_x f_0 = 4 \cdot 0,98 \cdot 10^4 \cdot 50 = 19,58 \cdot 10^5. \quad (32)$$

Уравнение (31) аналогично формуле общих потерь, приведенной Г. Н. Петровым в его книге "Трансформаторы" [Л. 10].

Когда учитывается рассеяние катушки (рис. 3), потери в стали

$$P_c = 4k_e f_0 \left(\Phi_1^2 \rho_{x1} \frac{l_1}{S_1} + \Phi_2^2 \rho_{x2} \frac{l_2}{S_2} \right). \quad (33)$$

В этом случае потери в стали можно определить еще иначе, но с тем же результатом.

Схема магнитной цепи для магнитопровода, представленного на рис. 3,а, изображена на рис. 3,б. Из этой схемы определим эквивалентное магнитное сопротивление:

$$Z_{\mu s} = Z_{\mu 1} + \frac{R_{\mu s} Z_{\mu 2}}{R_{\mu s} + Z_{\mu 2}}. \quad (34)$$

Реактивная составляющая этого магнитного сопротивления

$$X_{\mu s} = X_{\mu 1} + \frac{R_{\mu s}^2 X_{\mu 2}}{X_{\mu 2}^2 + (R_{\mu s} + R_{\mu 2})^2} \quad (35)$$

дает возможность определить потери в стали

$$P_c = 4k_e f_0 \Phi_1^2 X_{\mu s}. \quad (36)$$

Полученные автором выше уравнения потерь в стали пригодны для расчета при частоте $f = 50$ гц

Можно найти суммарные потери в стали в общем виде при другой частоте:

$$P_c = 4k_e f S l B^2 \left[\rho_x - \rho_{xs} \left(1 - \frac{f}{f_0} \right) \right]. \quad (37)$$

Автор, пользуясь экспериментальными данными Шумиловского [Л. 2], подсчитал реактивную составляющую потерь от вихревых токов для указанного сорта динамной стали при $f = 50$ гц. Она оказалась (рис. 2) равной $\rho_{xs} = 3,4 \cdot 10^3$.

Расчетные формулы (22) и (30) для подсчета суммарных потерь в стали при другой частоте в диапазоне индукции от 0,1—0,2 до 15 кГс представляются так:

$$P_c = 4k_e f l S B^2 \left[\sqrt{\frac{\gamma_1^2 - (\gamma_2 + \sigma_2 B)^2}{\gamma_1 B (1 - \beta_1 B)}} - \rho_{xs} \left(1 - \frac{f}{f_0} \right) \right] \quad (38)$$

$$P_c = 4k_e f S l B^2 \left[\left(c_0 + \frac{aB}{b + B^2} \right) + \rho_{xs} \frac{f}{f_0} \right].$$

Здесь $c_0 = c - \rho_{xs} = (8,5 - 3,41) \cdot 10^{-3} = 5,09 \cdot 10^{-4}$ для индукции в пределах от 0,6 до 15 кГс и $c_0 = (6,3 - 3,41) \cdot 10^{-3} = 2,89 \cdot 10^{-3}$ для индукции от 0,1 до 0,6 кГс.

Как видим, первое уравнение потерь в стали несколько сложнее второго.

По второму (38) и ранее полученным коэффициентам a , b , c и ρ_{xs} построены кривые потерь в динамной стали в зависимости от индукции для частот 30, 50 и 60 гц (рис. 5). Сравнение опытных и расчетных кривых показывает, что уравнение (38) дает вполне удовлетворительные результаты при индукциях от 0,2 до 15 кГс. Коэффициенты a , b и c взяты такими, чтобы более точно отобразить потери в стали на участке от 7 кГс и ниже (рис. 5).

Можно, несколько изменив эти коэффициенты, добиться, чтобы опытные и расчетные кривые практически совпали при индукциях, например,

выше 7 кгс. В уравнении (38) при индукциях 4 ÷ 5 кгс и выше можно положить $b=0$, тогда

$$P_c = 4k_e S l f [aB + (c_0 + \tau'_0 f) B^2], \quad (39)$$

$$\tau'_0 = \frac{\rho_{xs}}{f_0} = \frac{3,40 \cdot 10^3}{50} = 68,2.$$

Итак, при индукциях свыше 6 — 7 кгс, когда керосиное реактивное магнитное сопротивление ρ_{xz} остается практически постоянным (см. 2), потери в стали

$$P_c = 4k_e S l B^2 f (\rho_{xz} + \tau_0 f). \quad (40)$$

$$\text{или } \rho_{xz} = \rho_x - \rho_{xs} = (9,8 - 3,41) 10^3 = 6,39 \cdot 10^3.$$

На основе изложенного выше определим теперь расчетные уравнения потерь в стали при частоте, раздельно на вихревые токи и токи гистерезиса, и выразим их через коэффициенты, полученные экспериментально при $f=50$ гц.

На основе (32), (37), (47)

$$\left. \begin{aligned} P_{cs} &= 4 k_e S l (Bf)^3 \frac{\rho_{xs}}{f_0} \\ P_c &= 4k_e f S l B^2 \left[\sqrt{\frac{\gamma_1 - (\gamma_2 + \tau_2 B)^2}{\gamma_1 B (1 - \beta_1 B)}} - \rho_{xs} \right] \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$P_{c,z} = 4k_e f S l B^2 \left(c_0 + \frac{aB}{b + B^2} \right). \quad (42)$$

При $B \geq 4 \div 5$ кгс в (42) коэффициент $b=0$, тогда

$$P_{c,z} = 4k_e S l f (aB + c_0 B^2). \quad (43)$$

Полученное уравнение потерь на гистерезис совпадает с известным уравнением Рихтера. Таким образом, формула (42) является более общей для подсчета потерь на гистерезис и может быть использована в диапазоне индукции от 0,1 до 15 кгс с погрешностью порядка 7%.

При индукциях свыше 7 кгс, когда гистерезисное реактивное магнитное сопротивление практически остается постоянным, получим:

$$P_{c,z} = 4k_e S l B^2 \rho_{xz} f, \quad (44)$$

для динамной стали типа Э1АА $\rho_{xz} = 6,39 \cdot 10^3$.

В заключение автор считает весьма полезным сводку более простых расчетных формул магнитных сопротивлений для случая, когда магнитная цепь электрической машины, вращающей или какого-либо другого электромагнитного механизма работает в сравнительно узком диапазоне изменения индукции.

Эти формулы получены из кривых $\rho_R = f(B)$ (рис. 2) для четырех характерных участков изменения удельных магнитных сопротивлений в зависимости от индукции. Там же приведены расчетные уравнения для потерь в стали при $f_0 = 50$ гц.

Полученные автором расчетные формулы для подсчета потерь в стали отличны от уже извест-

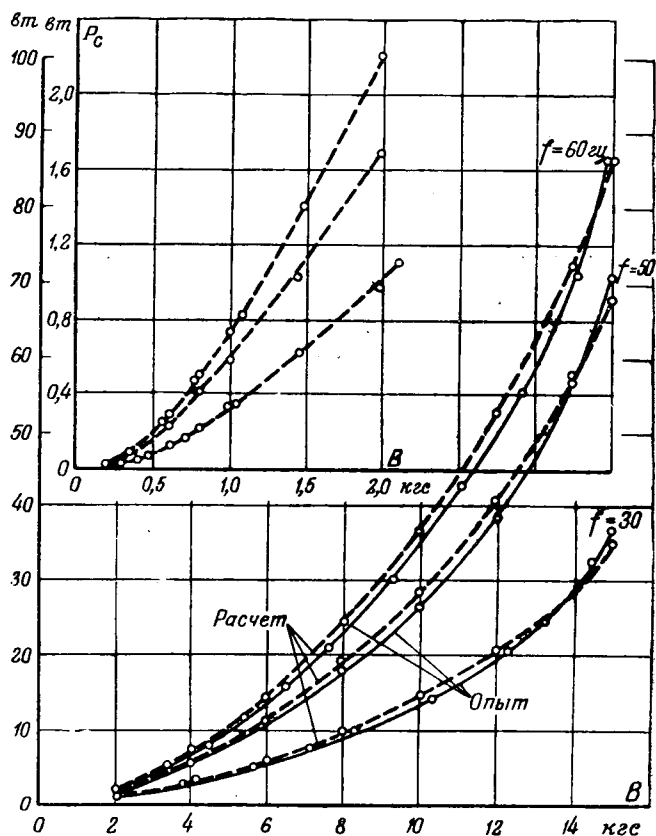


Рис. 5. Изменение опытных расчетных потерь в динамной стали типа Э1АА в зависимости от индукции при различных частотах.

ных в литературе формул Штейнметца [Л. 13], Рихтера [Л. 10] и Цукермана [Л. 13] и позволяют произвести расчет в значительно большем диапазоне индукций, с большей точностью и без подсчета веса рассматриваемого магнитопровода. Кроме этого в отличие от ряда известных формул полученные уравнения не имеют дробных степеней, затрудняющих пользование счетной линейкой.

Как известно [Л. 13], например, формула Штейнметца пригодна для индукций от 1 до 10 ÷ 12 кгс. Формула Рихтера при подсчете потерь на гистерезис дает все же значительные отклонения от опытной кривой в пределах индукций от 2 до 9 кгс; максимальная погрешность получается порядка 24% [Л. 14].

Предложенный метод позволяет получить расчетные уравнения для подсчета магнитных сопротивлений и потерь в стали при различной частоте и для других магнитных материалов типа пермаллой, пермендюр и др.

Литература

1. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946
2. Н. Н. Шумиловский. Комплексный метод расчета магнитных цепей. Автоматика и телемеханика, № 4, 1940.
3. A. Callen. Распределение и сдвиг по фазе потоков в разветвленной магнитной цепи индукционного счетчика. Archiv f. Electrotechnik, т. XXIII, стр. 40.
4. М. И. Левин. Методы расчета схем, содержащих цепи с ферромагнитными сердечниками. Труды Москов-

ского энергетического института. вып. 3, Госэнергоиздат, 1948.

5. В. К. Аркадьев. Магнитные свойства как функции частоты магнитного поля. Журнал технической физики, т. XIII, № 6, 1943.

6. К. М. Поливанов. Определение комплексной магнитной проницаемости вещества из эффективной комплексной магнитной проницаемости тела по методу В. К. Аркадьева. Проблемы ферромагнетизма и магнетодинамики. Издание Академии наук СССР, 1946.

7. Л. Р. Нейман и П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники, ч. III. Теория электромагнитного поля. Госэнергоиздат, 1948.

8. Н. А. Лившиц. Магнитные цепи переменного тока. Труды ВЭТКАС, № 9, 1945.

9. Б. С. Сотсков. Методы расчета магнитных цепей переменного тока с учетом потерь в железе. Известия электропромышленности слабого тока № 8, 1940.

10. Г. Н. Петров. Трансформаторы, т. I, ОНТИ, 1934.

11. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1946.

12. Л. М. Пиотровский и Д. В. Васильев. Влияние третьей гармонической напряжения на потери в железе трансформатора. Труды Ленинградского института, № 2, 1937.

13. П. Л. Калантаров. Теория переменных токов. ОНТИ, 1934.

14. Э. Арнольд и И. Л. Лакур. Машины переменного тока (перевод с немецкого). Госэнергоиздат, 1934.

15. Б. К. Буль. Метод расчета сложной индукционной системы. Труды МЭИ, № 6, 1950.

[27.1.58]



Расчет электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Теория пробоя непропитанной бумаги [Л. 1] рассматривает пробой этого диэлектрика, как пробой газообразной фазы — воздуха, в сквозных порах, пронизывающих бумагу. Впоследствии в эту теорию была внесена поправка, предусматривавшая, что при достаточно малом диаметре сквозных пор пробой бумаги следует рассматривать, как пробой твердой фазы — клетчатки, поскольку при малом сечении пор электрическая прочность воздуха сильно возрастает и становится выше электрической прочности твердой фазы. Иную точку зрения высказал М. М. Михайлов, который считает, что слои воздуха в непропитанной бумаге включены последовательно по отношению к слоям клетчатки (стенкам бумажных волокон); по мнению М. М. Михайлова [Л. 2, стр. 274], сначала происходит пробой воздуха, после чего все напряжение оказывается приложенным к тонким стенкам волокон, которые также пробиваются. Такую точку зрения можно назвать „теорией последовательного пробоя“. Авторы перечисленных выше теорий не пытались их применить для вычисления значений электрической прочности бумаги.

Теория последовательного пробоя лучше других соответствует современным представлениям о структуре бумаги, почему представлялось це-

дается критика ранее разрабатывавшихся теорий пробоя непропитанной бумаги. Предлагается новая теория последовательного пробоя, основанная на физических представлениях о структуре бумаги. Использование предлагаемой эквивалентной схемы позволяет получить простое выражение для зависимости электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги от ее плотности и толщины, которое удовлетворительно согласовывается с опытными данными. Сокращенное изложение доклада на заседании Ленинградского отделения Всесоюзного бюро электрической изоляции в октябре 1949 г.

лесообразным проверить в какой степени эта теория может дать количественное совпадение с опытными данными при пробое бумаги. Для этой цели можно воспользоваться последовательной схемой (рис. 1), которая уже была с успехом применена для расчета э-

лектрической проницаемости пропитанной и непропитанной бумаги [Л. 3]. На рис. 1 емкостью C_k изображает твердую фазу (клетчатку), а емкость C_g — газообразную фазу (воздух в порах бумаги); d — толщина бумаги, а d_k и d_g соответственно, толщины слоев клетчатки и воздуха; a — относительный объем пор в бумаге, рав-

$$a = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_k},$$

где γ — плотность бумаги и $\gamma_k \approx 1,55$ г/см³ — плотность клетчатки. Напряжение U , приложенное к образцу бумаги, распределяется между слоями клетчатки и воздуха, т. е. между емкостями C_k и C_g ; соответственно получаем два значения напряжения U_k и U_g , связанные соотношениями

$$\frac{U_k}{U_g} = \frac{C_g}{C_k} = \frac{a}{\epsilon_k(1-a)};$$

$$U = U_g + U_k.$$

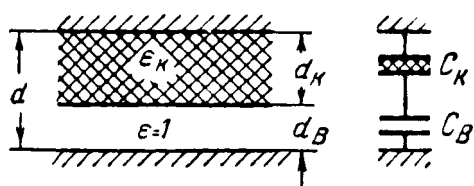


Рис. 1. Эквивалентная схема к расчету электрической прочности непропитанной бумаги.

Отсюда

$$U = U_0 \left[1 + \frac{a}{\epsilon_K (1-a)} \right] = U_0 \left[1 + \frac{\gamma}{\epsilon_K (\gamma_K - \gamma)} \right]. \quad (4)$$

Согласно теории последовательного пробоя разрывание бумаги происходит после пробоя слоя воздуха. Поэтому для пробивного напряжения непропитанной бумаги можно написать выражение

$$U_{np} = U_{np.в} \left[1 + \frac{\gamma}{\epsilon_K (\gamma_K - \gamma)} \right], \quad (5)$$

где $U_{np.в}$ — пробивное напряжение воздуха в зазорах малой толщины. Для зазоров с толщиной $b = 8$ мм и меньше (при атмосферном давлении) можно принять действующее значение $U_{np.в} \approx 250$ в. Среднее значение пробивной напряженности непропитанной тонкой бумаги

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d} \left[1 + \frac{\gamma}{\epsilon_K (\gamma_K - \gamma)} \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) дает зависимость электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги от ее плотности и толщины. На рис. 2 сопоставлены расчетные и опытные данные для $E_{np} = f(\gamma)$ при $d = 10$ мм, а на рис. 3 — для зависимости $E_{np} = f(d)$ при $\gamma = 1,02$ г/см³. В последнем случае в качестве опытных данных взяты значения E_{np} конденсаторной бумаги по ГОСТ 1908-42.

Совпадение расчетных и опытных данных на рис. 2 и 3 достаточно удовлетворительно для того, чтобы считать теорию „последовательного пробоя“ соответствующей действительной физической картине явления.

Расчет по формуле (6) дает некоторое среднее значение электрической прочности, соответствующее такому участку бумаги, в котором статистическая толщина воздушных пор совпадает с расчетным значением, вычисленным по значению относительного объема пор a . Следует предположить, что в разных участках бумажной толщины размеры воздушных пор могут быть разными, что должно неизбежно давать значительный разброс значений пробивного напряжения при испытании бумаги с электродами небольшой площади. Крайними пределами этого разброса являются: случай пробоя на участке сплошного слоя клетчатки (толщина которого равна толщине бумаги) и случай пробоя на сквозной дырке

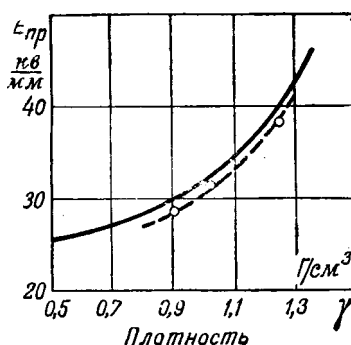


Рис. 2. Зависимость электрической прочности непропитанной конденсаторной бумаги от ее плотности. Сплошная линия — расчетная по формуле (6), пунктирная — опытные данные.

(слой воздуха, толщина которого равна толщине бумаги). Эти два случая должны дать нам два значения пробивного напряжения: $U_{np.макс}$ и $U_{np.мин}$, между которыми должны расположиться значения пробивных напряжений, полученные из опыта. Если толщина бумаги невелика, то можно принять $U_{np.мин} = U_{np.в} = 250$ в. Для определения $U_{np.макс}$ надо знать электрическую прочность клетчатки $E_{np.к}$, так как

$$U_{np.макс} = E_{np.к} d. \quad (7)$$

Используя приведенные выше выражения, можно найти, что после пробоя слоя воздуха напряженность в слое клетчатки возрастает до величины порядка 50 кВ/мм, причем слой клетчатки пробивается. Принимая $E_{np.к} \approx 50$ кВ/мм, по выражению (7) можно найти значение $U_{np.макс}$. Полагая, что интегральная вероятность пробоя W (число пробоев при заданном или меньшем напряжении в процентах от общего числа пробоев) при $U = U_{np.мин}$ равна нулю, а при $U = U_{np.макс}$ равна 100%, можно построить теоретическую кривую зависимости вероятности пробоя от напряжения, приложенного к образцу конденсаторной бумаги, в виде прямой, соединяющей точку A ($U = U_{np.мин}$; $W = 0$) с точкой B ($U = U_{np.макс}$; $W = 100\%$). На рис. 4 показана опытная кривая $W = f(U)$, характеризующая разброс действующих значений пробивных напряжений для сульфат-целлюлозной конденсаторной бумаги толщиной 8,5 мм (плоские электроды диаметром 25 мм; частота 50 Гц), на этом же рисунке проведена расчетная прямая AB . Основная часть опытной кривой хорошо совместилась с прямой AB . Это показывает, что в данном случае основной причиной разброса электрической прочности действительно является неравномерность распределения воздушных пор по объему бумаги. Вместе с тем в левой части опытной кривой имеется ответвление в сторону малых значений пробивных напряжений, лежащих ниже значения $U_{np.мин}$. Это отклонение от расчетных дан-

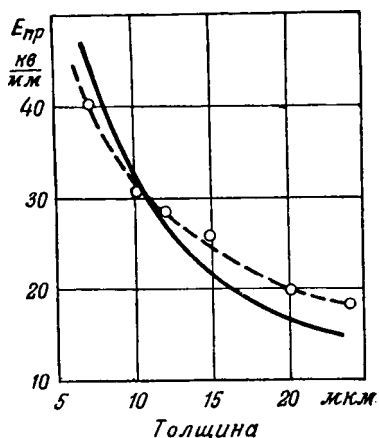


Рис. 3. Зависимости электрической прочности неопитанной конденсаторной бумаги от ее толщины. Сплошная линия — расчетная по формуле (6), пунктирная — опытные данные.

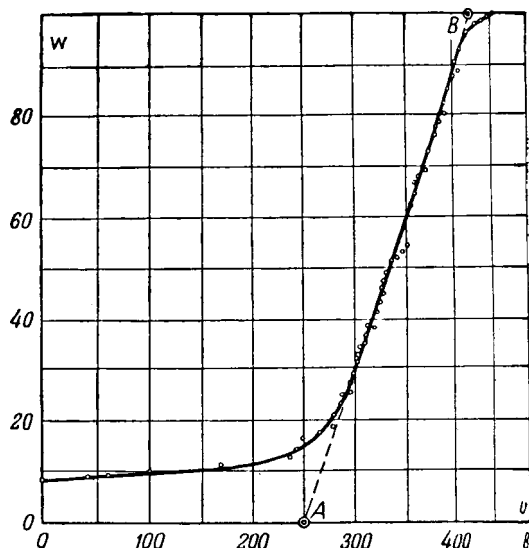


Рис. 4. Разброс значений пробивного напряжения неопитанной конденсаторной бумаги толщиной 8,5 мм.

ных следует объяснять наличием в бумаге токопроводящих частиц, которые мы не учитываем в расчете. Если размеры токопроводящей частицы соизмеримы с толщиной бумаги, то мы можем получить прямое короткое замыкание электродов через такую частицу, т. е. $U_{пр} = 0$; если размер частицы меньше толщины бумаги и она отделена от электродов тонким слоем клетчатки, то можно получить значение $U_{пр}$, которое будет больше нуля, но меньше $U_{пр.мин}$. Именно наличием проводящих частиц можно объяснить основное противоречие между теорией последовательного пробоя, согласно которой пробивное напряжение бумаги не может быть меньше пробивного напряжения слоя воздуха с толщиной, равной толщине бумаги (т. е. $U_{пр.мин}$), и опытом, который дает определенное число пробоев при напряжениях, меньших $U_{пр.мин}$.

Существование в бумаге токопроводящих частиц, представляющих собой преимущественно включения железа и меди или же окислов этих

металлов, было подтверждено специальными исследованиями [Л. 4.]

Приведенные выше данные показывают, что теория последовательного пробоя позволяет произвести расчет значений электрической прочности неопитанной конденсаторной бумаги; результаты этого расчета удовлетворительно согласуются с данными опыта. Представляет интерес дальнейшее развитие этой теории для объяснения закономерностей, наблюдаемых при пробое пропитанной бумаги.

Литература

1. А. Гемант. Электрофизика изолирующих материалов. Кубуч, 1932.
2. М. М. Михайлов. Электротехнические материалы. Кубуч, 1933.
3. В. Т. Ренне. Расчет диэлектрической прочности пропитанной бумаги. Электричество, № 1, 1949.
4. В. Т. Ренне. Проводящие включения в конденсаторной бумаге. Бумажная промышленность, № 1, 1941.

[22. 10. 50]



Электрические свойства некоторых материалов в полях высокой частоты

Инж. А. Б. ШИСТЕР

Центральная научно-исследовательская лаборатория по электрификации промышленности и строительных работ МСПТИ

Электрические свойства диэлектриков и проводников при заданной частоте однозначно характеризуются либо величинами удельных активной и реактивных проводимостей (или сопротивлений), либо диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла потерь.

Удельная реактивная проводимость γ_p характеризует величину диэлектрической проницаемости.

Удельная активная проводимость γ_a характеризует величину удельных диэлектрических потерь p :

$$p = E^2 \gamma_a = E^2 \gamma_p \operatorname{tg} \delta,$$

E — напряженность поля;

$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь материала.

При переменном напряжении определенной частоты о диэлектрических потерях в материале можно судить по величине $\operatorname{tg} \delta$, равной отношению удельных проводимостей активной γ_a и реактивной γ_p .

При включении полупроводников в нагрузочный контур генератора собственная частота контура зависит от электрических параметров нагрузки. В начальной стадии обработки контур настраивается в резонанс с частотой генератора, что обеспечивает высокий к. п. д. обработки. Изменение параметров нагрузки в процессе термообработки влечет за собой изменение частоты контура и уменьшение к. п. д. поддержание высокого к. п. д. требует специального регулировочного устройства для компенсации указанных изменений.

Для проектирования генераторов диэлектрического нагрева и рационального проведения процесса термообработки необходимо иметь представление о зависимости электрических характеристик от ряда физических факторов: структуры, влажности, температуры, анизотропии строения, частоты и т. д.

Излагаются результаты экспериментального исследования электрических свойств некоторых материалов в полях высокой частоты. Приводятся зависимости электрических параметров древесины, суспензированного ацетида и текстиля от влажности, температуры, анизотропии строения и т. д.

Исследование электрических характеристик материалов в полях высокой частоты проводилось в ЦНИЛЭПС преимущественно методом замещения

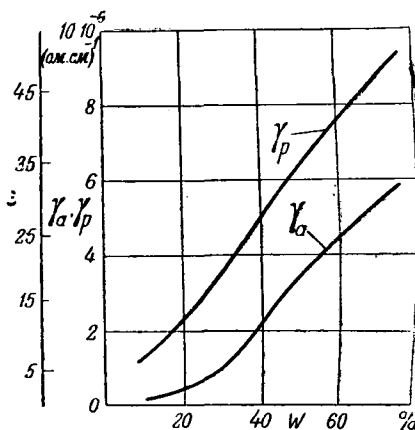
в схеме с независимым генератором высокой частоты [Л. 2,3] или замещением образцов в условиях производственной сушки.

Древесина. Сложная макро- и микроструктура, анизотропность строения, большая неоднородность и неустраняемая гигроскопичность древесины затрудняют определение ее электрических характеристик в поле высокой частоты.

Не только каждая порода древесины резко отличается одна от другой, но для образцов одной и той же породы, взятых из разных мест по длине ствола, физико-механические и электрические свойства различны. Задачей экспериментального исследования являлось установление средних значений характеристик для различных пород.

Проведенные испытания более чем для 2000 образцов сосны, ели, березы и дуба позволили установить зависимость электрических характеристик от ряда факторов: влажности, частоты, температуры, различной ориентации электрического поля относительно годовых колец и т. д.

Рис. 1. Зависимость удельной активной проводимости γ_a , удельной реактивной проводимости γ_p и диэлектрической проницаемости ϵ от влажности w для древесины сосны. Температура 90 — 100° С. Частота $f = 334 \text{ кгц}$ ($\epsilon = 5,36 \cdot 10^6 \gamma_p$).



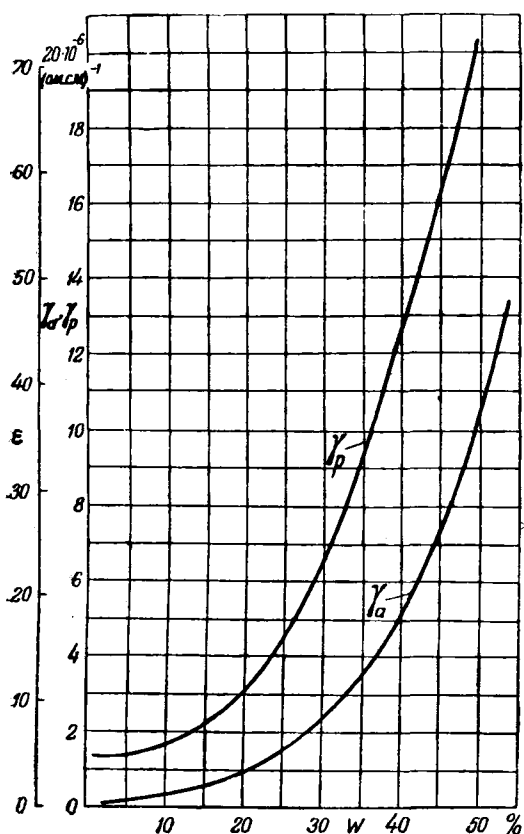


Рис. 2. Зависимости γ_a , γ_p и ϵ от w для древесины дуба. Температура $90-100^\circ\text{C}$. Частота $f = 500 \text{ кГц}$ ($\epsilon = 3,58 \cdot 10^6 \gamma_p$).

На рис. 1 и 2 представлены кривые зависимости удельной активной и реактивной проводимости и диэлектрической проницаемости сосны и дуба от влажности w (при температуре $90-100^\circ\text{C}$). На рис. 3 и 4 даны аналогичные кривые электрических параметров по трем осям анизотропии для березы (при температуре $15-17^\circ\text{C}$ и соответственно $90-100^\circ\text{C}$).

Различие параметров, полученных для различных пород древесины, как, например, более высокие значения диэлектрической проницаемости березы или дуба по сравнению с сосной даже в абсолютно сухом состоянии находят свое объяснение в структурных особенностях каждой породы [Л. 4]. Объем заполненных воздухом полостей у сосны больше, чем у березы и дуба. В период разогрева древесины имеет место рост проводимостей по всем направлениям, но особенно в направлении С (поле параллельно годичным слоям).

Из зависимостей проводимостей γ_a и γ_p от w мы можем получить зависимости последовательных удельных сопротивлений — активного ρ_a и реактивного ρ_p от w , пользуясь выражениями

$$\rho_a = \frac{\gamma_a}{\gamma_a^2 + \gamma_p^2} \quad \text{и} \quad \rho_p = \frac{\gamma_p}{\gamma_a^2 + \gamma_p^2}.$$

Зависимость ρ_a от w (рис. 5) имеет максимум при некотором значении влажности. Опыты показывают, что максимум ρ_a наступает при влажности ниже точки насыщения волокон древесины.

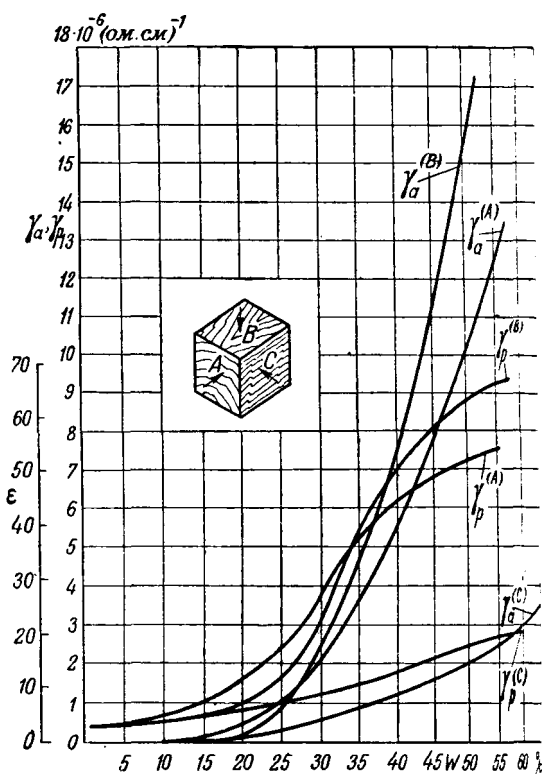


Рис. 3. Зависимости γ_a , γ_p и ϵ в направлении трех осей анизотропии.

(А — вдоль волокон, параллельно сердцевинной трубке; В — поперечная ось, перпендикулярно годичным слоям; С — тангенциальная ось, параллельно годичным слоям и перпендикулярно оси сердцевинной трубки). Температура 15°C . Частота $f = 500 \text{ кГц}$ ($\epsilon = 7,16 \cdot 10^6 \gamma_p$).

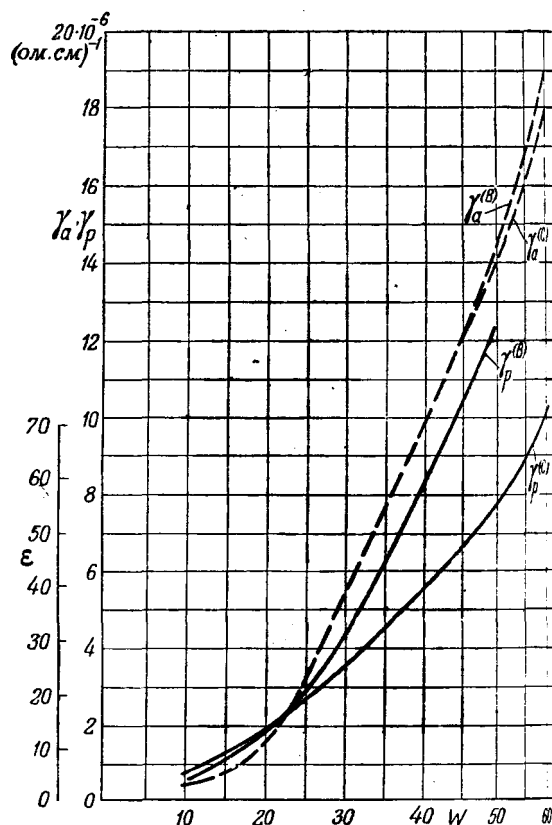


Рис. 4. То же, что на рис. 3 (для осей В и С), но для температуры $90-100^\circ\text{C}$. Частота $f = 250 \text{ кГц}$ ($\epsilon = 7,16 \cdot 10^6 \gamma_p$).

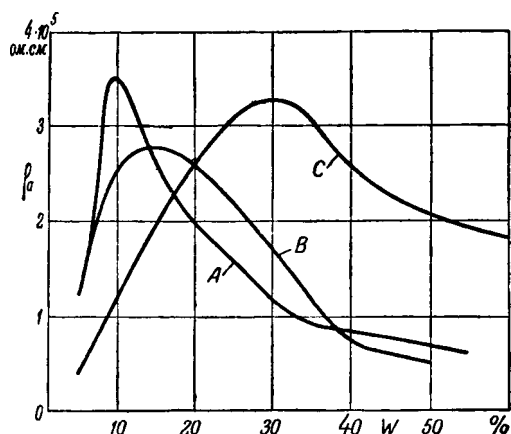


Рис. 5. Зависимость удельного активного сопротивления ρ_a в направлении трех осей анизотропии A, B и C от w для древесины березы. Температура $15-17^\circ\text{C}$. Частота $f = 250$ кГц.

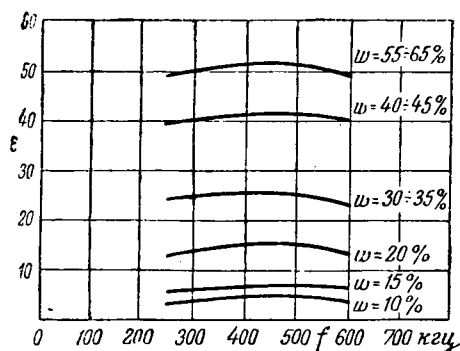


Рис. 6. Зависимость ϵ сосны от частоты f для различных значений влажности w . Температура $15-17^\circ\text{C}$.

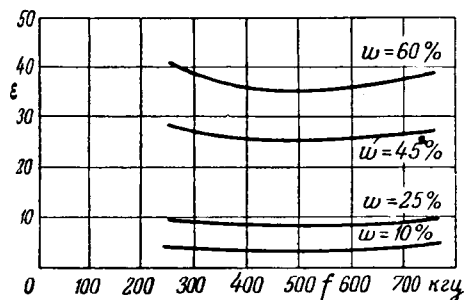


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для березы. Температура $15-17^\circ\text{C}$.

Если предположить, что зависимость γ_a и γ_p влажности линейна, то легко показать, что она имеет максимум при значениях $\lg \delta < 0$, т. е. слева от точки пересечения кривых γ_p .

Исследование влияния частоты на электрические характеристики березы, сосны и ели (рис. 6-7) позволяет считать для средневолнового диапазона диэлектрическую проницаемость практически, не зависящей от частоты. Активная проводимость возрастает с частотой и особенно быстро при влажностях, близких к точке сгнивания волокон. При возрастании частоты в иза активная проводимость хвойных пород растет на $50-60\%$, а березы на $40-45\%$ (рис. 8-9).

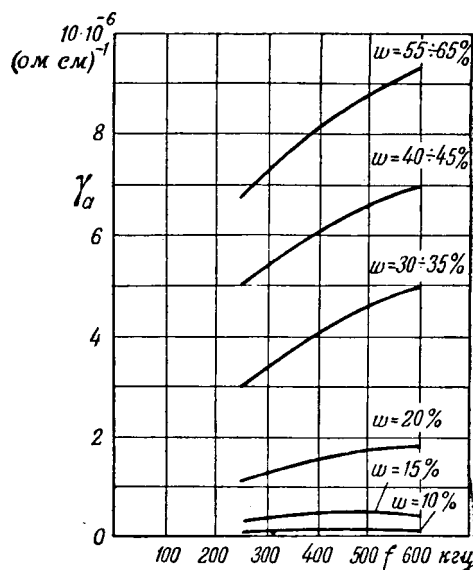


Рис. 8. Зависимость γ_a сосны от частоты f для различных значений влажности w . Температура $15-17^\circ\text{C}$.

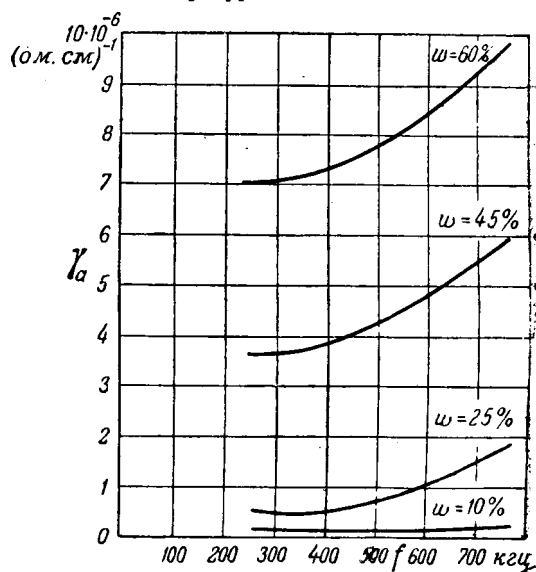


Рис. 9. То же, что на рис. 8, для березы. Температура $15-17^\circ\text{C}$.

В условиях производственной сушки при расчете необходимо учитывать переходные параметры сетчатых электродов для заданного давления на электроды

$$R_{эл} = \frac{R_s}{(1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2) sn};$$

$$X_{эл} = \frac{\omega C_s R_s^2}{(1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2) sn};$$

здесь C_s и R_s — эквивалентные емкость и сопротивление единицы поверхности электродов, определенные экспериментально в зависимости от приложенного к электродам давления (рис. 10); S — поверхность электрода в см^2 ; n — количество пар поверхностей электрода соприкосновения электродов с древесиной.

Необходимо следить за поддержанием постоянным принятого давления на электроды во время

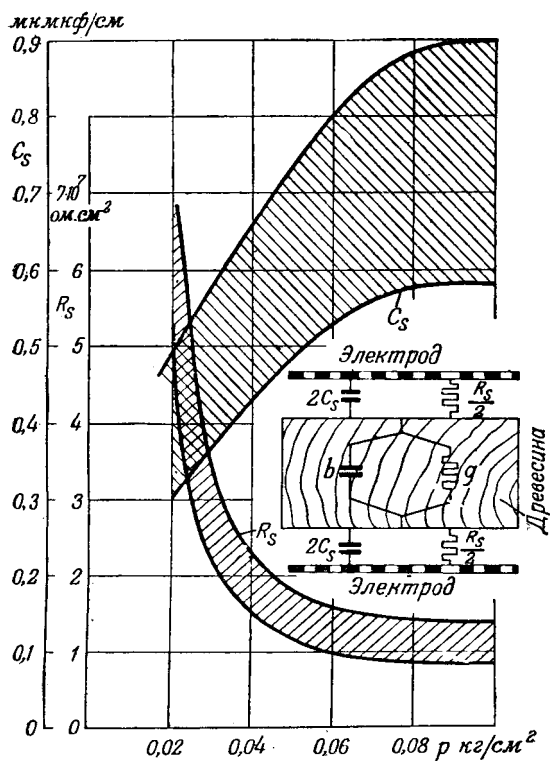


Рис. 10. Зависимость переходной емкости C_s и сопротивления R_s на 1 см^2 поверхности электродной сетки от давления p . Сетка из латунной проволоки диаметром $0,4 \text{ мм}$ с ячейкой $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

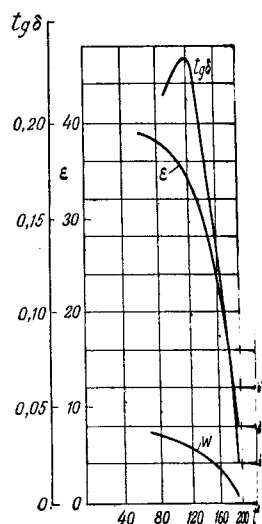
сушки. Наличие воздушных зазоров между электродом и древесиной меняет расчетные параметры штабеля древесины и может служить источником для ряда неприятных моментов в процессе сушки.

Суспензированный ацид. Ацид, изготовляемый из волокнистого асбеста и портланд-цемента, относится к группе неорганических диэлектриков и применяется в качестве листового материала в электропромышленности. Ацид имеет высокие механические свойства и нагревостойкость, но весьма гигроскопичен.

С целью повышения гидрофобности и увеличения электроизоляционных свойств ацида в число компонентов этого диэлектрика в процессе его производства вводится каменноугольный пек. Такой ацид называется суспензированным.

Применение высокой частоты для тепловой обработки суспензированного ацида, предложенное инж. Е. П. Китаевым и А. С. Алтунджи, поставило задачу изучения характера изменений электрических параметров материала в процессе термообработки. Такая обработка суспензированного ацида состоит из двух периодов: первого, в течение которого осуществляется удаление влаги из материала (при подъеме температуры $118\text{--}120^\circ \text{C}$), и второго, в течение которого происходит плавление пека (температура до $160\text{--}180^\circ \text{C}$). На рис. 11 приведено изменение диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\text{tg } \delta$ суспензированного ацида во время тепловой обработки.

Рис. 11. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла потерь $\text{tg } \delta$ при переменной влажности w в функции температуры t в процессе термообработки суспензированного ацида. Частота $f = 665 \text{ кгц}$.



Частота в средневолновом диапазоне не сильно влияет на ϵ , особенно при малой влажности материала.

Высокие значения коэффициента потерь $\text{tg } \delta$ в период разогрева являются благоприятным фактором для нагрева материала токами высокой частоты.

Текстиль. Исследование электрических характеристик грубошерстных сукон проводилось в широком диапазоне влажностей и показало существенно невысокие значения диэлектрической проницаемости и угла потерь даже при больших влажностях. Так, при влажности 130% $\text{tg } \delta = 12,5$. Диэлектрическая проницаемость ϵ душно-сухого сукна равна $1,3\text{--}1,4$.

Диэлектрическая проницаемость воздушной хлопчатобумажной ткани равна $1,8$. С повышением влажности значения составляющих комплексной удельной проводимости хлопчатобумажной ткани

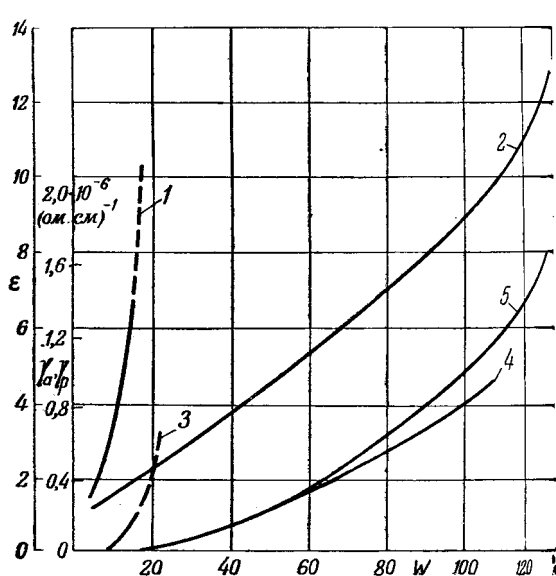


Рис. 12. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ и удельных активной γ_a и реактивной γ_r проводимости текстильных материалов от влажности w .

1 — γ_r и ϵ хлопчатобумажной ткани при $f = 375 \text{ кгц}$; 2 — γ_r и ϵ шерстного сукна при $f = 375 \text{ кгц}$; 3 — γ_a хлопчатобумажной ткани при $f = 375 \text{ кгц}$; 4 — γ_a грубошерстного сукна при $f = 375 \text{ кгц}$; 5 — γ_a шерстного сукна при $f = 500 \text{ кгц}$.

бумажных тканей возрастают очень круто, достигая весьма больших значений (рис. 12).

Выводы. Полученные в работе графики могут быть применены при расчете генераторов для высокочастотного нагрева исследованных материалов, оценки распределения температур в неоднородных (например, слоистых) материалах в процессе сушки, контроля режима работы установки и наблюдения за влажностью материала в процессе сушки.

При расчете штабеля нагрузки, подлежащего обработке токами высокой частоты, следует учитывать влияние переходных емкостей и сопротивлений сетчатых электродов. Особенно велико влияние переходных параметров при больших влажностях дерева и при понижении давления ниже 400 кг на 1 м² электродной сетки.

Литература

1. В. Н. Иванов. Радиосвязь, стр. 3, № 5, 1937.
2. А. В. Нетушил, И. В. Корзун. Измерение электрических характеристик полупроводников методом замещения. Электричество, стр. 69, № 2, 1949.
3. А. В. Нетушил и Б. А. Гольдблатт. Высоко-частотная сушка и пропитка древесины. Электричество, стр. 12, № 4, 1948.
4. С. И. Ванин. Древесиноведение. Гослестехиздат, 1949.
5. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридрих. Высокочастотные неорганические диэлектрики. Изд-во „Советское радио“, 1948.
6. К. П. Семеновский. Строительная промышленность, № 1, 1948.
7. Ю. В. Корицкий и Б. М. Тареев. (Ред.). Справочник по электрической изоляции, Госэнергоиздат 1948.

[22. 6. 1949]



Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока

Кандидат техн. наук, доц. М. И. АЛЯБЬЕВ

Академия им. Крылова

Описание и результаты опыта. Для заданного тока в якоре I_a и скорости вращения n при различных степенях ускорения и замедления коммутации можно определить из опыта м. д. с.

реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока следующим образом.

Собирается схема по рис. 1. Вспомогательная машина J_2 , сидящая на одном валу с испытуемой J_1 , может быть по мощности в 3—5 раз меньше испытуемой.

Запускают испытуемую машину поочередно в двигательном и в генераторном режимах, поддерживая в обоих режимах одинаковыми и постоянными скорость вращения n , ток в якоре I_a и ток возбуждения i . В машинах без добавочных полюсов значения скорости n и токов i и i выбираются те, при которых можно определить м. д. с. реакции коммутационных токов. При наличии добавочных полюсов м. д. с. реакции коммутационных токов практически не зависит от величины главного поля и потому для тока возбуждения можно брать пониженные значения, соответствующие прямой части характеристики холостого хода, что повышает точность опыта и уменьшает потребляемую при опыте мощность.

Изменяя ток подпитки i_d , снимают кривые $i_d = f(i_d)$ и $U_d = f(i_d)$ — зависимости напряже-

Излагается метод опытного определения м. д. с. реакции коммутационных токов по данным генераторного и двигательного режимов, в которых соответственно одинаковы токи в добавочных полюсах, в якоре и в обмотке возбуждения. Скорости вращения в обоих режимах одинаковы только по величине, а по направлению противоположны. Описываются способы уточнения методов, изложенных автором ранее [Л. 2].

ний на якоре соответственно в генераторном и двигательном режимах от тока подпитки.

При обработке данных опыта следует вычислять значения э. д. с. E_d и E_2 соответственно в дви-

гательном и генераторном режимах по формулам

$$E_d = U_d - (I_a R_a + 2\Delta U), \quad (1)$$

$$E_2 = U_2 + (I_a R_a + 2\Delta U), \quad (2)$$

где $I_a R_a + 2\Delta U$ — падение напряжения в цепи якоря. Строят кривые $E_d = f(i_d)$ и $E_2 = f(i_d)$ (рис. 2). Точка пересечения этих кривых a , как это будет доказано ниже, определяет ток подпитки $i_{d,n}$, при котором реакция коммутационных токов равна нулю, а коммутация прямолинейна.

По характеристике холостого хода для каждого значения э. д. с. генераторного и двигательного режимов находят результирующие м. д. с. соответственно $F_{p,2}$ и $F_{p,d}$ и строят их в виде кривых (рис. 3) в функции тока подпитки. Вертикальные отрезки bc между кривыми (рис. 3) в масштабе ординат равны удвоенному значению м. д. с. реакции коммутационных токов F_k или

$$F_k = \frac{bc}{2} = \frac{F_{p,2} - F_{p,d}}{2}. \quad (3)$$

Докажем это положение. Электродвижущие силы в генераторном и двигательном режимах

машине коммутация не ускоренная, как это допущено при написании формулы (4) и (5), замедленная.

Из формул (9) и рис. 3 очевидна справедливость формулы (3).

Из (9) следует, что F_k будет равна нулю $F_{p,2} = F_{p,0}$ и, следовательно, при $E_z = E_0$, т. е. в точке a пересечения кривых E_z и E_0 (рис. 2).

Для определения F_k или i_k при одном каком-либо значении тока подпитки, например при нуле подпитки, равно нулю, нет необходимости построения кривых рис. 2 и 3, а достаточно привести при этом токе подпитки два отсчета показаний приборов — один при генераторном, другой при двигательном режиме. Затем, определив э. д. с. и результирующие м. д. с., вычитать по формуле (9) или (10) значения F_k и i_k .

Применение метода. Изложенный метод применим не только для машин смешанного возбуждения, но также для шунтовых машин и серийных двигателей. В последнем случае характеристика холостого хода снимается при независимом питании обмотки возбуждения, а двигательный и генераторный режимы могут быть выполнены как при независимом, так и при последовательном с якорем включении серийной обмотки. При этом в уравнениях (4) и (5) не будет отсутствовать член F , окончательные же формулы (9) и (10) для F_k и i_k не изменятся.

Описанный метод пригоден для машин с компенсационной и без компенсационной обмотки, добавочными и без добавочных полюсов, при любом допустимом по условиям искрения положении щеток.

Недостатком метода является необходимость тщательного и точного замера всех величин, входящих в расчет, включая падение напряжения в переходном контакте щеток $2\Delta U$ и сопротивление цепи якоря R_a при температуре опыта. В статье автора [Л. 2] изложены достаточно простые и наглядные способы определения м. д. с. реакции коммутационных токов, основанные, однако, на довольно грубом допущении, что при нуле подпитки $i_{d,n}$, соответствующем кривой, проходящей по середине безыскровой зоны, коммутация прямолинейна и реакция коммутационных токов равна нулю. Можно эти способы применить, определив изложенным выше мето-

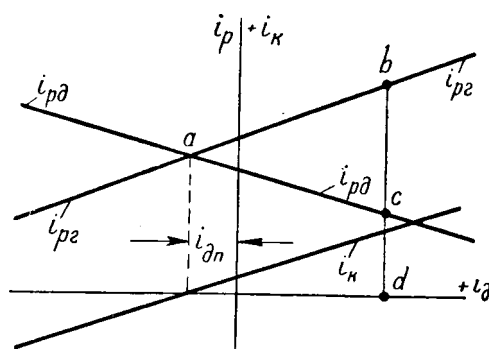


Рис. 3.

дом при токе подпитки $i_{d,n}$ м. д. с. реакции коммутационных токов $F_{k,n}$ или $i_{k,n}$.

При этом в первых двух методах статьи [Л. 2] прямая b_2c_2 (рис. 3*) должна быть проведена выше на величину, соответствующую $i_{k,n}$, а та же прямая в способе 3 на рис. 6* должна быть проведена на тот же отрезок ниже. При способе четвертом прямая должна быть проведена ниже на величину $i_{k,n}$, кривая $i_k = f(i_d)$ (рис. 9*).

Закключение. Достоинство предложенного метода заключается в том, что при его доказательстве не сделано каких-либо грубых допущений, поэтому он достаточно точен. Кроме того, этот метод прост по выполнению и обработке и не требует знания обмоточных данных машины. Он может быть использован для экспериментального исследования влияния различных параметров машины на реакцию коммутационных токов, для проверки и уточнения существующих многочисленных методов расчетного определения м. д. с. реакции коммутационных токов и при регулировании добавочных полюсов для нахождения тока подпитки, соответствующего прямолинейной коммутации.

Литература

1. В. Т. Касьянов. Регулировка дополнительных полюсов машин постоянного тока. Электричество, № 20, 1934 и № 1, 1935.
2. М. И. Алябьев. Определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока. Электричество, № 4, 1949.
3. В. Т. Касьянов. Реакция якоря машин постоянного тока. ВЭП, № 2, 1940.

[8.10. 1949]

* Цитированной статьи.



Исследование асинхронного двигателя с ротором в виде полого цилиндра

Кандидат техн. наук Е. М. ЛОПУХИНА

Московский энергетический институт им. Молотова

Асинхронные микро-двигатели с ротором в виде полого немагнитного цилиндра получили большое распространение в следящих системах, счетно-решающих приборах, а также в качестве приводных двигателей в диапазоне мощностей от сотых долей ватта до десятков ватт. Принципиальная схема устройства двигателя приведена на рис. 1. Магнитная система машины состоит из внешнего 1 и внутреннего 3 статора. Ротор 2 выполнен в виде полого тонкостенного цилиндра из легкого немагнитного материала — алюминия или дюралюминия. Машина чаще всего выполняется двухфазной.

Микродвигатели такого исполнения обладают минимальной инерционностью, высокими пусковыми свойствами, механической характеристикой, приближающейся к прямолинейной, плавным и бесшумным ходом.

Для изучения процессов, происходящих в машине, производится аналитическое исследование идеализированной системы, изображенной на рис. 2.

Постановка задачи. Основные уравнения. Цель аналитического исследования — рассмотреть электромагнитные поля в цилиндре и воздушных зазорах машины, изучить закон распределения вихревых токов в цилиндре, найти потери в цилиндре и определить момент вращения машины.

Для решения поставленной задачи исследуем плоскую систему (рис. 2), состоящую из двух ферромагнитных поверхностей: 1 — поверхности наружного статора и 3 — поверхности внутреннего статора и немагнитной плиты 2 толщиной δ , представляющей развертку цилиндра ротора.

Принимаются следующие допущения:

1) Кривизна поверхности статора и ротора настолько мала по сравнению с длиной воздушного зазора, что цилиндрические поверхности можно заменить плоскостями.

Исследуется распределение вихревых токов в цилиндре, потери в цилиндре, магнитные поля в воздушных зазорах и в цилиндре для идеализированной системы. Полученные выражения применены к расчету асинхронного двигателя с полым немагнитным ротором.

2) Влияние краев учитывается и рассматривается двухмерное поле, параллельное плоскости x, z (рис. 2).

3) Обмотка статора рассматривается в виде токового слоя бесконечно тонкого, расположенного на поверхности статора. Ток статора направлен по оси y . Наличие пазов в статоре учитывается эквивалентным зазором δ_1 .

4) Магнитная проницаемость стали принимается равной $\mu = \infty$.

5) Распределение статорного тока и, следовательно, и линейной нагрузки статора принимается в виде периодической функции:

$$\Delta = \Delta_0 e^{j\omega t} \cos \nu x,$$

где Δ_0 — линейная нагрузка в $a/\text{см}$; $\nu = \frac{\pi}{\tau}$.

Рассматривается стоячая волна тока статора и учитывается только первая гармоническая. Исследуемая система разбивается на три области: I и III — области воздушных зазоров δ_1 , δ_2 ; II — область, занятую плитой из немагнитного материала, в которой наводятся вихревые токи плотностью i .

Пренебрегая токами смещения в каждой области и вводя потенциальную векторную функцию, определяющую поле в токовых и немагнитных областях, записываем уравнение Максвелла.

Для областей I и III

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = 0; E = -\nu_0 \frac{\partial A}{\partial t};$$

для области II

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -i; E = -\nu_0 \frac{\partial A}{\partial t},$$

где A — потенциальная векторная функция; E — напряженность электрического поля в в/см ;

$$\nu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \mu.$$

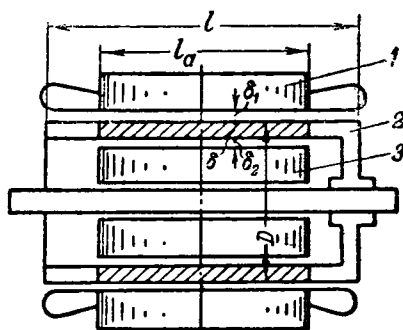


Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема двигателя.

В соответствии с изменением линейной нагрузки статора $\dot{A} = \dot{A}_0 e^{j\omega t} \cos vx$. Потенциальная векторная функция будет также гармонической функцией во времени и пространстве:

$$\dot{A} = f(z) e^{j\omega t} \cos vx. \quad (3)$$

Учитывая, что плотность вихревого тока в цилиндре

$$i = E\gamma, \quad (4)$$

где γ — проводимость плиты в $\frac{1}{\text{ом}\cdot\text{см}}$, получаем исходные дифференциальные уравнения для исследуемых областей:

для области I и III

$$\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2} - v^2 f(z) = 0, \quad (5)$$

для области II

$$\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2} - v^2 f(z) = j\mu_0 \omega \gamma f(z). \quad (6)$$

Решая эти уравнения, получаем выражения для потенциальных векторных функций во всех трех областях:

$$\dot{A}_I = \frac{H_0 [v \operatorname{ch} v(z - \delta_1) \operatorname{ch} \xi \delta - \xi \operatorname{sh} v(z - \delta_1) \operatorname{sh} \xi \delta] e^{j\omega t} \cos vx}{v [\operatorname{sh} v \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} v \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta]}, \quad (7)$$

$$\dot{A}_{II} = \frac{H_0 \operatorname{ch} \xi(z - \delta_1 - \delta) e^{j\omega t} \cos vx}{v \operatorname{sh} v \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} v \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta}, \quad (8)$$

$$\dot{A}_{III} = -\frac{2 \cdot H_0 \xi [e^{v(z - \delta_1 - \delta)} + e^{2v\delta_2} e^{-v(z - \delta_1 - \delta)}] e^{j\omega t} \cos vx}{v \operatorname{sh} v \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} v \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta}, \quad (9)$$

где H_0 — максимальное значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности внешнего статора:

$$\xi = \sqrt{v^2 + j\mu_0 \omega \gamma}.$$

По значению потенциальных векторных функций находим плотность вихревых токов в цилиндре, потери в цилиндре и исследуем поля во всех областях.

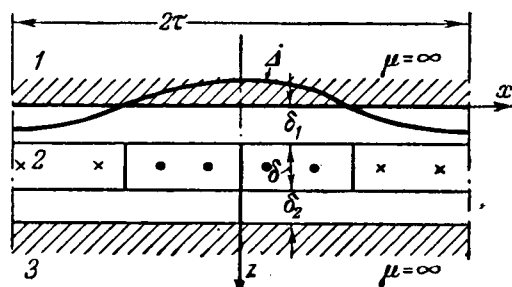


Рис. 2.

Вихревые токи и магнитное поле в немагнитном полем цилиндре. Плотность вихревых токов в цилиндре

$$i = -\mu_0 \gamma \frac{\partial \dot{A}_{II}}{\partial z} = -\frac{j\mu_0 \omega \gamma H_0 \operatorname{ch} \xi(z - \delta_1 - \delta) e^{j\omega t} \cos vx}{v \operatorname{sh} v \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} v \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta}. \quad (10)$$

Полученный комплекс плотности вихревого тока временный и может быть представлен, как (рис. 3):

$$i = -i_0 e^{j(\omega t + \beta)} \cos vx,$$

где β — характеризует временный сдвиг вектора плотности тока в функции от координаты z . Таким образом, при синусоидальном распределении тока статора вдоль окружности машины в роторе наводится синусоидальный вихревой ток, смещенный во времени по отношению к статорному току. Квадрат эффективного значения плотности тока $i_{эф}^2 = \frac{i \cdot \hat{i}}{2}$, где $\hat{i}$ — сопряженный комплекс плотности тока.

Переходя от комплексных аргументов гиперболических функций к действительным аргументам подстановкой $\xi = \varphi + j\psi$, получаем:

$$i_{эф}^2 = \frac{\mu_0^2 \omega^2 \gamma^2 H_0^2 [\operatorname{ch} 2\varphi(z - \delta_1 - \delta) + \cos 2\psi(z - \delta_1 - \delta)] \cos^2 vx}{Q}, \quad (11)$$

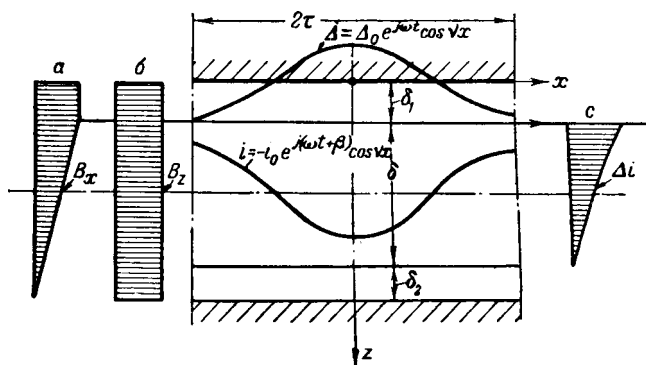


Рис. 3. Распределение индукции в воздушном зазоре и увеличение плотности вихревого тока по толщине цилиндра.

где

$$Q = 4 [(\psi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \cos \psi \delta \operatorname{sh} \varphi \delta - \psi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \sin \psi \delta \operatorname{ch} \varphi \delta + \\ + \nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \cos \psi \delta \operatorname{ch} \varphi \delta)^2 + (\psi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \cos \psi \delta \operatorname{sh} \varphi \delta + \\ + \psi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \sin \psi \delta \operatorname{ch} \varphi \delta + \nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \sin \psi \delta \operatorname{sh} \varphi \delta)^2].$$

Упрощенное выражение¹ для Q :

$$Q = 4[(\varphi \cos \psi \delta \operatorname{sh} \varphi \delta - \psi \sin \psi \delta \operatorname{ch} \varphi \delta + \\ + \nu^2 \delta_1 \cos \psi \delta \operatorname{ch} \varphi \delta)^2 + (\psi \cos \psi \delta \operatorname{sh} \varphi \delta + \varphi \sin \psi \delta \operatorname{ch} \varphi \delta + \\ + \nu^2 \delta_1 \sin \psi \delta \operatorname{sh} \varphi \delta)^2].$$

Изменение эффективной плотности тока по толщине стенки цилиндра определяется отношением:

$$k_1 = \frac{i_{\varphi \delta z}}{i_{\varphi \delta z = \delta_1 + \delta}} = \\ = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\varphi(z - \delta_1 - \delta) + \cos 2\psi(z - \delta_1 - \delta)}{2}}, \quad (12)$$

показывающим, во сколько раз плотность тока в любой точке (z) превышает плотность тока на внутренней поверхности цилиндра ($z = \delta_1 + \delta$). Этот коэффициент служит для оценки эффекта вытеснения вихревого тока по толщине стенки цилиндра.

Плотность тока в любой точке стенки цилиндра

$$i_{\varphi \delta z} = k_1 i_{\varphi \delta z = \delta_1 + \delta}. \quad (13)$$

Для определения потерь в цилиндре находим поток вектора мощности, отнесенный к единице поверхности (в плоскости xu), т. е. вектор Умова-Пойтинга:

$$p = [EH].$$

Для плоского поля

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_z^2},$$

где $p_x = H_z E_y$ и $p_z = H_x E_y$

—слагающие вектора плотности потока мощности по осям x и z .

Так как магнитное и электрическое поля во времени синусоидальны, то выражения для слагающих вектора плотности потока мощности примут вид:

$$\dot{p}_x = -\frac{\hat{H}_z \dot{E}_y}{2}; \quad \dot{p}_z = \frac{\hat{H}_x \dot{E}_y}{2}, \quad (14)$$

где $\hat{H}_z$ и $\hat{H}_x$ —соответственно, сопряженные значения для напряженности магнитного поля $\hat{H}_z$ и $\hat{H}_x$; $\dot{E}_y$ —напряженность электрического поля. В соответствии с выражениями для $\hat{H}_z$, $\hat{H}_x$ и $\dot{E}_y$ найденными через потенциальную векторную функцию $\dot{A}_{II}$, получим:

$$\dot{p}_x = -\frac{j\mu_0 \nu \omega H_0^2 [\cos^2 \psi (z - \delta_1 - \delta) + \operatorname{sh}^2 \varphi (z^2 - \delta_1 - \delta)] \sin 2\nu x}{Q} \quad (15)$$

¹ Для большинства практических случаев $\nu \delta_1 < 0,1$, и можно принять $\operatorname{ch} \nu \delta_1 = 1$; $\operatorname{sh} \nu \delta_1 = \nu \delta_1$.

Выражение $\dot{p}_x$ представляет плотность потока реактивной мощности, которая определяется периодичностью магнитного поля в пространстве. За полную длину волны 2τ среднее значение этой мощности равно нулю:

$$\dot{p}_z = -\frac{\mu_0 \omega H_0^2 \{ [\psi \operatorname{sh} 2\varphi (z - \delta_1 - \delta) + \varphi \sin 2\psi (z - \delta_1 - \delta)] + \\ + j[\varphi \operatorname{sh} 2\varphi (z - \delta_1 - \delta) - \psi \sin 2\psi (z - \delta_1 - \delta)] \} \cos^2 \nu x}{Q} \quad (16)$$

Действительная часть комплекса $\dot{p}_z$ при $z = \delta_1$ дает величину активных потерь на единицу поверхности цилиндра:

$$p_a = \frac{\mu_0 \omega H_0^2 [\psi \operatorname{sh} 2\varphi \delta + \varphi \sin 2\psi \delta] \cos^2 \nu x}{Q}.$$

Средние потери (вт/см^2) за полную длину волны 2τ :

$$p_a = \frac{\mu_0 \omega H_0^2 [\psi \operatorname{sh} 2\varphi \delta + \varphi \sin 2\psi \delta]}{Q}. \quad (17)$$

Мнимая часть комплекса $\dot{p}_z$ соответствует реактивной мощности, приходящейся на единицу поверхности цилиндра p_r , ее среднее значение (вт/см^2) за полную длину волны:

$$p_r = \frac{\mu_0 \omega H_0^2 [\varphi \operatorname{sh} 2\varphi \delta - \psi \sin 2\psi \delta]}{Q}. \quad (18)$$

Составляющие индукции по оси x и z можно определить как

$$\dot{B}_x = \mu_0 \frac{\partial \dot{A}}{\partial z}; \quad \dot{B}_z = -\mu_0 \frac{\partial \dot{A}}{\partial x}.$$

Соответственно для I, II, III областей тангенциальные составляющие индукции:

$$B_{xI} = \frac{\mu_0 H_0 [\nu \operatorname{sh} \nu (z - \delta_1) \operatorname{ch} \xi \delta - \xi \operatorname{ch} \nu (z - \delta_1) \operatorname{sh} \xi \delta] e^{j\omega t} \cos \nu x}{\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta}. \quad (19)$$

Обозначим через

$$F = \nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta,$$

$$\dot{B}_{xII} = \frac{\mu_0 H_0 \xi \operatorname{sh} \xi (z - \delta_1 - \delta) e^{j\omega t} \cos \nu x}{F}, \quad (20)$$

$$\dot{B}_{xIII} = \frac{\mu_0 H_0 \nu [e^{\nu(z - \delta_1 - \delta)} - e^{2\nu \delta_2} e^{-\nu(z - \delta_1 - \delta)}] e^{j\omega t} \cos \nu x}{2F}. \quad (21)$$

Нормальные составляющие индукции:

$$\dot{B}_{zI} = \frac{\mu_0 H_0 [\nu \operatorname{ch} \nu (z - \delta_1) \operatorname{ch} \xi \delta - \\ - \xi \operatorname{sh} \nu (z - \delta_1) \operatorname{sh} \xi \delta] e^{j\omega t} \sin \nu x}{F}, \quad (22)$$

$$\dot{B}_{zII} = \frac{\mu_0 H_0 \operatorname{ch} \xi (z - \delta_1 - \delta) e^{j\omega t} \sin \nu x}{F}, \quad (23)$$

$$\dot{B}_{zIII} = \frac{\mu_0 H_0 \nu [e^{\nu(z - \delta_1 - \delta)} + e^{2\nu \delta_2} e^{-\nu(z - \delta_1 - \delta)}] e^{j\omega t} \sin \nu x}{2F}. \quad (24)$$

Расчет асинхронной машины с ротором в виде полого немагнитного цилиндра. Вышеприведенные формулы для плотности вихревого тока, потерь в цилиндре и индукции были получены для стоячей волны тока статора (пульсирующее поле). При бегущей волне тока статора (вращающееся поле) потери в цилиндре будут в 2 раза больше, чем при стоячей волне. Эффективное значение плотности тока и составляющих индукции по осям x и z , следовательно, должны быть увеличены в $\sqrt{2}$.

Действительно, при равенстве амплитудных значений тангенциальной составляющей индукции на поверхности статора B_0 потери за период на двойном полюсном делении при вращающемся поле относятся к потерям при пульсирующем поле, как:

$$\frac{P_a'}{P_a} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B_0^2 \cos^2(\omega t - \alpha) dt d\alpha}{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B_0^2 \cos^2 \omega t \sin^2 \alpha dt d\alpha} = 2;$$

в этом выражении

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \alpha = \frac{\pi}{\tau} x.$$

Таким образом выведенные выше формулы с введением соответствующих коэффициентов для вращающегося поля могут быть применены к расчету двигателей с ротором в виде полого цилиндра, у которого длина цилиндра значительно больше длины стали статора.

Для такой машины можно допустить, что токи в активной части цилиндра (по длине статора, см. заштрихованную часть рис. 2) направлены по оси y и замыкаются в частях цилиндра, выступающих за сталь статора. Пренебрегая влиянием краев машины, можно вести расчет активной части цилиндра.

Полагая известными геометрические размеры машины, обмоточные данные статора, свойства материала и максимальное значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности стали статора, равное линейной нагрузке статора ($H_0 = \Delta_0$), рассчитываем поля во всех областях, плотность вихревого тока в цилиндре, потери в цилиндре, активное приведенное сопротивление и момент вращения машины.

Расчет магнитных полей производим по формулам (9) — (24), умноженным на $\sqrt{2}$.

На рис. 3 изображена плоская развертка асинхронного двигателя с ротором в виде полого цилиндра на двойном полюсном делении. Там же показан полученный на конкретной машине характер зависимости амплитудных значений нормальной (рис. 3,б) и тангенциальной (рис. 3,а) составляющих магнитной индукции функции координаты z в суммарном зазоре машины $\delta_1 + \delta + \delta_2$ для координаты $x = \text{const}$. Кривая

рис. 3,а соответствует координате $x = 0$; рис. 3,б $x = \frac{\tau}{2}$. В обоих случаях, соответственно, имеется

одна из составляющих магнитной индукции.

Из приведенных кривых видно, что нормальная составляющая индукции практически остается постоянной во всем зазоре. Тангенциальная составляющая индукции изменяется от максимума на границе наружного статора с областью I до нуля на границе области III с внутренним статором. В интервале от $z = \delta_1$ до $z = \delta_1 + \delta$ закон ее изменения близок к прямолинейному. Вихревой ток в цилиндре синусоидально распределен вдоль оси x (рис. 3). Численное значение квадрата эффективной плотности тока может быть получено из формулы (11), умноженной на $\sqrt{2}$.

На рис. 3,с изображен характер нарастания плотности вихревого тока $\Delta i = i_{\text{эф}z} - i_{\text{эф}z} = \delta_1 + \delta$ по толщине стенки цилиндра.

Потери в цилиндре могут быть найдены, как:

$$P_a = \frac{\mu_0 \omega H_0^2 (\psi \operatorname{sh} 2\varphi\delta + \varphi \sin 2\psi\delta) \pi D l_a}{Q} [\text{вт}]. \quad (25)$$

Пусковой момент двигателя, выраженный через потери в цилиндре:

$$M = \frac{P_a \cdot p \cdot 10^5}{9,81 \cdot \omega} [z. \text{ см}], \quad (26)$$

где p — число пар полюсов;

ω — угловая скорость вращения поля.

Для некоторых практических случаев аргументы тригонометрических и гиперболических функций столь малы, что можно принять косинусы равными единице, а синусы — их аргументам. Тогда упрощенное выражение для пускового момента примет вид²:

$$M = \frac{\pi \cdot \mu_0 H_0^2 D l_a p \varphi \psi \delta \cdot 10^5}{9,81 [(\varphi^2 \delta^2 - \psi^2 \delta^2 + \psi^2 \delta^2) + 4 \cdot \varphi^2 \psi^2 \delta^2]}. \quad (27)$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление ротора определится по формуле:

$$R_2' = \frac{4 \cdot m_1 \omega_1^2 k_w^2 l_a (\varphi^2 + \psi^2) (\psi \operatorname{sh} 2\varphi\delta + \varphi \sin 2\psi\delta)}{\pi D \mu_0 \omega^2 (\operatorname{ch} 2\varphi\delta - \cos 2\psi\delta)}, \quad (28)$$

где D — диаметр цилиндра;

l_a — длина активной части цилиндра;

m_1 — число фаз статора;

ω_1 — число витков в фазе статора;

k_w — обмоточный коэффициент обмотки статора.

Увеличение сопротивления цилиндра на переменном токе по сравнению с его значением на постоянном токе вследствие вытеснения вихревого тока по толщине стенки цилиндра учитывается коэффициентом k_2 :

$$k_2 = \frac{(\varphi^2 + \psi^2) \delta (\psi \operatorname{sh} 2\varphi\delta + \varphi \sin 2\psi\delta)}{\mu_0 \omega^2 (\operatorname{ch} 2\varphi\delta - \cos 2\psi\delta)}. \quad (29)$$

² Членом $\psi^2 \delta_1 \varphi \psi \delta^2$ в знаменателе пренебрегаем, так как он практически мал.

Расчеты, произведенные на конкретных асинхронных двигателях с ротором в виде полого немагнитного цилиндра, по вышеприведенным формулам, позволяют сделать ряд важных выводов:

1. Эффект вытеснения вихревых токов по толщине стенки цилиндра невелик для тонкостенных цилиндров $\delta \ll 1$ мм, применяемых в таких двигателях. Наибольшая разность плотностей тока даже при частоте 500 гц не превосходит 1—1,5%.

2. Двигатели этого типа относятся к асинхронным двигателям с большим сопротивлением ротора, ввиду чего они обладают хорошими пусковыми свойствами и прямолинейностью механической характеристики $M=f(s)$.

3. Магнитное поле во всем зазоре $\delta_1 + \delta_2 + \delta$ в радиальном направлении можно считать постоянным.

При расчете двигателей с ротором в виде полого цилиндра, у которых длина ротора мало превышает длину стали статора или равна ей, нельзя пренебрегать влиянием краевого эффекта.

Такие двигатели могут быть рассчитаны с помощью графо-аналитического метода спиральных диаграмм [Л. 1].

Изложенный в статье метод аналитического исследования может быть использован в ряде других случаев, например при исследовании асинхронных двигателей со слоистыми роторами, в частности для двигателей, имеющих ротор с медным покрытием.

Приложение 1. Вывод основных уравнений и их решение. Исследование системы (рис. 2) производится с помощью уравнений Максвелла. Пренебрегая токами смещения, уравнения Максвелла для каждой области записываем так:

для I области $\delta_1 < x < 0$ и III области $\delta_1 + \delta + \delta_2 < x < \delta_1 + \delta$:

$$\text{rot } \mathbf{H} = 0; \text{div } \mathbf{H} = 0,$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \text{div } \mathbf{E} = 0;$$

для II области $\delta_1 + \delta > x > \delta$:

$$\text{rot } \mathbf{H} = i; \text{div } \mathbf{H} = 0,$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \text{div } \mathbf{E} = 0.$$

В принятой практической системе единиц

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \mu \left[\frac{\text{в.сек}}{\text{а.см}} \right].$$

Для решения уравнения вводим векторно-потенциальную функцию A , свойства которой записываются следующими уравнениями: $\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{H}; \text{div } \mathbf{A} = 0$.

Подставляя эти выражения в уравнения Максвелла и рассматривая двухмерное поле параллельно координатной плоскости xz , получим приведенные выше уравнения:

для областей I и III

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = 0; \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{dA}{dt};$$

для области II

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -i; \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial A}{\partial t};$$

A и E — составляющие векторов $\mathbf{A}$ и $\mathbf{E}$ по оси Y .

Подставляя значение вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E} = \gamma i$ и потенциальной векторной функ-

ции $\dot{A} = f(z) e^{j\omega t} \cos \gamma x$, получаем дифференциальные уравнения системы:

для областей I и III

$$\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2} - \gamma^2 f(z) = 0;$$

для области II

$$\frac{\partial^2 f(z)}{\partial z^2} - \gamma^2 f(z) = j\mu_0 \omega \gamma f(z).$$

Решения дифференциальных уравнений:

для I области

$$f(z) = k_1 e^{\gamma z} + k_2 e^{-\gamma z};$$

для III области

$$f(z) = n_1 e^{\gamma z} + n_2 e^{-\gamma z};$$

для II области

$$f(z) = m_1 e^{\xi z} + m_2 e^{-\xi z}.$$

$$\xi = \sqrt{\gamma^2 + j\mu_0 \omega \gamma} = \sqrt{\gamma^2 + jx^2} = \varphi + j\psi, \gamma = \frac{\pi}{\tau}, x = \sqrt{\mu_0 \omega \gamma};$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{\xi^2 + \gamma^2}{2}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\mu_0^2 \omega^2 \gamma^2 + \frac{\pi^4}{\tau^4} + \frac{\pi^2}{\tau^2}} \right)};$$

$$\psi = \sqrt{\frac{\xi^2 - \gamma^2}{2}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\mu_0^2 \omega^2 \gamma^2 + \frac{\pi^4}{\tau^4} - \frac{\pi^2}{\tau^2}} \right)};$$

$k_1, k_2, n_1, n_2, m_1, m_2$ — постоянные интегрирования.

Полное выражение для потенциальной векторной функции соответственно для I, II и III областей:

$$\dot{A}_I = (k_1 e^{\gamma z} + k_2 e^{-\gamma z}) e^{j\omega t} \cos \gamma x,$$

$$\dot{A}_{II} = (m_1 e^{\xi z} + m_2 e^{-\xi z}) e^{j\omega t} \cos \gamma x;$$

$$\dot{A}_{III} = (n_1 e^{\gamma z} + n_2 e^{-\gamma z}) e^{j\omega t} \cos \gamma x.$$

Для определения постоянных интегрирования пользуемся граничными условиями:

а) Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности стали статора из-за наличия токового слоя претерпевает скачок при $x = -0$ до H_x при $x = +0$

$$H_{x+0} = H_0 e^{j\omega t} \cos \gamma x,$$

где $H_0 = \Delta_0$;

H_0 — максимальное значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности стали статора;

Δ_0 — линейная нагрузка статора, а/см.

б) Непрерывность тангенциальных составляющих напряженности магнитного поля и нормальных составляющих индукции на границах между областями I и II, II и III.

в) Равенство нулю тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности внутреннего статора.

Эти граничные условия дают уравнения для определения постоянных интегрирования:

$$k_1 - k_2 = -\frac{H_0}{\gamma},$$

$$\gamma (k_1 e^{\gamma \delta_1} - k_2 e^{-\gamma \delta_1}) = \xi (m_1 e^{\xi \delta_1} - m_2 e^{-\xi \delta_1})$$

$$k_1 e^{\gamma \delta_1} + k_2 e^{-\gamma \delta_1} = m_1 e^{\xi \delta_1} + m_2 e^{-\xi \delta_1},$$

$$\xi (m_1 e^{\xi (\delta_1 + \delta)} - m_2 e^{-\xi (\delta_1 + \delta)}) =$$

$$= \gamma (n_1 e^{\gamma (\delta_1 + \delta)} - n_2 e^{-\gamma (\delta_1 + \delta)}),$$

$$\begin{aligned}
 m_1 e^{\xi(\delta_1 + \delta)} + m_2 e^{-\xi(\delta_1 + \delta)} &= \\
 = n_1 e^{\nu(\delta_1 + \delta)} + n_2 e^{-\nu(\delta_1 + \delta)}, \\
 n_1 e^{\nu(\delta_1 + \delta + \delta_2)} - n_2 e^{-\nu(\delta_1 + \delta + \delta_2)} &= 0.
 \end{aligned}$$

Постоянные интегрирования, найденные из этих уравнений, после соответствующих преобразований определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{H_0 (\nu \operatorname{ch} \xi \delta - \xi \operatorname{sh} \xi \delta) e^{-\nu \delta_1}}{2 \nu (\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta)}, \\
 k_2 &= \frac{H_0 (\nu \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{sh} \xi \delta) e^{\nu \delta_1}}{2 \nu (\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta)}, \\
 m_1 &= \frac{H_0 e^{-\xi(\delta_1 + \delta)}}{2 (\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta)}, \\
 m_2 &= \frac{H_0 e^{\xi(\delta_1 + \delta)}}{2 (\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta)}, \\
 n_1 &= \frac{H_0 e^{-\nu(\delta_1 + \delta)}}{2 (\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta)}, \\
 n_2 &= \frac{H_0 e^{\nu(\delta_1 + \delta + 2\delta_2)}}{2 (\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta)}.
 \end{aligned}$$

Подставляя значения постоянных интегрирования в выражения для потенциальных векторных функций, получим:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{H_0 [\nu \operatorname{ch} \nu (z - \delta_1) \operatorname{ch} \xi \delta - \xi \operatorname{sh} \nu (z - \delta_1) \operatorname{sh} \xi \delta] e^{j\omega t} \cos \nu x}{\nu [\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta]}, \\
 A_{II} &= \frac{H_0 \operatorname{ch} \xi (z - \delta_1 - \delta) e^{j\omega t} \cos \nu x}{\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta}, \\
 &= - \frac{2H_0 \xi [e^{\nu(z - \delta_1 - \delta)} + e^{2\nu\delta_2} e^{-\nu(z - \delta_1 - \delta)}] e^{j\omega t} \cos \nu x}{\nu \operatorname{sh} \nu \delta_1 \operatorname{ch} \xi \delta + \xi \operatorname{ch} \nu \delta_1 \operatorname{sh} \xi \delta}.
 \end{aligned}$$

Приложение 2. Определение потерь в цилиндре
Нахождение приведенного активного сопротивления цилиндра. Активные потери в цилиндре P_a определяются

В выражениях $\dot{A}_I$ и $\dot{A}_{II}$ — $e^{2\nu\delta_2}$ принято равным 1, что справедливо для практически применяемых зазоров и максимально возможного ν .

по значению удельных активных потерь в цилиндре p_a , найденному выше:

$$P_a = p'_a \pi D l_a [\text{см}],$$

p'_a — удельные потери в *ватт/см* при вращающемся поле.
 $p'_a = 2p_a$. Подставляя значение удельных потерь p_a , получаем:

$$P_a = \frac{\mu_0 \omega H_0^2 (\psi \operatorname{sh} 2\varphi \delta + \varphi \sin 2\psi \delta) \pi D l_a}{Q} [\text{см}].$$

Приведенное активное сопротивление цилиндра определяется так:

$$R'_2 = \frac{P_a}{I_2^2} 4m_1 \omega_1^2 k_{w1}^2,$$

где I_2 — ток в цилиндре.

Ток в цилиндре может быть найден в виде комплекса:

$$\begin{aligned}
 i_2 &= \int_{z=\delta_1}^{z=\delta_1+\delta} i \pi D dz = \pi D \int_{z=\delta_1}^{z=\delta_1+\delta} i_{z=\delta_1+\delta} \operatorname{ch} \xi (z - \delta_1 - \delta) dz = \\
 &= \pi D i_{z=\delta_1+\delta} \cdot \frac{\operatorname{sh} \xi \delta}{\xi};
 \end{aligned}$$

модуль этого выражения

$$I_2 = \frac{\pi D \mu_0 \omega \gamma H_0 \sqrt{\operatorname{ch} 2\varphi \delta - \cos 2\psi \delta}}{\sqrt{\varphi^2 + \psi^2} \sqrt{Q}}.$$

Подставляя выражение потерь и тока в цилиндре в формулу для приведенного активного сопротивления цилиндра, получаем:

$$R'_2 = \frac{4m_1 \omega_1^2 k_{w1}^2 (\varphi^2 + \psi^2) (\psi \operatorname{sh} 2\varphi \delta - \varphi \sin 2\psi \delta)}{\pi D \mu_0 \omega \gamma^2 (\operatorname{ch} 2\varphi \delta - \cos 2\psi \delta)}.$$

Литература

1. Е. М. Лопухина. Теоретическое и экспериментальное исследование асинхронных двигателей с ротором в виде полого немагнитного цилиндра. Кандидатская диссертация. МЭИ, 1947.
2. F. Ollendorff, *Potenzialfelder der Elektrotechnik*. Berlin, Springer, 1928.
3. H. Moser. *Geräuschuntersuchungen an elektrischen Maschinen*. SEV, № 12 и № 20, 1935; № 6 и № 7, 1938.

[4.7. 1949]

Новая схема соединений для мощных электрических станций

Инж. Л. И. ДВОСКИН

Теплоэлектропроект

Введение. Возможность сооружения трехфазных трансформаторов мощностью до 60 тыс. кВа в единице при высшем напряжении 220 кВ и накопленный опыт эксплуатации, свидетельствующий об

Освоение производства мощных трехфазных трансформаторов позволяет пересмотреть обычно применяемые схемы соединений. Устанавливая указанные трансформаторы, можно получить значительно более надежное и экономичное решение. Разбирается пример такого рода схемы соединений для крупной электростанции и сравнивается с обычно применяемыми схемами. По статье намечается провести обсуждение.

исключительно высокой степени надежности этих аппаратов, позволяют по-новому выполнять схемы соединений мощных электростанций, что ведет к удешевлению основного оборудования и повышает надежность и удобство эксплуатации.

В нижеприводимых материалах рассматривается новая схема соединений с применением указанных крупнейших трехфазных трансформаторов для одного конкретного примера, а именно: электростанция, на которой устанавливаются шесть турбогенераторов по 50 тыс. кВт с отдачей всей мощности в сеть 220 кВ по трем линиям электропередачи. Принципиальные положения, принятые в этой новой схеме соединений, могут быть распространены и на другие случаи при установке генераторов и трансформаторов иной мощности. В целях сокращения объема материалов вопросы питания собственных нужд электростанций не рассматриваются.

Обычные схемы соединений. Для указанной электростанции обычно рассматриваются следующие варианты схемы соединений. По первому варианту все генераторы объединяются в блоки с повысительными трансформаторами 10/220 кВ, выполненными из групп однофазных трансформаторов с общей мощностью каждой группы 60 тыс. кВа. Каждый такой блок присоединяется к двум системам сборных шин помощью одного выключателя и двух разъединителей. От сборных шин отходят 3 линии электропередачи 220 кВ, аналогичным образом присоединяемые к сборным шинам. Для возможности опробования сборных шин и вывода в ревизию выключателей устанавливается шиносоединительный выключатель.

Эта схема соединений имеет существенные недостатки, а именно:

1. Для того чтобы при повреждении сборных шин не была потеряна вся мощность электростанции, нормально обе системы сборных шин находятся под напряжением, причем к каждой

из них присоединяется половина всех генераторов и линий электропередачи. Но и при таком режиме работы при возникновении аварии на сборных шинах будет место потеря половины

мощности электростанции, а при нечетном числе генераторов или линий электропередачи, когда деление между двумя системами шин не может быть произведено поровну, повреждение на одной из них может привести к потере больше, чем половины мощности электростанции.

2. Деление линий и генераторов между двумя системами шин потребует фиксированного их соединения. При необходимости перевода какой-либо из генераторов или линии с одной системы на другую необходима будет перестройка дифференциальной защиты шин.

3. Операции по ревизии каждой из систем сборных шин и выключателя связаны с значительным количеством переключений шинных разъединителей.

На рис. 1 показан вариант схемы соединений той же электростанции, но с укрупненными трансформаторами мощностью по 120 тыс. кВа в группе. Каждая трансформаторная группа и линия электропередачи присоединяется к сборным шинам помощью двух выключателей. Нормально в работе находятся обе системы шин.

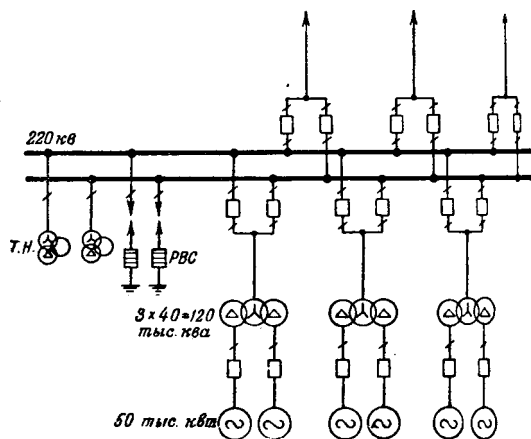


Рис. 1.

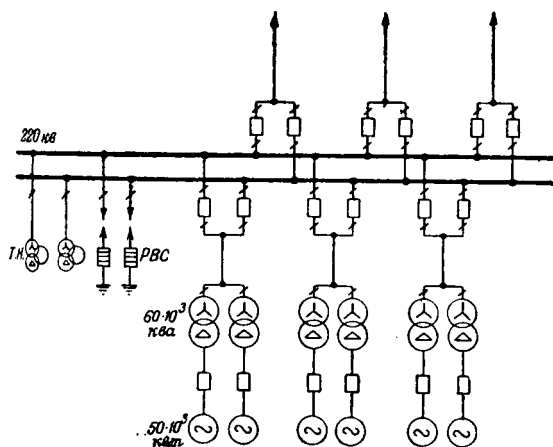


Рис. 2.

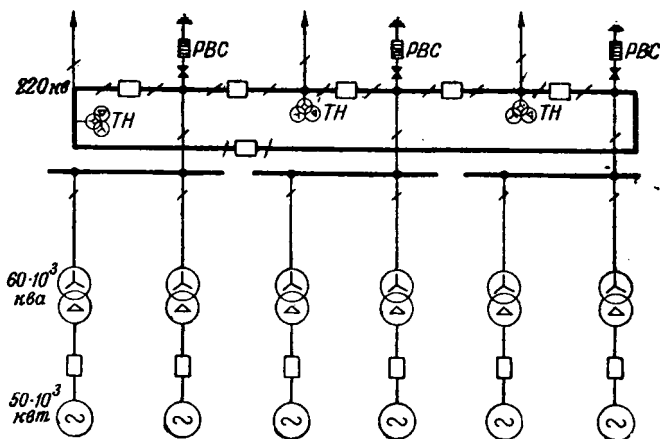


Рис. 3.

зависимость работы каждого из генераторов обеспечивается установкой выключателей генераторного напряжения на каждом из них.

Схема соединений по второму варианту не имеет недостатков, присущих первому: повреждение на сборных шинах приведет к отключению всех выключателей, присоединенных к ней, без потери мощности электростанции и без отключения какой-либо линии электропередачи.

Вывод в ревизию выключателя также осуществляется весьма просто, без необходимости оперирования какими-либо дополнительными разъединителями, кроме установленных по обе стороны выключателя.

Количество трансформаторных единиц при первом варианте меньше, чем при втором, а именно, 13 шт. вместо 19, что несомненно, существенно упрощает их эксплуатацию. Число выключателей 220 кВ во втором варианте увеличилось незначительно; для рассматриваемой электростанции необходимо установить 12 выключателей вместо 11 по первому варианту. Существенным недостатком схемы по второму варианту является то, что ревизия фаз трансформатора или их аварийное отключение вызывает остановку двух генераторов. Кроме того, если при ревизиях или ремонтах трансформаторов перерыв в работе турбогенераторов был бы большим, необходима установка дополнительной резервной фазы трансформатора (мощностью тыс. кВА).

Следует также отметить, что выполнение двух групп на стороне генераторного напряжения у каждой трансформаторной группы (на которых осуществляются два треугольника) представляет существенные конструктивные трудности, которых нет в первом варианте.

Новая схема соединений. Возможность получения трехфазных трансформаторов 10/220 кВ, мощностью по 60 тыс. кВА позволяет предложить новую схему соединений. Вместо трансформаторной группы 10/220 кВ, мощностью 120 тыс. кВА двумя обмотками генераторного напряжения, могут быть установлены два трехфазных трансформатора 10/220 кВ по 60 тыс. кВА каждый при сохранении неизменными всех остальных элементов схемы соединений (рис. 2). При такой заме-

не появляется новое, весьма ценное качество схемы соединений — ревизия любого трансформатора может выполняться при останове только своего, блочного генератора. Для этого необходимо лишь отсоединить этот трансформатор на стороне 220 кВ от перемычки, при помощи которой связаны попарно каждые два блока. Естественно, что на время производства указанного отключения необходимо временно отключить также и второй генератор, спаренный с данным, и отключить оба выключателя 220 кВ этой цепи. Для сокращения времени на производство этой операции до 10—15 мин целесообразно у каждого трансформатора установить разъединитель 220 кВ.

Установка двух трехфазных трансформаторов вместо группы из однофазных позволяет также существенно уменьшить потери энергии в трансформаторах в периоды проведения ежегодных ревизий генераторов за счет отключения на этот период трансформатора ревизируемого генератора.

Новая схема соединений выгодно отличается от обеих ранее рассмотренных, так как в ней нет недостатков первого варианта и сохранены все преимущества второго. Кроме того, в новой схеме: число трансформаторных единиц значительно меньше, чем в рассмотренных ранее, — 6 шт. вместо 13 и 19; отпадает необходимость выполнения громоздких сборок генераторного напряжения у трансформаторных групп; релейная защита трансформаторов осуществляется несколько проще; при аварии с одним из трансформаторов, так же как в схеме второго варианта, отключаются два генератора; однако после выяснения, в каком из двух трансформаторов произошла авария, поврежденный трансформатор отключается разъединителем, и восстанавливается нормальная работа второго, неповрежденного блока. Таким образом, и в этом весьма редком случае аварии с трансформатором перерыв в работе второго генератора может быть весьма кратковременным. Вывод в ревизию любого трансформатора в новой схеме соединений может быть приурочен к часам провала нагрузки, когда оба генератора могут быть временно отключены.

Следует отметить, что укрупнение мощности трансформаторных групп или применение спарен-

ных блоков по новой схеме соединений уменьшает число установленных элементов на стороне 220 кВ, облегчая тем самым возможность применения схемы соединений по многоугольнику. Так, для рассматриваемой станции соединения могут быть выполнены для 220-кВ части по шестиугольнику (рис. 3).

Применение схемы шестиугольника резко сокращает число выключателей и размеры открытого распределительного устройства 220 кВ; число

выключателей уменьшается с 12 до 6, а площадь открытого распределительного устройства с 17 300 до 11 500 м².

Таким образом, новая схема соединений сокращает число трансформаторов, а иногда и числа выключателей, позволяет существенно снизить затраты дефицитного оборудования и средств и в конечном счете повышает надежность и удобство эксплуатации этой ответственной части энергосистем.

[27. 9. 91]



О переходном режиме при самовозбуждении шунтового генератора

Инж. С. Я. ДУНАЕВСКИЙ

Москва

Процессы самовозбуждения обычно исследуют, учитывая нелинейность кривой намагничивания. Некоторые авторы вообще исключают возможность

самовозбуждения при линейных характеристиках магнитной цепи генератора. Работа шунтового генератора при линейной характеристике холостого хода, вообще говоря, недостаточно устойчива, но в принципе этот случай возможен и с методической стороны интересен для анализа.

Как видно из рисунка, при линейной характеристике холостого хода I устойчивая работа генератора возможна в точке А — пересечения ее и прямой падения напряжения Π .

Процесс самовозбуждения может быть описан уравнением

$$IR + L \frac{dI}{dt} = E_r + Iz, \quad (1)$$

где E_r — э. д. с. остаточного магнетизма;

$z = \operatorname{tg} \alpha_1$, имеет размерность сопротивления и определяет наклон кривой намагничивания к оси абсцисс;

$R = \operatorname{tg} \alpha_2$ — сопротивление цепи возбуждения.

При нулевых начальных условиях решением уравнения (1) является:

$$I = \frac{E_r}{R-Z} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right), \quad (2)$$

и

$$E = E_r + E_r \frac{Z}{R-Z} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right), \quad (3)$$

где постоянная времени самовозбуждения имеет значение

$$T_c = \frac{L}{R-Z}. \quad (4)$$

Рассматривается представляющий известный методический интерес случай самовозбуждения машины, имеющей линейную характеристику холостого хода. Обнаруживается, что процесс самовозбуждения такой машины протекает в 10—20 раз медленнее процесса при независимом возбуждении.

Уравнения (2)–(4) выявляют характерную черту процесса самовозбуждения, его относительно большую длительность по сравнению со случаем

независимого возбуждения.

Соотношение постоянных времени при самовозбуждении T_c и при независимом возбуждении $T = \frac{L}{R}$ составляет:

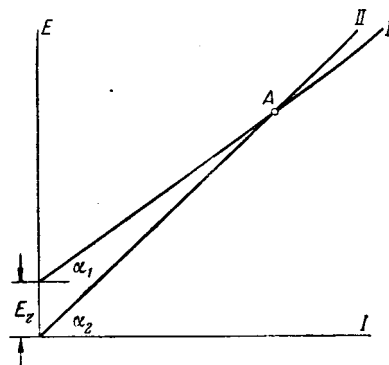
$$\frac{T_c}{T} = \frac{R}{R-Z} > 1.$$

Практические значения соотношения между R и Z легко вычислить, принимая, что при установившемся режиме э. д. с. равна номинальной

$$E_r + E_r \frac{Z}{R-Z} = E_n,$$

откуда $\frac{Z}{R} - 1 = \frac{E_r}{E_n}$ и, следовательно, $\frac{T_c}{T} = \frac{E_n}{E_r}$.

Если принять $\frac{E_r}{E_n} 100 \approx 5 \div 8\%$, то $\frac{T_c}{T} \approx 20 \div 125$.



Таким образом, если насыщение незначительно, процесс самовозбуждения протекает 10—20 раз медленнее процесса при независимом возбуждении. Для генераторов с насыщенной магнитной системой указанное отношение несколько меньше — оно обычно не превышает 1÷1

[24. 1. 92]

Анализ схем электропривода с падающей характеристикой

Кандидат техн. наук С. З. БАРСКИЙ

Центральная научно-исследовательская лаборатория электропривода и автоматики треста «Электропривод»

Ограничение пределов регулирования характеристик, осуществляемое средствами электромашиной автоматики, не носит релейный характер. Оно создает лишь условия для благоприятного деформирования соответствующих характеристик привода со степенью интенсивности, обеспечивающей саморазгрузку его. Это ценное свойство электромашиной автоматики открывает возможность включения ряда специальных приводных характеристик, среди которых не последнее место по важности занимает экскаваторная.

Успешное решение трактуемого вопроса создает благоприятные условия для максимальной и безопасной интенсификации работы привода во всех режимах, в особенности при пуске, торможении, переходе из режима в режим. Одновременно увеличивается коэффициент заполнения по рабочим диаграммам. Попутно ограничиваются также динамические перенапряжения во всех элементах рабочих механизмов и передач, тепловые и электромагнитные перегрузки в электро-механических элементах привода, улучшаются условия коммутации электрических машин. Все это в конечном счете увеличивает производительность, коэффициент использования агрегатов и срок их службы, а также облегчает управление ими.

Основные принципы ограничения характеристик. На рис. 1 приведена принципиальная схема привода постоянного тока, управляемого системой генератор-двигатель. Электромашиный усилитель B , выполняющий роль возбуждения, снабжен тремя обмотками возбуждения: управляющей OU , питаемой от независимого

Приведены основные принципы ограничения тока, напряжения, скорости, ускорения и мощности регулируемого привода по системе генератор-двигатель с электромашинным управлением. Выведены основные соотношения, связывающие параметры схемы ограничения с напряжением, током и скоростью привода в режимах нормальных нагрузок, а также на участке падающей характеристики. Дается связь между параметрами схемы и кратностью токов и моментов привода в режимах критическом и коротком замыкании. Даются графические методы расчета характеристик привода с учетом нелинейностей — насыщения генератора и переменного сопротивления твердых выпрямителей. Приведены основные принципы построения контактных и бесконтактных схем токоограничения с посторонним питанием. Указаны варианты дальнейшего развития дроссельных схем с нелинейными сопротивлениями, с конденсаторами и с переменным эталонным напряжением. Приведены результаты экспериментального исследования установки средней мощности. Даны осциллограммы и характеристики, снятые в широком диапазоне изменения нагрузки.

источника через реверсивный потенциометр PY , обеспечивающий управление приводом, реверс и торможение его; б) отрицательной обратной связи OC , подключенной к зажимам генератора через сопротивление R , твердые выпрямители и контакты реле управления B и H . Реле обеспечивают получение отрицательной обратной связи при изменении направления вращения, а твердые выпрямители исключают возможность образования положительной обратной связи

при быстрых режимах управления приводом; в) обмоткой ограничения тока OT , питаемой напряжением $e_{ш}$, снимаемым с шунта в главной цепи привода. В эту же цепь включены эталонные напряжения $\pm e_s$, снимаемые с потенциометра независимого питания.

В пределах изменения тока главной цепи от нуля до некоторого значения перегрузки (обычно $150 \div 175\% I_n$) падение напряжения в шунте меньше эталонного напряжения. Наличие в этой цепи соответственно включенных твердых выпрямителей исключает протекание тока в этом режиме через обмотку OT . Внешняя характеристика генератора и механическая характеристика двигателя обусловлены параметрами машин и м. д. с. обмоток OU и OC электромашиного усилителя.

При некотором значении тока в главной цепи $e_{ш} = e_s$. Будем называть этот режим критическим ($I_{кр}$, $U_{кр}$, $\omega_{кр}$). При дальнейшем увеличении нагрузки через обмотку OT пройдет ток, обусловленный разностью $e_{ш}$ и e_s , а также сопротивлением этой цепи. Так как м. д. с. этой обмотки направлена против м. д. с. обмотки

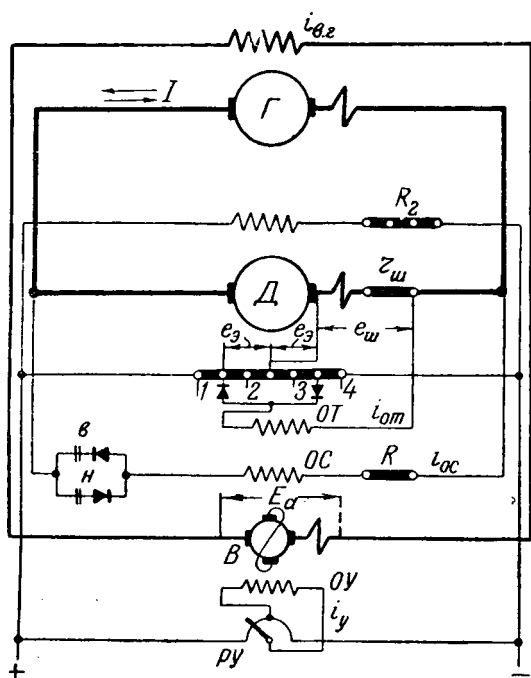


Рис. 1.

управления, то напряжение усилителя, генератора, а следовательно, и скорость привода будут с ростом тока главной цепи падать. Динамика падения скорости в этом режиме обусловлена интенсивностью воздействия узла ограничения тока, которая в свою очередь зависит от коэффициента усиления обмотки OT усилителя и сопротивления шунта в главной цепи.

В предельном режиме, когда привод неподвижен, результирующая м. д. с. усилителя и его напряжение незначительны, обеспечивая лишь омическое падение напряжения в главной цепи. Этот режим называется в дальнейшем режимом короткого замыкания ($I_{кз}$, $U_{кз}$, $M_{кз}$, $i_{кз}$, $F_{кз}$).

На рис. 2 приведены основные принципиальные построения схем ограничения пределов регулирования различных характеристик и параметров автоматизированного электропривода. Все эти схемы являются элементами регулируемого по системе генератор—двигатель привода постоянного тока, в котором электромашинный усилитель является возбудителем генератора, аналогично приводу, изображенному на рис. 1.

На схеме a рис. 2 изображен узел ограничения верхнего предела регулирования напряжения системы генератор—двигатель. Обмотка ограничения AO машинного усилителя начинает обтекаться током и создавать размагничивающий эффект лишь в режимах, в которые напряжение генератора превышает эталонное e_s , снимаемое с потенциометра независимого питания. Твердые выпрямители обеспечивают правильное функционирование схемы при работе привода в двух направлениях. Фактический верхний предел регулирования напряжения генератора определяется параметрами узла ограничения напряжения и коэффициентом усиления усилителя. Если поток двигателя неизменен и потери в цепи якорей не-

лики, то схема ограничения напряжения фактически ограничивает верхний предел регулирования скорости привода. Если же эти условия нарушены, а требования в смысле ограничения достаточно жесткие, то необходимо применить специальное устройство для ограничения скорости (схема b). В схеме b обмотка ограничения AO усилителя подключена к якору тахогенератора T . Этот узел начинает функционировать, когда напряжение тахогенератора превышает включенные в эту цепь эталонные напряжения, снимаемые через твердые выпрямители от потенциометра независимого питания.

На схеме b изображена принципиальная схема ограничения верхнего предела ускорения (или замедления) привода. Измерительным элементом схемы b является трансформатор TU , первичная обмотка которого подключена к зажимам якоря тахогенератора. Электродвижущая сила вторичной обмотки трансформатора, пропорциональная ускорению привода, вызовет в обмотке ограничения AO усилителя ток лишь тогда, когда ее значение будет больше эталонного напряжения, введенного в эту цепь.

В схеме z ограничения верхнего предела регулирования мощности привода в качестве тахогенератора использован маломощный электромашинный усилитель, обмотка возбуждения которого подключена к шунту в главной цепи. Выходное напряжение на щетках поперечной оси, остающихся в этой схеме разомкнутыми, будет пропорционально мощности, развиваемой приводом. От этого напряжения и питается обмотка ограничения усилителя. В эту же схему введено эталонное напряжение, фиксирующее верхний предел регулирования мощности привода. Поперечная магнитная ось усилителя работает при малых индукциях, якорь его в этой схеме не нагружен током, поэтому схема линейная, и выходное напряжение между щетками поперечной оси усилителя, составляющее при номинальном режиме 10-15% от напряжения продольной оси, будет вполне достаточным для обеспечения функционирования узла ограничения мощности.

Схемы ограничения мощности могут применяться в приводах, в которых токи и напряжения регулируются в широких пределах, между тем как мощность ограничена, например, по условиям прочности механизма или ограниченной перегрузочной способности первичного двигателя системы генератор—двигатель.

В рассматриваемой схеме тахогенератор AT может быть одновременно использован с целью измерения и ограничения скорости привода. Если на продольную ось его магнитной цепи расположить дополнительную обмотку, питаемую от независимого источника постоянного тока, то выходное напряжение на зажимах второй (продольной) пары щеток будет при этом пропорционально скорости привода.

Наконец, принцип ограничения первой производной тока главной цепи показан на схеме d . Согласно этой схеме первичная обмотка ненасыщенного трансформатора тока T обтекается рабочим током привода. Электродвижущая сила, ин-

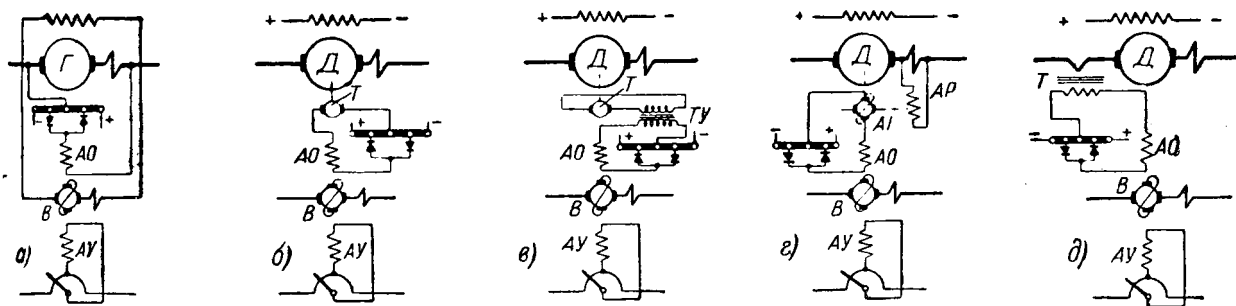


Рис. 2.

дутируемая во вторичной обмотке, будет пропорциональна производной рабочего тока. Эта величина сравнивается с эталонным напряжением и разность подается в ограничивающую обмотку АО электромашиного усилителя. Ограничением значения производной рабочего тока одновременно достигается ограничение первой производной ускорения, которая, как это теперь установлено, оказывает сильное влияние на физиологическое состояние людей, перемещаемых в лифтах и подъемных машинах.

Во многих приводах целесообразно вводить жимметричные схемы ограничения характеристик, что открывает возможность безопасного увеличения скорости, тока или ускорения в отдельные периоды рабочего цикла, интенсифицировать работу привода, а следовательно, и увеличить его производительность. Такие устройства представляют значительный практический интерес для экскаваторов, грузоподъемных машин, доменных подъемников и др.

Возможно осуществить принцип одновременного ограничения пределов регулирования нескольких характеристик автоматизированного электропривода (тока, напряжения, скорости и ускорения) с использованием общей ограничивающей обмотки АО усилителя.

В рассмотренных схемах были преднамеренно опущены некоторые детали, связанные со спецификой приводов.

Приводимые ниже исследования ограничены анализом статических режимов схем ограничения тока, как наиболее характерных и важных. Методы и результаты этих исследований могут быть легко перенесены на остальные схемы.

Основные соотношения. В общем виде баланс м. д. с. электромашиного усилителя в схеме привода на рис. 1 в стационарном режиме определится как алгебраическая сумма м. д. с. отдельных обмоток

$$F_{рез} = F_y + F_{oc} + F_{om},$$

напряжение генератора $U = k_z k_a F_{рез} - IR_z$.

В этих соотношениях k_z — коэффициент усиления генератора по напряжению; k_a — коэффициент усиления усилителя по ампервиткам; F — м. д. с. соответствующих обмоток усилителя, определяемые по формулам

$$F_y = k_\phi \lambda_y E_{yo}; F_{oc} = -\lambda_{oc} \alpha U; F_{om} = -\lambda_{om} (I_{r_{ш}} - e_s).$$

Здесь дополнительно введены: $\alpha = \frac{U_y}{U}$ — коэффициент напряжения обратной связи; E_{yo} — напряжение на зажимах обмотки управления усилителя при отсутствии обратной связи; k_ϕ — коэффициент форсировки усилителя.

Постоянные λ являются параметрами обмоток, определяемыми по формулам

$$\lambda_y = \frac{q_y}{l_y \rho}; \quad \lambda_{oc} = \frac{q_{oc}}{l_{oc} \rho}; \quad \lambda_{om} = \frac{q_{om}}{l_{om} \rho},$$

где l — соответствующие средние длины витков обмоток, а q — их сечение.

После замены соответствующих м. д. с. их выражениями получим:

$$U = k_z k_a [k_\phi \lambda_y E_{yo} - \lambda_{oc} \alpha U - \lambda_{om} (I_{r_{ш}} - e_s)] - IR_z. \quad (1)$$

Введя далее коэффициенты усиления обмоток по напряжению

$$k_y = k_a \lambda_y; \quad k_{oc} = k_a \lambda_{oc}; \quad k_{om} = k_a \lambda_{om}$$

и произведя преобразования, получим:

$$U = \frac{k_z [k_\phi k_y E_{yo} - k_{om} (I_{r_{ш}} - e_s)] - IR_z}{1 + k_z k_{oc} \alpha}, \quad (2)$$

напряжение холостого хода

$$U_0 = \frac{k_z k_\phi k_y E_{yo}}{1 + k_z k_{oc} \alpha} = k_z k_y E_{yo}, \quad (4)$$

откуда $k_\phi = (1 + k_z k_{oc} \alpha)$.

Обмотка ограничения тока функционирует лишь при токе больше критического, а в режиме меньших нагрузок член в круглых скобках выражения (2) пропадает; жесткость внешней характеристики генератора в этих режимах определится лишь коэффициентом форсировки

$$\frac{U}{U_0} = \left(1 - \frac{e_s}{k_\phi}\right). \quad (4)$$

В режимах нагрузок, превышающих критическую,

$$\frac{U}{U_0} = \left[1 - \frac{e_s + k_z k_{om} (e_{ш} - e_s)}{k_\phi}\right]. \quad (5)$$

Здесь дополнительно введены относительные величины

$$e_{ш} = \frac{I_{r_{ш}}}{U_0}; \quad e_s = \frac{E_s}{U_0}; \quad e_z = \frac{IR_z}{U_0}.$$

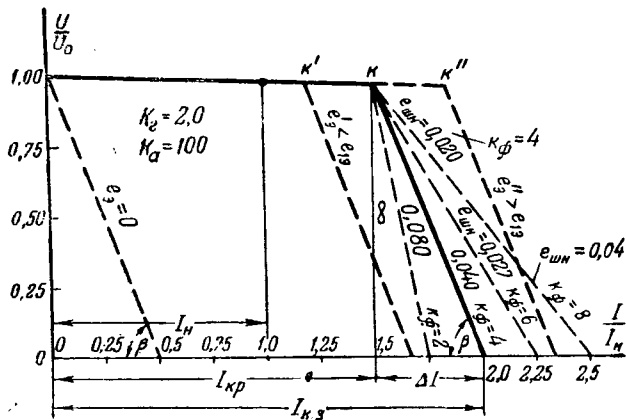


Рис. 3.

Параметры схемы и характеристики привода.

Влияние различных параметров схемы на характеристики привода во всех режимах достаточно очевидно из структуры формул (4) и (5). Графическая иллюстрация этих зависимостей дана на рис. 3. Определение параметров схемы по заданным характеристикам или обратная задача решаются, исходя из наиболее напряженного режима привода — короткого замыкания.

Пренебрегая омическими падениями напряжения в машинах, получаем из формулы (5) весьма простое выражение для коэффициента форсировки

$$k_{\phi} = k_z k_{om} e_{шн} \left(\frac{I_{кз} - I_{кр}}{I_n} \right). \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что увеличение коэффициента форсировки ограничивается предельными значениями коэффициента усиления машин, сопротивлением шунта в главной цепи и разностью $(I_{кз} - I_{кр})$. Эту разность стремятся, по возможности, уменьшить с целью увеличения крутизны механической характеристики привода в режимах перегрузок, а следовательно, и коэффициента заполнения его рабочей диаграммы. Между тем, с целью форсировки переходных процессов во всех режимах работы привода, а также для повышения жесткости рабочей части его характеристики [см. (4)] коэффициент форсировки целесообразно всемерно увеличивать.

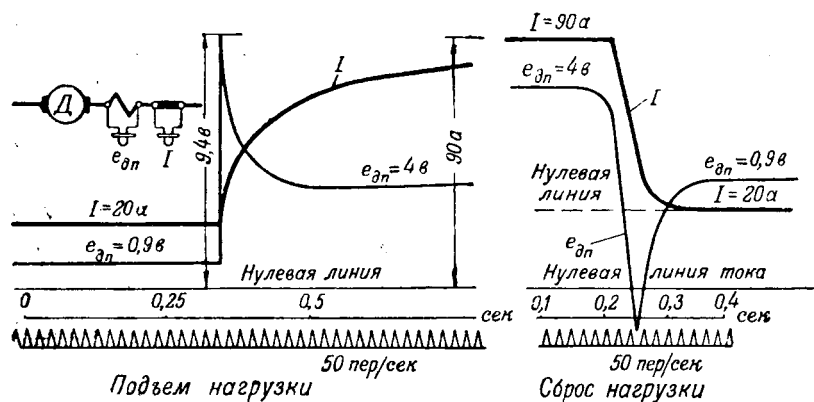


Рис. 4.

На рис. 3 сплошными линиями показана внешняя характеристика привода рис. 1 при следующих параметрах его схемы:

$$k_z = 2,0; k_a = 100; e_{шн} = 0,04; e_s = 0,06; k_{\phi} = 4.$$

Кратность токов критического и короткого замыкания равны при этом соответственно 1,5 и 2. При этом угол наклона характеристики на участке ограничения $\beta = \arctg 2$. На этом рисунке пунктиром показаны характеристики привода для других значений k_{ϕ} при прочих неизменных параметрах.

Потребное относительное значение эталонного напряжения определится по формуле

$$e_s = \frac{k_{\phi}}{k_z k_{om}} \left(\frac{I_{кр}}{I_{кз} - I_{кр}} \right). \quad (7)$$

Этот параметр определяет начало излома характеристик привода, но не влияет на их наклон как это показано пунктирными характеристиками (e_s' и e_s'') на рис. 3. На этом же рисунке приведена характеристика для $e_s = 0$.

Интенсивность действия узла ограничения тока, а следовательно, и наклон характеристики привода в режимах перегрузок обусловлены сопротивлением шунта в главной цепи или относительным падением напряжения в нем при номинальном токе. Эта величина определяется по формуле

$$e_{шн} = \frac{I_n R_{ш}}{U_0} = \frac{k_{\phi}}{k_z k_{om}} \left(\frac{I_n}{I_{кз} - I_{кр}} \right). \quad (8)$$

Из структуры этой формулы видно, что повышение коэффициента форсировки и связанное с этим повышение эффективности работы привода ограничиваются приемлемым значением потерь мощности в шунте главной цепи. На рис. 3 сплошными линиями изображена характеристика привода с реальными параметрами $k_z = 2$, $k_a = 100$ и $k_{\phi} = 4$ при относительном значении потерь мощности в шунте главной цепи, равной 0,04; тут же пунктиром показаны характеристики привода при значениях $e_{шн} = 0,020; 0,027$ и $0,030$ при неизменных прочих параметрах схемы.

В реальных условиях мощных приводов значение $e_{шн}$ колеблется от 0,03 до 0,06, что свя-

зано с введением в главную цепь ряда сопротивлений и рассеяния в ней значительной энергии. Падение напряжения в обмотках дополнительных полюсов и компенсационных обычно в несколько раз меньше потребных значений для питания узла ограничения тока. Следует также отметить, что появляющаяся динамическая составляющая напряжения на зажимах этих обмоток принимает столь большие значения, что ставит под сомнение возможность их использования с указанной целью. Это обстоятельство подтверждается приведенными на рис. 4 осциллограммами рабочего тока I и

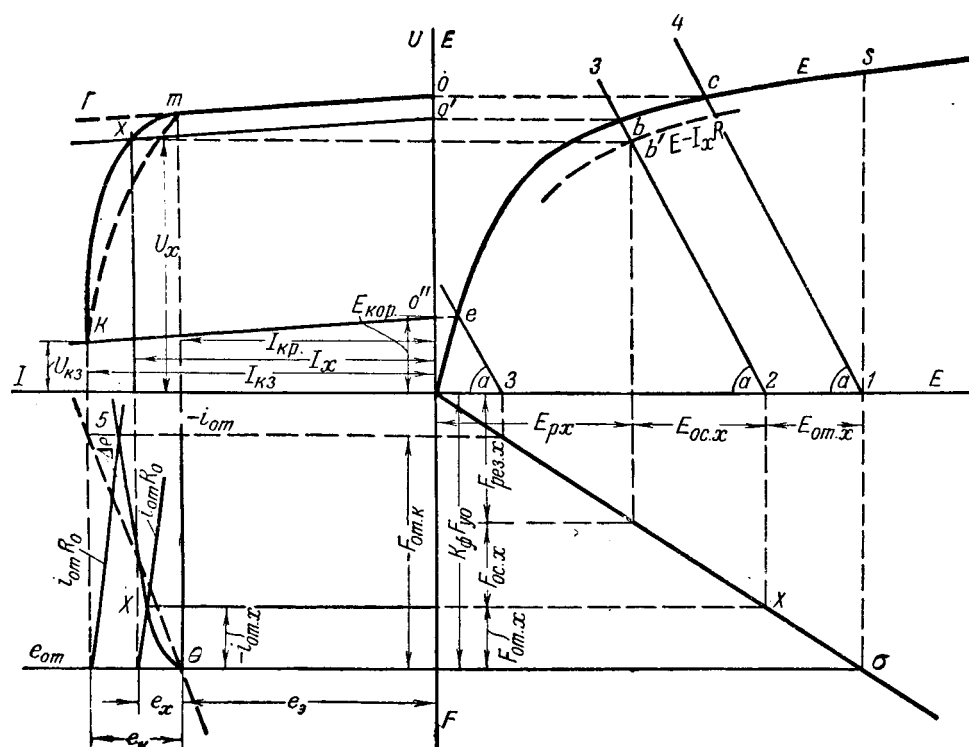


Рис. 6.

значение U'_0 (точка O') в этом режиме. Проведя из этой точки внешнюю характеристику генератора, получим искомую точку U_x , соответствующую току I_x . Аналогичным путем нетрудно найти точки других режимов и построить участок kxm внешней характеристики генератора.

Наиболее характерным является режим короткого замыкания генератора, в котором кратность тока принята заданной. Точки 5 на характеристике $i_{om}R_{om}$ фиксирует значение e_{omk} и i_{omk} в этом режиме, а проекция этой точки на характеристику усилителя (5) определяет м. д. с. ($-F_{omk}$) и напряжение (E_{omk}) ограничения тока. Проведя далее из точки 3 под углом $\alpha = \arctg \alpha'$ луч 3-8, получим точку e , определяющую э. д. с. E_{kz} генератора в этом режиме. Проведя далее из точки O'' внешнюю характеристику генератора, определим точку K режима короткого замыкания на внешней характеристике генератора.

Следует заметить, что если масштабы построения в квадранте I неудобны, то можно откладывать на оси ординат aU . При этом лучи 1-с, 2-б и 3-е проводятся под углом 45° . Все остальные построения остаются неизменными.

В графическом методе расчета все элементы привода, кроме генератора, были приняты линейными. В действительности нелинейность, вносимая твердыми выпрямителями в узел ограничения тока, окажет значительное влияние на характеристики привода, в особенности в тех режимах, в которых сопротивление выпрямителей окажется соизмеримым с обычно небольшим сопротивлением собственно обмотки возбуждения усилителя.

Предлагаемый графический метод расчета учитывает нелинейность в узле ограничения тока, следовательно, позволяет установить количественную и качественную оценку этого явления. На рис. 6 приведен графический метод построения характеристик генератора системы генератор—двигатель согласно схеме, изображенной на рис. 1. Метод во многом идентичен ранее изложенным.

В первом и втором квадранте приведены известные характеристики генератора и усилителя. В третьем квадранте приведены вспомогательные оси e_{om} , i_{om} , начало которых расположено в точке 6 вольтамперной характеристики $I_{r_{ш}}$ пункта, соответствующей критическому значению тока

условию $I_{r_{ш}} - e_s = 0$. В этих осях изображены вольтамперные характеристики Δ выпрямителей и линейных сопротивлений R_{om} в узле ограничения тока. По заданному значению тока в главной цепи $I_{kz} > I_x > I_{kr}$ определяют на вспомогательных осях значение $e_x = I_x r_{ш} - e_s$ и из этой точки проводят характеристику $i_{om} R_0$. Точка пересечения x этой характеристики с вольтамперной характеристикой Δ выпрямителей дает искомое значение тока i_{om} . Проекция этой точки на характеристику усилителя x определяет значение м. д. с. ограничения тока F_{omx} и соответствующее ему напряжение E_{omx} . Проведя далее из точки 2 под углом $\alpha = \arctg \alpha'$ луч 2-3, спроектировав точку b пересечения его с характеристикой холостого хода генератора, получим начальную точку внешней характеристики, которую нетрудно построить. Точка x на этой характеристике, соответствующая току I_x , и будет принадлежать искомой характеристике.

Из этого построения видно, что характеристика генератора, учитывающая нелинейность выпрямителей в узле ограничения тока, лежит выше характеристики mk (пунктир), построенной без учета этого явления. Физически это можно объяснить тем, что значительное сопротивление выпрямителей в режимах малых токов является в начальных стадиях перегрузок причиной пассивной роли узла ограничения тока. Это явление следует расценивать как положительное, так как при тех же значениях токов и моментов в режиме короткого замыкания оно повышает коэффициент заполнения диаграммы привода. Специальный подбор характеристик твердых выпрямителей или введением дополнительных нелинейных

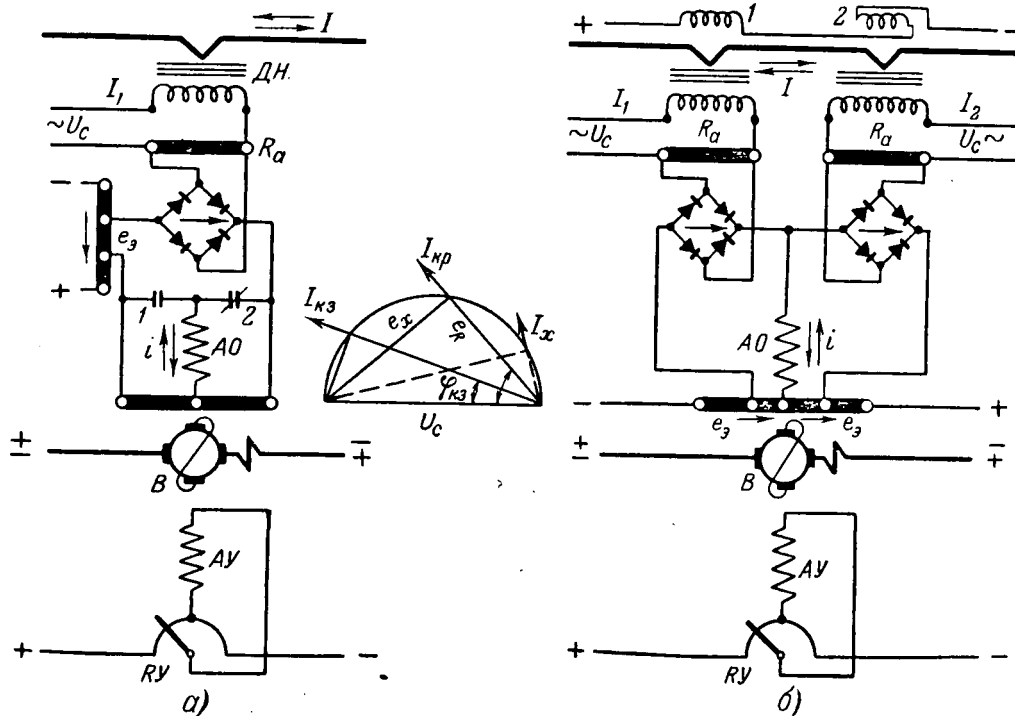


Рис. 7.

противлений в узел ограничения тока можно более увеличить коэффициент эффективности характеристик привода.

Узлы ограничения тока с посторонним питанием. Дальнейшее улучшение рабочих характеристик привода и увеличение коэффициента заполнения диаграммы тока достигается увеличением крутизны внешней характеристики генератора на участке ограничения тока (перегрузок). Это может быть практически достигнуто путем снижения омического сопротивления шунта главной цепи и связанных с этим потерь, что допустимо. Большого внимания заслуживают схемы, в которых питание узла ограничения тока осуществляется от постороннего источника, ток главной цепи является лишь задающим параметром.

Пример такой схемы, построенной на базе дросселей насыщения, показан на рис. 7а. Подмагничивание дросселя в этой схеме осуществляется рабочим током привода, что конструктивно достигается сцеплением магнитной цепи дросселя с проводом главной цепи. К независимому источнику переменного тока подключена обмотка переменного тока дросселя, последовательно соединенная с омическим сопротивлением, от зажимов которого через мостик из твердых диодов питается цепь ограничения тока. В эту цепь также введены потенциометр с эталонным напряжением e_3 и контакты 1 и 2 реле (командоаппарата), обеспечивающие правильное функционирование этого узла при реверсе. На рисунке приведена круговая диаграмма цепи переменного тока при различной степени насыщения дросселя, что соответствует различным значениям токов в главной цепи привода.

На рис. 8 показан узел ограничения тока с

двумя дросселями насыщения, для прямого и обратного тока. Из этой схемы полностью исключены контакты, что является большим ее достоинством. Каждый из дросселей снабжен, кроме того, вспомогательной подмагничивающей обмоткой 1 и 2, подключенными к независимому источнику постоянного тока; м. д. с. этих обмоток направлены по отношению к м. д. с. главного тока так, что при протекании его в одном каком-либо направлении они складываются в одном дросселе и вычитаются во втором. Это обуславливает уменьшение с нагрузкой индуктивности первого дросселя и одновременное увеличение второго. При реверсе наблюдается обратное явление, чем и обеспечивается правильное функционирование узла ограничения тока.

На рис. 8а изображена схема узла ограничения тока, отличающаяся от ранее рассмотренных наличием нелинейного сопротивления Δ . Специальная характеристика этого элемента, тут же изображенная, обеспечивает пассивное действие узла ограничения тока в режимах небольших перегрузок и все возрастающую интенсивность его по мере приближения к значению тока короткого замыкания. Графическое изображение характеристик этого узла приведено на этом же рисунке. В схеме б нелинейным элементом, обеспечивающим требуемые характеристики привода, является дополнительный дроссель Д2, изготовленный из материала со специальной магнитной характеристикой (пермаллоя или муметалла). На этом же рисунке приведено графическое построение характеристик этого узла.

Схема в изображает узел ограничения тока с дросселем насыщения, подключенным последовательно с конденсатором С к сети переменного тока. Соответствующим подбором параметров

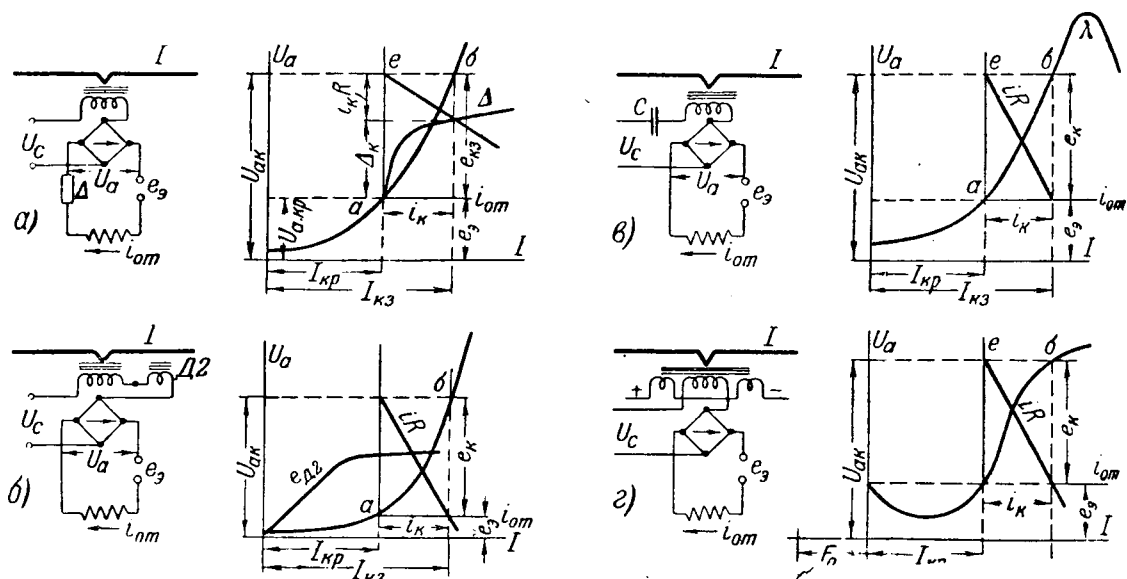


Рис. 8.

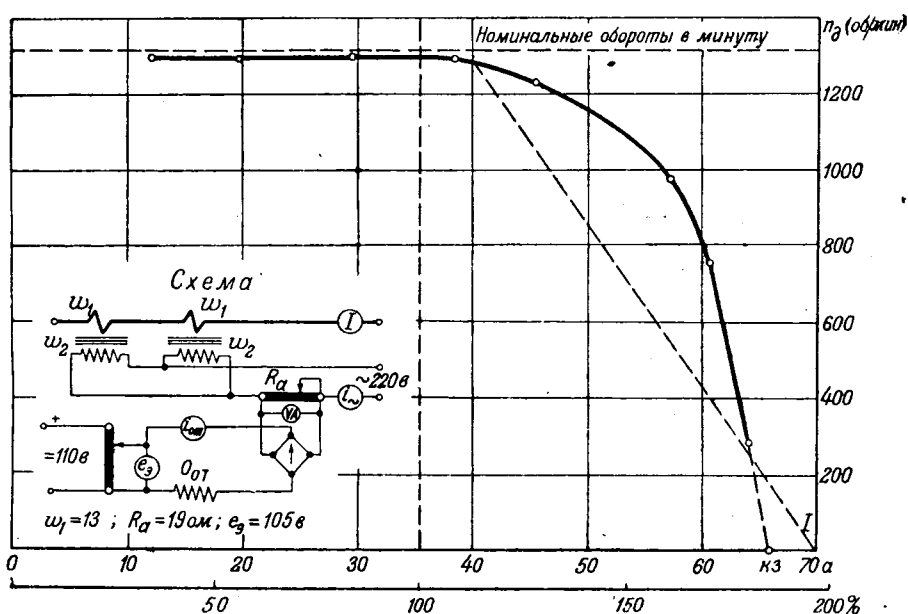


Рис. 9.

этой схемы можно добиться медленного роста переменного тока в пределах критической нагрузки привода и резкого его возрастания между значениями токов критического и короткого замыкания по мере приближения к режиму резонанса цепи переменного тока. Графическое построение характеристик этого узла там же приведено.

В схеме 2 дроссель снабжен дополнительной обмоткой, создающей неизменную м. д. с. F_0 постоянного тока, направленную противоположно м. д. с. главной цепи. Вследствие этого результирующая м. д. с. постоянного тока дросселя изменяется от F_0 до $F_{кз} - F_0$, чем и обеспечивается специальная характеристика, графический расчет которой приведен на этом же рисунке.

Во всех рассмотренных в настоящей статье схемах мы предполагали эталонное напряжение неизменным. С применением дроссельных схем

открывается возможность ввести в узлы ограничения переменного, зависящего от рабочего тока (или другого параметра), эталонного напряжения. Это мероприятие открывает новые возможности интенсификации работы схем ограничения и дальнейшего улучшения рабочих характеристик привода.

Экспериментальные исследования. Целью экспериментальных исследований явилось установление статических характеристик привода в системе генератор-двигатель с устройством ограничения тока при широком диапазоне изменения нагрузки главной цепи. Привод был выполнен из двигателя постоянного тока ПН-175 мощностью 16,5 кВт с сидящей на его валу нагрузочной машиной. Генератор этого привода типа ПН-290 мощностью 33 кВт возбуждался от электромашинного усилителя с поперечным магнитом типа ЭМУ-25 мощностью 2,5 кВт.

Глубокое регулирование напряжения постоянного тока дросселями насыщения

Инж. И. И. РАТГАУЗ и инж. С. А. ДОХМАН

Завод МПСС

Задача создания простого регулятора напряжения до сих пор еще полностью не разрешена. Известны регуляторы с

переменным сопротивлением рассеяния. Они имеют неудовлетворительную крутопадающую характеристику. На рис. 1 показана вольтамперная характеристика подобного регулятора, выпускаемого промышленностью. Согласно кривой 1 при полном сбросе нагрузки выходное напряжение повышается на 50%.

Сравнительно широкое применение получили автотрансформаторы с плавным изменением коэффициента трансформации («вариаци»). Эти аппараты имеют щеточный, скользящий контакт, что делает их сложными в производстве и дорогими. Они оправдали себя в лабораторных условиях и в других стационарных установках, обеспеченных квалифицированным уходом.

Если регулировка осуществляется с целью компенсации колебаний напряжения сети и ограничена небольшими пределами этих колебаний ($-10\% \dots +10\%$), то в этих случаях плавно регулируемый автотрансформатор, безусловно, следует предпочесть схеме, показанную на рис. 2 (авторское свидетельство В. Г. Комара).

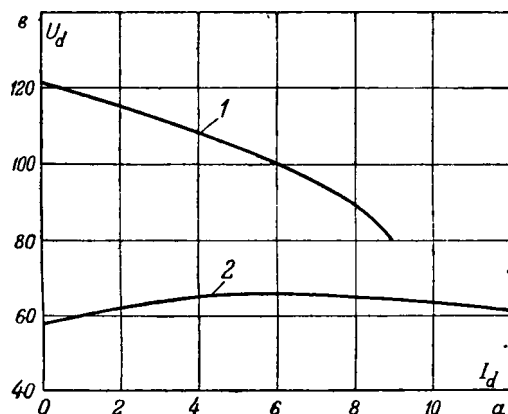


Рис. 1. Внешние характеристики регуляторов в зависимости от нагрузки.

Рассмотрены две схемы регулирования напряжения при помощи дросселей насыщения. Свойства разработанной авторами схемы глубокого регулирования напряжения, описаны на основе проведенной экспериментальной работы.

Схема содержит автотрансформатор 1 и два одинаковых дросселя насыщения 2 и 2', соединенных к двум от-

кам a, b автотрансформатора — понизительной (нижней на схеме) и повысительной. На каждом дросселе имеются две обмотки подмагничивания 3, 4. Обмотка 3 — управляющая; обмотка 4 осуществляет обратную связь. В одном из дросселей, например 2, ампервитки обратной связи совпадают с ампервитками подмагничивания, а в другом — они вычитаются. Следовательно, когда ток управления I_u возрастает, то индуктивность дросселя 2 уменьшается, а дросселя 2', наоборот, увеличивается; в результате этого происходит увеличение доли тока I_L , идущего через отпайку a и уменьшение тока I_L' . Можно практически все запереть отпайку b ; тогда напряжение повысится, и, наоборот, понизить напряжение выхода, заперев отпайку a . Таким образом устройство по своему действию представляет собой «бесконтактный коммутатор».

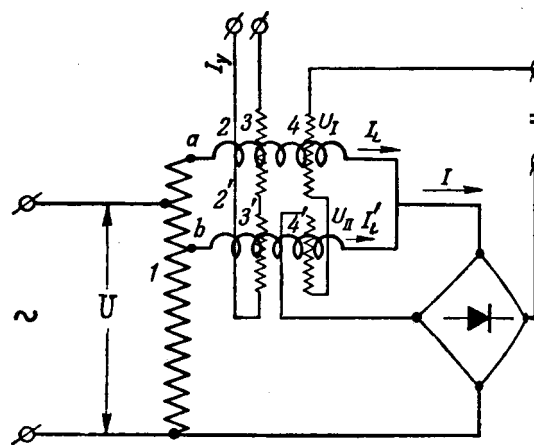


Рис. 2. Регулируемый автотрансформатор с бесконтактной коммутацией.
1 — автотрансформатор; 2, 2' — дроссели насыщения; 3, 4 — обмотки управления; 4, 4' — обмотки обратной связи.

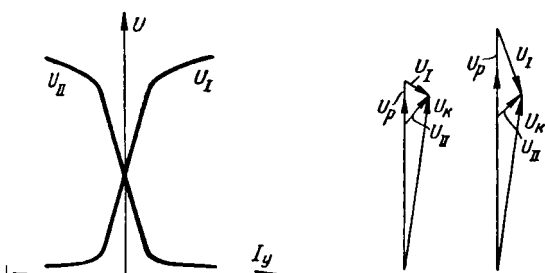


Рис. 3. Напряжение на дросселях 2, 2' и векторные диаграммы регулятора по рис. 2.

На рис. 3 показаны кривые напряжения U_I , на дросселях в зависимости от тока управления I_y , а также векторные диаграммы напряжения для случая, когда устройство используется в целях компенсации колебаний напряжения. Левая диаграмма соответствует понижению напряжения сети U_p , а правая диаграмма — повышению. Понятно, что устройство может быть использовано не только в целях поддержания напряжения сети, но и для регулирования напряжения питания аппаратуры в известных пределах. Коэффициент мощности устройства при изменении нагрузки в пределах от 20% до номинальной колеблется от 0,8 до величины, близкой к единице.

Когда имеется потребность в глубокой регулировке выпрямленного напряжения, можно иногда использовать простую схему с дросселями насыщения, показанную на рис. 4. Последовательно с трансформатором 1 включен дроссель насыщения 2. Изменяя ток возбуждения, можно в сравнительно широких пределах регулировать индуктивность дросселя и вместе с тем напряжение выхода.

В стабилизирующих устройствах с дросселем насыщения, как известно, применение шунтового возбуждения главного дросселя дает вторую стабилизацию тока выхода при изменении сопротивления нагрузки, а серийное возбуждение дает стабилизацию напряжения при широком изменении тока нагрузки. В схеме (рис. 4) в случае применения шунтового возбуждения получается крутопадающая вольтамперная характеристика, подобная той, которую имеет индуктор с переменным сопротивлением рассеяния (рис. 1, кривая 1). В случае применения серийного возбуждения (рис. 4) вольтамперная характеристика имеет вид кривой 2 (рис. 1), полученной на лабораторной схеме описываемого устройства.

В схеме рис. 4 регулирование тока в обмотке возбуждения 3 осуществляется при помощи шунтового реостата 4.

Как видно, устройство имеет весьма благоприятную вольтамперную характеристику. Но из-за управления при помощи тока нагрузки от этого устройства нельзя получить напряжения выхода, близкое к нулю, в режимах нагрузки, близких к режиму холостого хода. В целях расширения вниз диапазона регулиро-

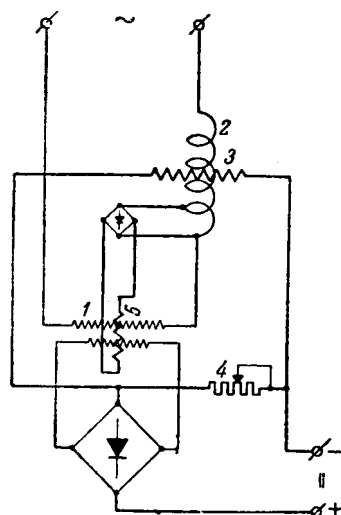


Рис. 4. Принципиальная схема глубокого регулирования напряжения.

1 — трансформатор; 2 — дроссель насыщения; 3 — обмотка подмагничивания дросселя; 4 — шунт регулировки тока подмагничивания; 5 — обмотка подмагничивания трансформатора 1.

вания напряжения при весьма малых токах нагрузки на силовой трансформатор подается небольшое возбуждение (обмотка 5), создаваемое напряжением дросселя 2. Тогда в режимах малых нагрузок одновременно с ростом напряжения на дросселе, обусловленном уменьшением его возбуждения, автоматически будет относительно несколько увеличиваться и ток холостого хода трансформатора (в результате возрастания его подмагничивания), что в свою очередь влечет за собой увеличение посадки напряжения на дросселе. Возрастание падения напряжения на дросселе приводит опять-таки к относительному увеличению тока холостого хода трансформатора.

Авторы разработали и экспериментально проверили подобную схему (рис. 5). Целью было получение двух режимов выхода: 1) $U_d = 0 \div 60$ в, $I_d = 12,0$ а; 2) $U_d = 0 \div 120$ в, $I_d = 6$ а при двух значениях напряжения питания — 127 или 220 в, для каждого из режимов. Схема содержит трансформатор 1 и выпрямители 2, соединенные по мостовой схеме. Сердечник дросселя — четырехстержневой. На каждом из средних стержней расположены две обмотки переменного тока 3. Помимо четырех обмоток 3 переменного тока на дросселе имеются две обмотки подмагничивания 4, охватывающие оба средних стержня.

При напряжении питания 127 в первичные обмотки трансформатора 1 и переменные обмотки дросселя, расположенные на одном стержне, соединены параллельно. При напряжении питания 220 в пакетный переключатель (не показан на схеме) одновременно переключает как первичные обмотки трансформатора, так и расположенные на одном стержне обмотки 3 дросселя на последовательное соединение, изображенное на рис. 5.

В режимах, близких к холостому ходу (в целях снижения веса и габарита устройства),

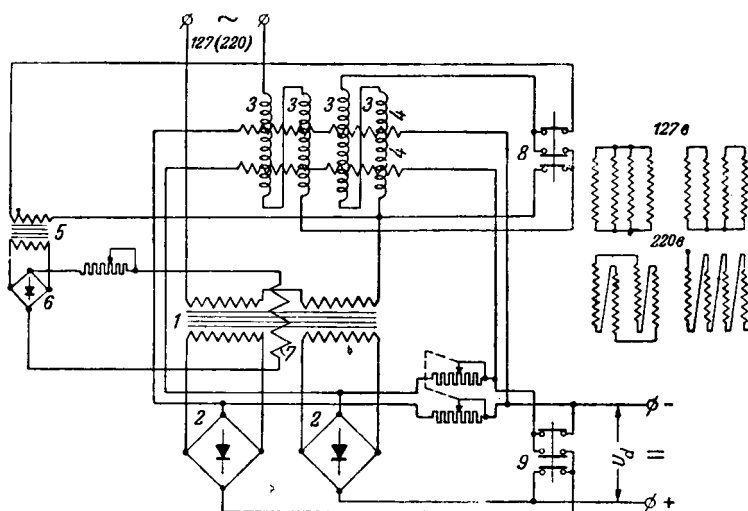


Рис. 5. Регулирующее устройство по схеме рис. 4.

1 — силовой трансформатор; 2 — силовые выпрямители; 3 — обмотки переменного тока дросселя; 4 — его обмотки возбуждения; 5 — трансформатор; 6 — выпрямитель; 7 — обмотка цепи подмагничивания трансформатора 1; 8, 9 — пакетные переключатели.

предусмотрено дополнительное переключение (пакетный переключатель 8) обмоток дросселя, расположенных на разных стержнях с параллельного соединения на последовательное (см. соединение обмоток 3, показанное справа на рис. 5).

Следует отметить, что при переходе на последовательное соединение ветвей дросселей, сидящих на разных стержнях, увеличение индуктивности исключает возможность съема с выхода мощностей, недопустимых по нагреву при таком соединении обмоток дросселя.

Описанное выше подмагничивание силового трансформатора 1 производится посредством трансформатора 5, подключенного к дросселю 1, выпрямительного моста 6 и обмотки 7.

Переход с режима $U_d = 0 \div 60$ В на режим $U_d = 0 \div 120$ В осуществляется переключением при помощи переключателя 9 мостов 2 с параллельного соединения (рис. 5) на последовательное.

Устройство при номинальном напряжении на входе 220 В и нагрузке на выходе 6 А позволяет, изменяя ток управления дросселя, регулировать напряжение выхода вверх до $U_d = 120$ В даже при снижении напряжения на входе до 180 В. На другом конце диапазона регулировки при повышении напряжения до 240 В достигалось напряжение выхода $U_d = 13,5$ В в режиме холостого хода и практически нулевое напряжение

при нагрузке 200 мА (около 3,5% номинальной нагрузки).

Подобный диапазон регулировки был также достигнут при параллельном соединении выпрямительных мостов и номинальных данных входа $U_d = 0 \div 60$; $I_d = 12$ А. При напряжении входа 127 В были получены те же результаты что и при 220 В.

Внешняя характеристика устройства показана на рис. 1 (кривая 2). Она весьма пологая. При нагрузке 50% от номинальной получается некоторое перекомпаундирование дросселя наложения.

Вес активных материалов устройства получается приблизительно на 20% ниже, чем в автотрансформаторе с плавной регулировкой на ту же мощность.

Конструктивная и технологическая сложность устройств на принципе этой схемы такова как и маломощных трансформаторов. Изготовление их доступно слабо оснащенному предприятию. Все детали могут изготавливаться вне кустов точностей. Устройства не подвержены расстройке, не нуждаются в систематическом уходе, долговечны. Эти их особенности составляют основные достоинства по сравнению с автотрансформаторами с плавной регулировкой. Недостатком описанной схемы по сравнению с плавным регулируемым автотрансформатором со щетным устройством является более низкая себестоимость и к. п. д.

Общий метод оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем

Доктор техн. наук, проф. В. Н. МИЛЬШТЕЙН

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

При проектировании разнообразных электро-механических устройств часто возникает необходимость в определении малых изменений токов и напряжений в линейных и нелинейных электрических цепях.

В общем случае нелинейной электрической цепи малые изменения токов и напряжений могут быть вызваны либо действием малых источников токов и напряжений, либо малыми изменениями характеристик элементов цепи или совместным действием обоих факторов.

Характеристикой элемента цепи мы будем называть зависимость между током в элементе и напряжением на элементе, которую можно считать заданной в аналитическом или графическом виде. Так, для нелинейного сопротивления характеристиками являются выражения $u = \varphi(i)$ и $i = \psi(u)$, где $\varphi(i)$ и $\psi(u)$ мы будем считать непрерывными конечными функциями с непрерывными и конечными производными. Во многих случаях характеристики элементов существенно изменяются при изменении некоторых независимых параметров: $x_1, x_2, \dots, x_n$. Для нелинейного сопротивления, характеристика которого зависит от значения одного независимого параметра¹, связь между i и u удобно выразить в виде функций двух переменных: $u = \varphi_1(i, x)$ и $i = \psi_1(u, x)$.

Малое изменение параметра x вызывает малое изменение характеристики элемента. Например, если характеристика элемента при $x = x_0$ имела вид $u = \varphi_1(i, x_0)$, то в результате изменения x на малую величину Δx :

$$u = \varphi_1(i, x_0 + \Delta x).$$

¹ Рассмотрение более общего случая, когда характеристика элемента зависит не от одного, а от n независимых переменных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ не представляет труда. Мы его не приводим, поскольку для решения интересующих нас вопросов оно не требуется.

Излагается общий метод оценки вариаций токов и напряжений в электрической цепи, появление которых вызвано малыми изменениями характеристик нелинейных сопротивлений индуктивностей и емкостей, входящих в цепь, а также действием малых дополнительных источников тока или э. д. с. в ветвях цепи. Метод основан на применении линейных эквивалентных схем, получаемых из исходной цепи заменой нелинейных и изменяющихся элементов линейными эквивалентными звеньями определенного вида. Ряд примеров иллюстрирует возможности применения метода к разнообразным задачам электротехники.

В данном случае изменением характеристики является величина $\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Delta x$.

Однако, малое изменение характеристики элемента не всегда можно рассматривать, как результат изменения независимых переменных, определяющих вид характеристики.

Часто, например, малые изменения характеристик обуславливаются включением в схему дополнительных элементов, заведомо мало изменяющих токи и напряжения в ветвях. Поэтому, желая в достаточно общем (и вместе с тем удобным для дальнейшего использования) виде отразить возможные изменения характеристик сопротивлений, мы будем пользоваться такой формой записи:

$$u = \varphi_1(i, x_0) + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Delta x + \Delta \varphi_1(i, x_0);$$

$$i = \psi_1(u, x_0) + \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \Delta x + \Delta \psi_1(u, x_0).$$

Аналогичные формы записи приняты для определения малых изменений характеристик нелинейной индуктивности и нелинейной емкости.

В настоящей статье показано, что изменения токов и напряжений в электрических цепях любой структуры (состоящих из линейных или нелинейных элементов), вызываемые действием малых источников токов и э. д. с., а также малыми изменениями характеристик элементов, могут быть определены с помощью специальных эквивалентных схем, составление которых основывается на едином принципе.

Эквивалентные схемы рассматриваемого типа получили достаточно широкое применение при решении некоторых весьма важных, но частных задач в радиотехнике. Их использование лежит в основе теории и расчета электронных усилителей, они применяются также для определения эффекта детектирования «слабых сигналов», для оценки нелинейных искажений при усилении

и т. д. Однако, даже внутри одной области электротехники — радиотехники — эквивалентные схемы составляют всякий раз в связи с той или иной конкретной задачей без указания на общность идеи их построения. Аналогичный метод оценки малых изменений в электрических цепях использовался при расчете измерительных схем [Л. 1, 2], для оценки точности электрических счетнорешающих устройств [Л. 3] и в ряде других областей электротехники, причем в каждом частном случае соответствующие эквивалентные схемы, предназначенные для решения определенной задачи, составлялись вновь.

Формулирование общих принципов построения эквивалентных схем для оценки малых изменений в электрических цепях является важным не только потому, что в свете общих представлений легче уяснить особенности решения известных частных задач, но и потому, что знание общего метода открывает пути для применения эквивалентных схем к анализу новых вопросов. Ряд примеров, рассматриваемых в статье, должен служить иллюстрацией этого положения.

Эквивалентные звенья и общий метод оценки малых изменений в электрической цепи. Связь между током и напряжением для элементов электрической цепи может быть выражена с помощью одной из двух форм записи:

для нелинейного сопротивления

$$u = \varphi_1(i, x), \quad (1)$$

$$i = \psi_1(u, x); \quad (1a)$$

для индуктивности

$$u = \frac{d}{dt} \varphi_2(i, x), \quad (2)$$

$$i = \psi_2(\int u dt, x); \quad (2a)$$

для емкости

$$u = \varphi_3(\int i dt, x), \quad (3)$$

$$i = \frac{d}{dt} \psi_3(u, x). \quad (3a)$$

В выражениях (1) — (3a) u — напряжение; i — ток; x — некоторый независимый параметр.

Если во всех трех случаях происходят небольшие изменения величин u , i и x , а также небольшие вариации φ_1 , ψ_1 , φ_2 , ψ_2 , φ_3 , ψ_3 , то имеют место приближенные равенства²:

$$u = \varphi_1(i, x) + \Delta \varphi_1(i, x).$$

Если напряжение и ток до включения второго сопротивления были равны u_0 и i_0 , то после включения

$$u = u_0 + \Delta u = \varphi_1(i_0 + \Delta i, x) + \Delta \varphi_1(i_0 + \Delta i, x).$$

Пусть, кроме того, имеет место некоторое малое изменение параметра x от величины x_0 до величины $x_0 + \Delta x$.

$$\Delta u \approx \frac{\partial \varphi_1}{\partial i} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} \cdot \Delta i + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} \Delta x + \Delta \varphi_1(i_0, x_0),$$

$$\Delta i \approx \frac{\partial \psi_1}{\partial u} \Big|_{\substack{u=u_0 \\ x=x_0}} \cdot \Delta u + \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \Big|_{\substack{u=u_0 \\ x=x_0}} \Delta x + \Delta \psi_1(u_0, x_0); \quad (1')$$

$$\begin{aligned} \Delta u \approx & \left[\Delta i \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial i} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} + \frac{d \Delta i}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial i} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} \right] + \\ & + \left[\Delta x \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} + \frac{d \Delta x}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} \right] + \\ & + \frac{d}{dt} \Delta \varphi_2(i_0, x_0); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta i \approx & \frac{\partial \psi_2}{\partial \int u dt} \Big|_{\substack{\int u dt = \int u_0 dt \\ x=x_0}} \int \Delta u dt + \\ & + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \Big|_{\substack{\int u dt = \int u_0 dt \\ x=x_0}} \Delta x + \Delta \psi_2(\int u_0 dt, x_0); \end{aligned} \quad (2')$$

$$\begin{aligned} \Delta u \approx & \frac{\partial \varphi_3}{\partial \int i dt} \Big|_{\substack{\int i dt = \int i_0 dt \\ x=x_0}} \int \Delta i dt + \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \Big|_{\substack{\int i dt = \int i_0 dt \\ x=x_0}} \\ & \times \Delta x + \Delta \varphi_3(\int i_0 dt, x_0); \end{aligned} \quad (3')$$

$$\begin{aligned} \Delta i \approx & \left[\Delta u \frac{d}{dt} \frac{\partial \psi_3}{\partial u} \Big|_{\substack{u=u_0 \\ x=x_0}} + \frac{d \Delta u}{dt} \frac{\partial \psi_3}{\partial u} \Big|_{\substack{u=u_0 \\ x=x_0}} \right] + \\ & + \left[\Delta x \frac{d}{dt} \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \Big|_{\substack{u=u_0 \\ x=x_0}} + \frac{d \Delta x}{dt} \frac{\partial \psi_3}{\partial x} \Big|_{\substack{u=u_0 \\ x=x_0}} \right] + \\ & + \frac{d}{dt} \Delta \psi_3(u_0, x_0). \end{aligned} \quad (3a')$$

Взаимосвязь между величинами Δu и Δi , выражаемая равенствами (1') — (3'a), та же, что и для схем „эквивалентных звеньев“ (рис. 1).

В схемах (1'), (2') и (3') действуют источники фиксированного (не зависящего от величин Δu , Δi и параметров схемы) напряжения — э. д. Δe_1 , Δe_2 , Δe_3 :

$$\Delta e_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} \Delta x + \Delta \varphi_1(i_0, x_0); \quad (4)$$

Тогда, пользуясь разложением в ряд, можем написать $u = u_0 + \Delta u = \varphi_1(i_0 + \Delta i, x_0 + \Delta x) + \Delta \varphi_1(i_0 + \Delta i, x_0 + \Delta x) =$

$$= \varphi_1(i_0, x_0) + \Delta i \frac{\partial \varphi_1}{\partial i} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} + \Delta x \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} + \dots$$

$$+ \Delta \varphi_1(i_0, x_0) + \Delta i \frac{\partial \Delta \varphi_1}{\partial i} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} + \Delta x \frac{\partial \Delta \varphi_1}{\partial x} \Big|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} + \dots$$

Пренебрегая членами, содержащими производные функции φ_1 порядка выше первого, и членами, содержащими производные функции $\Delta \varphi_1$ (поскольку эти члены характеризуют малые изменения малых величин), и учитывая, что $\varphi_1(i_0, x_0) = u_0$, приходим к равенству (1').

² Действительно, пусть в соответствии с равенством (1) зависимость напряжения на некотором нелинейном сопротивлении от тока выражается равенством $u = \varphi_1(i, x)$, где x — некоторый физический параметр, например температура. Включим последовательно с этим нелинейным сопротивлением другое — „малое“ нелинейное сопротивление, падение напряжения на котором мало по сравнению с падением напряжения на первом сопротивлении: $\Delta \varphi_1(i, x) \ll \varphi_1(i, x)$. Зависимость напряжения от тока для полученной, таким образом, последовательной цепи, очевидно, выражается равенством:

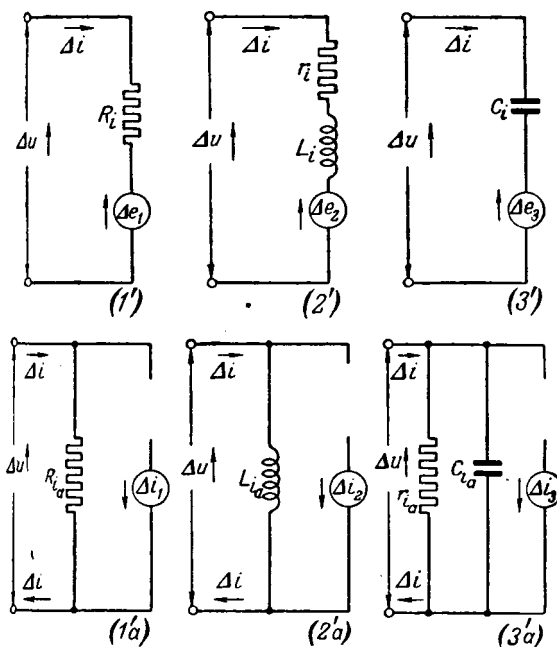


Рис. 1.

$$\Delta e_2 = \Delta x \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(t=t_0)} + \frac{d\Delta x}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(t=t_0)} + \frac{d}{dt} \Delta \varphi_2(i_0, x_0); \quad (46)$$

$$\Delta e_3 = \Delta x \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(\int i dt = \int i_0 dt)} + \Delta \varphi_3(\int i_0 dt, x_0). \quad (4в)$$

Параметры схем (1'), (2') и (3') определяются соответствующих уравнений:

$$R_i = \frac{\Delta u - \Delta e_1}{\Delta i} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial i} \Big|_{(i=i_0)}^{(x=x_0)}; \quad (5a)$$

$$L_i = \frac{\Delta u - \Delta e_2 - r_i \Delta i}{\frac{d\Delta i}{dt}} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial i} \Big|_{(i=i_0)}^{(x=x_0)}; \quad (5б)$$

$$r_i = \frac{\Delta u - \Delta e_2 - L_i \frac{d\Delta i}{dt}}{\Delta i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi_2}{\partial i} \Big|_{(i=i_0)}^{(x=x_0)}; \quad (5в)$$

$$C_i = \frac{\int \Delta i dt}{\Delta u - \Delta e_3} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial (\int i dt)} \Big|_{(x=x_0)}^{(\int i dt = \int i_0 dt)}. \quad (5г)$$

В схемах (1'a), (2'a) и (3'a) действуют источники фиксированного тока (не зависящего от Δu и параметров схемы):

$$\Delta i_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(u=u_0)} \Delta x + \Delta \varphi_1(u_0, x_0); \quad (6a)$$

$$\Delta i_2 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(\int i dt = \int i_0 dt)} \Delta x + \Delta \varphi_2(\int i_0 dt, x_0); \quad (6б)$$

$$\Delta i_3 = \Delta x \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(u=u_0)} + \frac{d\Delta x}{dt} \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \Big|_{(x=x_0)}^{(u=u_0)} + \frac{d}{dt} \Delta \varphi_3(u_0, x_0). \quad (6в)$$

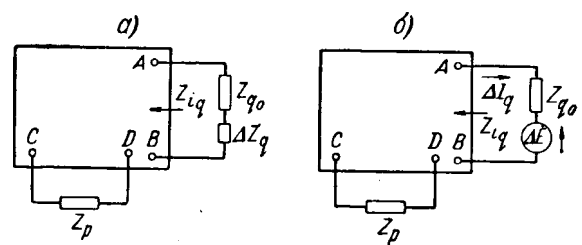


Рис. 2.

Параметры этих схем

$$R_{ia} = \frac{\Delta u}{\Delta i - \Delta i_1} = \frac{1}{\frac{\partial \varphi_1}{\partial i} \Big|_{(i=i_0)}^{(u=u_0)}}; \quad (7a)$$

$$L_{ia} = \frac{\int \Delta u dt}{\Delta i - \Delta i_2} = \frac{1}{\frac{\partial \varphi_2}{\partial (\int i dt)} \Big|_{(x=x_0)}^{(\int i dt = \int i_0 dt)}}; \quad (7б)$$

$$C_{ia} = \frac{\Delta i - \Delta i_3 - \Delta u \frac{1}{r_{ia}}}{\frac{d\Delta u}{dt}} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial u} \Big|_{(u=u_0)}^{(x=x_0)}; \quad (7в)$$

$$r_{ia} = \frac{\Delta u}{\Delta i - \Delta i_3 - C_{ia} \frac{d\Delta u}{dt}} = \frac{1}{\frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi_3}{\partial u} \Big|_{(u=u_0)}^{(x=x_0)}}. \quad (7г)$$

Примеры применения общего метода. Оценка изменений стационарных токов в ветвях линейной цепи, вызываемых малым изменением сопротивления или проводимости одной ветви. Эквивалентная схема (рис. 2,б) получается из исходной цепи (рис. 2,а) заменой изменяющегося элемента эквивалентным звеном (1') рис. 1 и изъятием из цепи всех действующих источников тока и э. д. с. В данном случае мы имеем дело со стационарными значениями синусоидальных токов, и вместо R_i нужно включить комплексное сопротивление Z_{q0} , а вместо Δe величину $\Delta \dot{E} = -I'_q \Delta Z_q$, где I'_q — ток в сопротивлении Z_q до его изменения.

Действительно, напряжение $\dot{U}_q$ между зажимами A и B цепи (рис. 2,а)

$$\dot{U}_q = \varphi_1(I_q Z_q) = I_q Z_q,$$

откуда, пользуясь разложением в ряд, получаем:

$$\Delta \dot{U}_q = I'_q \Delta Z_q + \Delta I_q Z_{q0} + \Delta I_q \Delta Z_q. \quad (8)$$

Кроме того, $\Delta \dot{U}_q = -Z_{iq} \Delta I_q$ (где Z_{iq} — сопротивление, измеренное между зажимами A и B при отключенном Z_q), откуда

$$\Delta I_q = \frac{-I'_q \Delta Z_q}{Z_{iq} + Z_{q0} + \Delta Z_q} = -\frac{I'_q \Delta Z_q}{1 + \frac{\Delta Z_q}{Z_{iq} + Z_{q0}}} \times \frac{1}{Z_{iq} + Z_{q0}}, \quad (9)$$

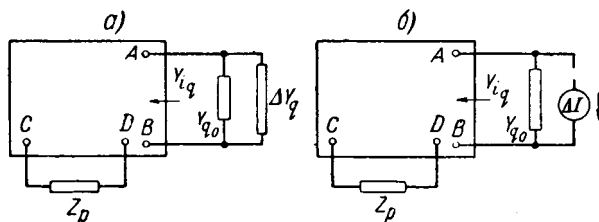


Рис. 3.

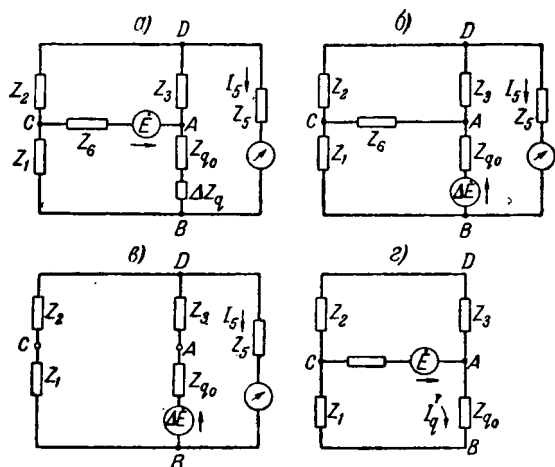


Рис. 4.

Формула (9) дает точное выражение для ΔI_q при любых ΔZ_q . Она может быть получена также применением теоремы эквивалентных э. д. с. М. И. Левина [Л. 5, 7], теорем вариации параметров линейной цепи К. М. Поливанова [Л. 4, 6], или одной из двух известных формулировок принципа компенсации.

Если, следуя изложенному выше общему методу оценки малых изменений в электрической цепи, воспользоваться вместо (8) приближенным равенством

$$\Delta \dot{U}_q \approx I'_q \Delta Z_q + \Delta I_q Z_{q0}, \quad (8a)$$

то в рассматриваемом случае мы приходим к формуле

$$\Delta I_q = - \frac{I'_q \Delta Z_q}{Z_{iq} + Z_{q0}} = - \frac{\Delta E}{Z_{iq} + Z_{q0}}$$

и к эквивалентной схеме (рис. 2, б).

При рассмотрении линейной цепи (рис. 3, а), в которой малое изменение ΔY_q претерпевает проводимость Y_q некоторого элемента, удобно воспользоваться заменой изменяющегося элемента эквивалентным звеном рис. 1, а. Соответствующая эквивалентная схема показана на рис. 3, б, где $\Delta I = \dot{U}'_q \Delta Y_q$ ($\dot{U}'_q$ — напряжение между зажимами А и В при $Y_q = Y_{q0}$).

Определение стационарного тока в измерительной диагонали моста, близкого к состоянию равновесия [Л. 1, 8]. Требуется определить ток I_5 в диагонали моста рис. 4, а. При равновесии моста $Z_q = Z_{q0}$ ($Z_2 Z_{q0} = Z_1 Z_3$) ток I_5 и разность потенциалов между точками D и B

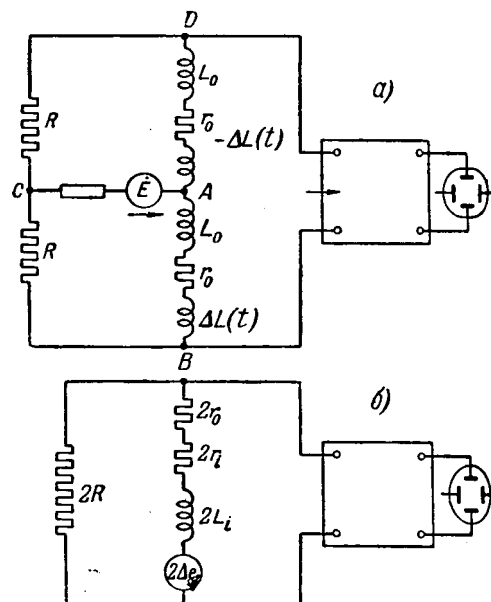


Рис. 5.

равны нулю. Поэтому величина I'_q тока в измеряющемся плече моста до его изменения (при $Z_q = Z_{q0}$) может быть найдена из схемы рис. 4.

Пользуясь общим методом, от цепи рис. 4, а приходим к эквивалентной схеме рис. 4, б. Изменение напряжения между точками С и А этой схемы не вызывает изменения I_5 . Поэтому можно отключить сопротивление Z_6 и прийти к эквивалентной схеме рис. 4, в. ΔE — э. д. с., действующая в этой схеме, равна $I'_q \Delta Z_q$.

Эквивалентные схемы рис. 4, в и 4, г дают новое представление о зависимости тока I_5 от параметров моста [Л. 2].

Изменение токов в линейной цепи с параметрами, изменяющимися во времени. Динамические процессы в индуктивном измерителе малых перемещений. В различных отраслях электротехники используются линейные электрические цепи с модулирующимися параметрами.

Примерами таких цепей являются микрофонные цепи и разнообразные измерители быстроизменяющихся во времени механических перемещений. В тех случаях, когда модуляция параметров неглубока, для оценки изменений токов, ею вызываемых, имеется возможность применить общий метод эквивалентных схем. В этом случае мы имеем в распоряжении удобное и универсальное средство проверки погрешности, как в случае линейных систем с постоянными параметрами. Поэтому область применения метода, принципиально говоря, должна быть определена теоретическим или экспериментальным путем.

Рассмотрим схему индуктивного измерителя вибраций (рис. 5, а). Индуктивности элементов мостовой схемы, включенных между точками D и A и точками A и B, модулируются вибрациями, вследствие чего между точками D и B появляется напряжение, преобразуемое с помощью линейного четырехполюсника (электронного преобразователя) в напряжение, подаваемое между

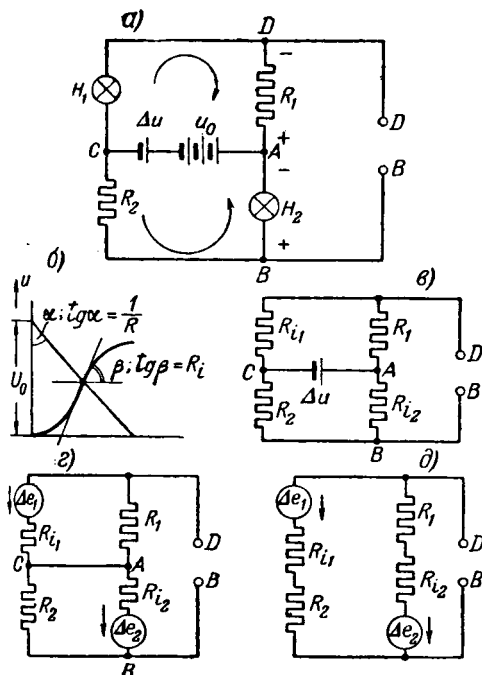


Рис. 6.

пнами электронного осциллографа. Изменения индуктивностей в процессе модуляции считаем малыми.

Построим эквивалентную схему. Для этого заменяем изменяющиеся элементы цепи рис. 5, а эквивалентными звеньями (2') рис. 1 и разрываем диагональ СА моста так же, как мы это делали со схемой рис. 4. В результате приходим к эквивалентной схеме рис. 5, б. Для определения L_i , r_i и Δe обратимся к равенству (2). В нашем конкретном случае

$$= L_0 + \Delta L(t); \quad x_0 = L_0 \quad \text{и} \quad \Delta x = \Delta L(t), \quad \varphi_2(i, x) = [L_0 + \Delta L(t)]i.$$

Согласно (4) и (5)

$$\begin{aligned} \Delta e &= \Delta L(t) \frac{d}{dt} (I_0 \sin \omega t) + \frac{d\Delta L(t)}{dt} (I_0 \sin \omega t) = \\ &= \Delta L(t) \omega I_0 \cos \omega t + \frac{d\Delta L(t)}{dt} I_0 \sin \omega t \\ L_i &= L_0, \quad r_i = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, при достаточно малой глубине модуляции параметра мы имеем возможность определять изменения токов, происходящие в цепи с переменными параметрами с помощью эквивалентной схемы рис. 5, б, содержащей только элементы с постоянными параметрами.

При условии $\omega \Delta L \gg \frac{d\Delta L(t)}{dt}$ э. д. с., выражаемая равенством (9), модулируется по амплитуде в соответствии с законом $\Delta L(t)$.

Определение остаточной неустойчивости напряжения на выходе мостового стабилизатора (рис. 5, а), находящегося в режиме холостого хода. Для приближенной оценки изменения напряжения между точками D и B, вызываемого малым изменением напряжения —

Δu , составляем эквивалентную схему, пользуясь общим методом.

Эквивалентная схема рис. 6, в получается из схемы рис. 6, а в результате замены нелинейных элементов H_1 и H_2 эквивалентными звеньями I' , рис. 1 и исключения напряжения u_0 .

Здесь R_{i1} и R_{i2} — дифференциальные сопротивления, соответствующие $\frac{du}{di}$ в рабочих точках характеристик, определяемых с помощью обычных построений рис. 6, б.

При малых Δu стабилизация получается идеальной, если выполнено условие равновесия моста рис. 6, в:

$$R_{i1} R_{i2} = R_1 R_2.$$

При конечных Δu имеет место эффект остаточной неустойчивости.

Приводимый ниже анализ может рассматриваться, как определение условий применимости эквивалентной схемы рис. 6, в к расчету стабилизатора.

В небольших интервалах изменения токов:

$$\varphi_{11} = R_{i1} \Delta i_1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2 \varphi_{11}}{d\Delta i_1^2} \Delta i_1^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \varphi_{11}}{d\Delta i_1^3} \Delta i_1^3,$$

$$\varphi_{12} = R_{i2} \Delta i_2 + \frac{1}{2!} \frac{d^2 \varphi_{12}}{d\Delta i_2^2} \Delta i_2^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \varphi_{12}}{d\Delta i_2^3} \Delta i_2^3.$$

Будем считать $R_{i1} \Delta i_1$, $R_{i2} \Delta i_2$ — исходными выражениями функций φ_{11} и φ_{12} , а

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2!} \frac{d^2 \varphi_{11}}{d\Delta i_1^2} \Delta i_1^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \varphi_{11}}{d\Delta i_1^3} \Delta i_1^3, \\ &\frac{1}{2!} \frac{d^2 \varphi_{12}}{d\Delta i_2^2} \Delta i_2^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \varphi_{12}}{d\Delta i_2^3} \Delta i_2^3 \end{aligned}$$

изменениями этих функций — $\Delta \varphi_{11}$ и $\Delta \varphi_{12}$.

Для оценки малого изменения напряжения u_{DB} , вызываемого отклонением $\Delta \varphi_{11}$ и $\Delta \varphi_{12}$, будем рассматривать схему рис. 6, в как электрическую цепь, характеристики элементов которой претерпевают небольшие изменения.

Для оценки изменения напряжения u_{DB} , обусловленного этими изменениями, повторно воспользуемся методом эквивалентных схем. В результате приходим к эквивалентной схеме рис. 6, з, где

$$\Delta e_1 = \frac{1}{2!} \frac{d^2 \varphi_{11}}{d\Delta i_1^2} \Delta i_1^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \varphi_{11}}{d\Delta i_1^3} \Delta i_1^3;$$

$$\Delta e_2 = \frac{1}{2!} \frac{d^2 \varphi_{12}}{d\Delta i_2^2} \Delta i_2^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \varphi_{12}}{d\Delta i_2^3} \Delta i_2^3,$$

Δi_1 и Δi_2 определяется на основании схемы рис. 6, в

$$\Delta i_1 = \frac{\Delta u}{R_{i1} + R_1}; \quad \Delta i_2 = \frac{\Delta u}{R_{i2} + R_2}.$$

Разрывая диагональ СА, преобразуем схему рис. 6, з в схему рис. 6, д, на основании которой

$$\Delta u_{DB} = - \frac{\Delta e_1 (R_1 + R_{i2}) + \Delta e_2 (R_2 + R_{i1})}{R_1 + R_2 + R_{i1} + R_{i2}}.$$

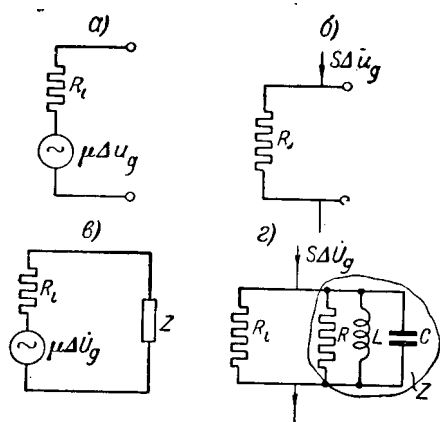


Рис. 7.

Двухкратным применением метода, излагаемого в настоящей статье, можно также оценить остаточную нестабильность напряжения на выходе нагруженного стабилизатора. Мы ограничимся рассмотрением режима холостого хода, стремясь к краткости изложения.

Эквивалентные схемы электронных усилителей малых напряжений. Анодный ток лампы i_a является функцией анодного напряжения u_a и напряжения на сетке u_g . С равным правом мы можем рассматривать u_a как функцию i_a и u_g :

$$i_a = \psi_1(u_a, u_g) \quad \text{или} \quad u_a = \varphi_1(i_a, u_g).$$

Соответственно для оценки изменения анодного тока и анодного напряжения, вызванного малым изменением напряжения на сетке, рассматриваемого как независимый параметр x , пользуясь общим методом построения эквивалентных схем, можем заменить лампу эквивалентным звеном (1') или эквивалентным звеном (1'а) рис. 1.

Эти эквивалентные звенья широко используются при расчете разнообразных усилителей малых напряжений. Так, звено вида рис. 7, а обычно применяется при составлении эквивалентных схем апериодических усилителей рис. 7, в, а звено вида рис. 7, б часто используется в эквивалентных схемах каскадов резонансных усилителей рис. 7, г.

В существующей литературе эквивалентные схемы электронных усилителей строятся на основании уравнения

$$= \frac{\partial i_a}{\partial u_g} \Delta u_g + \frac{\partial i_a}{\partial u_a} \Delta u_a.$$

Пользуясь этим выражением и принимая во внимание, что

$$SR_i = \mu \left(\frac{\partial i_a}{\partial u_g} \frac{\partial u_a}{\partial i_a} \right) = \frac{\partial u_a}{\partial u_g},$$

авторы приходят после составления уравнения Кирхгофа для анодной цепи к равенству

$$\Delta i_{am} = \frac{\mu \Delta \dot{U}_{gm}}{R_i + Z} \dot{U}_{gm}.$$

Справедливость этого равенства служит основанием для использования схемы рис. 7, в. К

схеме рис. 7, г приходят, доказывая ее эквивалентность схеме рис. 7, в. Пользуясь общим методом, изложенным в настоящей статье, мы составляем обе эквивалентные схемы непосредственно без каких бы то ни было дополнительных рассуждений.

Оценка чувствительности схем с фотоэлементами, электронных измерителей переменный и температуры. Большое распространение получили нелинейные электрические сопротивления, характеристики которых изменяются при изменении тех или иных физических факторов. Такими сопротивлениями являются фотоэлементы, электронные приборы для измерения температур или давлений (диоды, характеристики которых меняются при изменении температуры катода или расстояния между электродами). Рассматривая измеряемую величину (световой поток, температуру, давление) как параметр, получаем для характеристики таких элементов следующие возможные формы записи:

$$u = \varphi_1(i, x) \quad \text{или} \quad i = \psi_1(u, x).$$

Для оценки малых изменений токов и напряжений в схеме, вызываемых малыми изменениями величины x , естественно воспользоваться общим методом эквивалентных схем.

Оценка эффектов, обусловленных слабо выраженной нелинейностью рабочих участков характеристик электронных ламп. Формулы и эквивалентные схемы этого раздела известны. Однако, существующие доказательства их справедливости имеют частный характер. Здесь рассматриваются как примеры применения общего метода. Характеристика сопротивления со слабо выраженной нелинейностью может быть представлена в форме

$$u = \frac{du}{di} i + \frac{1}{2!} \frac{d^2u}{di^2} i^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3u}{di^3} i^3$$

или

$$i = \frac{di}{du} u + \frac{1}{2!} \frac{d^2i}{du^2} u^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3i}{du^3} u^3.$$

В равенстве (А) будем считать:

$$\varphi_1(i) = \frac{du}{di} i, \quad \Delta \varphi_1(i) = \frac{1}{2!} \frac{d^2u}{di^2} i^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3u}{di^3} i^3.$$

В равенстве (Б):

$$\psi_1(u) = \frac{di}{du} u \quad \text{и} \quad \Delta \psi_1(u) = \frac{1}{2!} \frac{d^2i}{du^2} u^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3i}{du^3} u^3.$$

Для оценки изменений токов и напряжений в электрической цепи, обусловленных малой нелинейностью, можем воспользоваться общим методом, заменяя нелинейное сопротивление эквивалентным звеном 1' или 1'а (рис. 1).

В частности, для определения результата детектирования малого напряжения $u = u_m \cos \omega t$ осуществляемого в схеме рис. 8, а, можем воспользоваться эквивалентной схемой рис. 8, б или эквивалентной схемой рис. 8, в.

Если сопротивление конденсатора переменного тока можно считать пренебрежимо малым, то

ковании эквивалентной схемы рис. 8, б приходим к формуле:

$$u_{CB} = \frac{\Delta E \cdot R}{R_i + R} = \frac{\frac{1}{4} \frac{d^2 u}{di^2} I_m^2 R}{\frac{du}{di} + R}$$

ΔE — среднее значение величины Δe_1 за период, где u_{CB} — постоянное напряжение между точками C и B (результат детектирования), а $I_m = \frac{u_m}{\frac{du}{di}}$.

Аналогичным образом производится оценка линейных искажений усилителя, обусловленных нелинейностью рабочего участка характеристики $u_a = \varphi(i_a, u_g)$.

Метод эквивалентных схем здесь применяется дважды. При первом его применении мы получаем эквивалентную схему для оценки полезного эффекта усиления (рис. 8, д), без учета постоянства величин $\frac{du_a}{di_a}(R_i)$ и $\frac{du_a}{du_g}(\mu)$ в рабочей области.

Для определения нелинейных искажений применим формулу для Δu_a :

$$\Delta u_a = \frac{\partial u_a}{\partial i_a} \Delta i_a + \frac{\partial u_a}{\partial u_g} \Delta u_g + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u_a}{\partial i_a^2} \Delta i_a^2 + \frac{\partial^2 u_a}{\partial i_a \partial u_g} \Delta i_a \Delta u_g + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u_a}{\partial u_g^2} \Delta u_g^2 + \dots$$

Рассматривая сумму двух первых членов этого ряда, как выражение $\Delta u_0 = \varphi'_1(\Delta i_a, \Delta u_g)$, а сумму остальных, как $\delta \varphi'_1(\Delta i_a, \Delta u_g)$, и применяя для оценки нелинейных искажений общий метод, приходим к эквивалентной схеме рис. 8, е, где

$$\Delta e_1 = \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u_a}{\partial i_a^2} \Delta i_a^2 + \frac{\partial^2 u_a}{\partial i_a \partial u_g} \Delta i_a \Delta u_g + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u_a}{\partial u_g^2} \Delta u_g^2 + \dots$$

Δe_1 находится из схемы рис. 8, д, как $\Delta i_a = \frac{\Delta u_g}{R_i + R}$.

Применение метода в теории детекторных вольтметров с сухими выпрямителями. Рассмотрим схему детекторного вольтметра, представленную на рис. 9, а.

Будем исходить из предположений, что: а) сопротивление R_g выбрано настолько большим, что максимальное мгновенное падение напряжения на этом сопротивлении значительно больше максимального значения напряжения между точками a и b схемы; б) максимальное значение токов в проводящих выпрямителях значительно больше максимальных значений токов в запертых выпрямителях; в) характеристики всех четырех выпрямителей в направлении проводимости при разных температурах графически выражаются

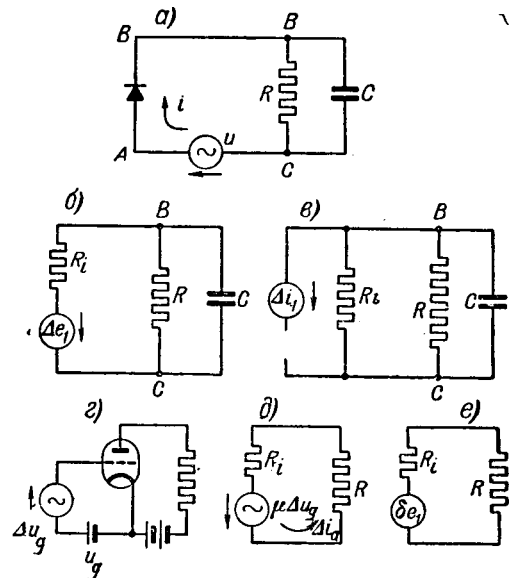


Рис. 8.

кривыми рис. 9, д и формулой $u_{np} = \Delta \varphi(i_{np}, \Theta^\circ)$, а характеристики в обратном направлении кривыми рис. 9, е и формулой $i_{обр} = \Delta \psi(u_{обр}, \Theta^\circ)$.

Требуется определить изменение постоянной составляющей тока в гальванометре при изменении температуры от Θ_1^0 до Θ_2^0 при измерении синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$.

В течение полупериода открытого состояния выпрямителей ток в гальванометре равен в первом приближении $i_0 = \frac{u}{R_g}$ (сопротивление проводящих выпрямителей считаем равным нулю, а запертых — бесконечности).

Количество электричества, проходящее за это время через гальванометр

$$Q_0 = \int_0^{\frac{T}{2}} i_0 dt = \frac{T}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R_g}.$$

Для оценки изменения тока, обусловленного наличием сопротивления у проводящих выпрямителей и проводимости у запертых, используем общий метод эквивалентных схем, заменяя проводящие выпрямители эквивалентными звеньями I' , а запертые звеньями $I' a$ (рис. 1). Таким образом, от электрической цепи рис. 9, а мы приходим к эквивалентной схеме рис. 9, б. Здесь

$$\Delta e_1 = \Delta \varphi(i_0 \Theta^0); \Delta i_1 = \Delta \psi \{ \Delta \varphi(i_0, \Theta^0) + r_0 [1 + \alpha(\Theta^0 - \Theta_0^0)] i_0 \},$$

$$R_i = \frac{\partial \varphi}{\partial i},$$

где Θ^0 — температура;

Θ_0^0 — начальная температура;

r_0 — сопротивление рамки гальванометра при $\Theta^0 = \Theta_0^0$;

α — температурный коэффициент сопротивления провода рамки.

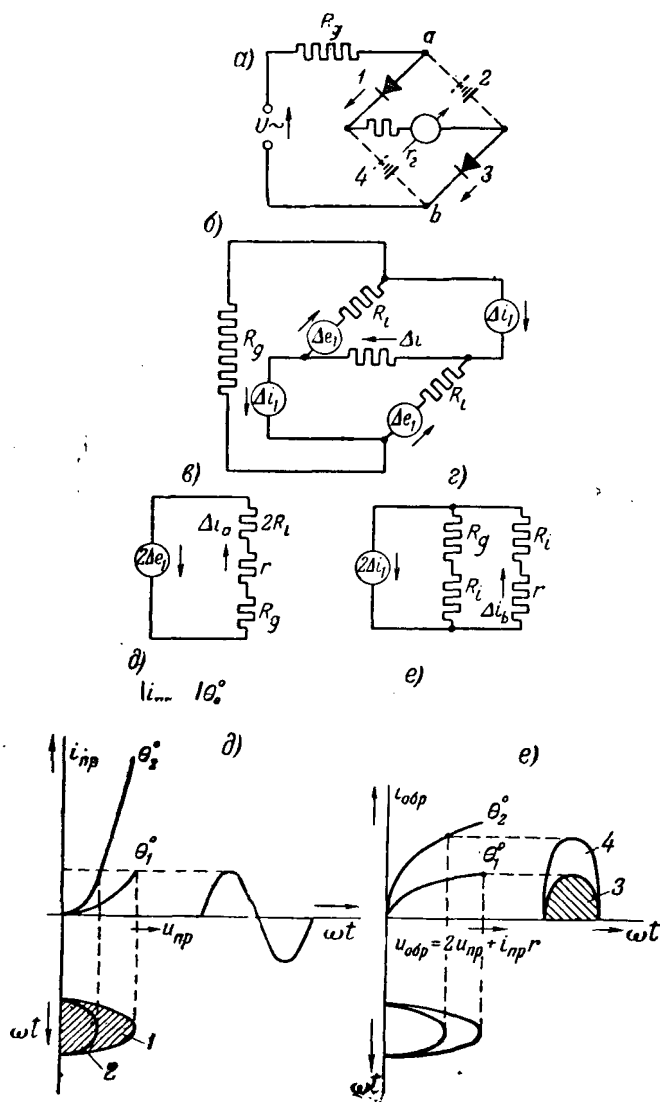


Рис. 9.

Учитывая, что эквивалентный источник тока Δi_1 обладает бесконечным внутренним сопротивлением, можно на основании принципа суперпозиции представить изменение тока в приборе Δi в виде суммы $\Delta i = \Delta i_a + \Delta i_b$, где Δi_a и Δi_b определяются соответственно из двух эквивалентных схем рис. 9, в и 9, г.

Принимая во внимание, что $2R_i + r \ll R_g$, и $R_i + r \ll R_g + R_p$, приходим к формуле

$$\Delta i = \Delta i_a + \Delta i_b = 2 \frac{\Delta \varphi(i_0, \Theta^0)}{R_g} + + 2\Delta\psi \left\{ \Delta\varphi(i_0, \Theta^0) + r_0[1 + \alpha(\Theta^0 - \Theta_0^0)]i_0 \right\}.$$

На протяжении рассматриваемого полупериода через гальванометр пройдет дополнительное количество электричества

$$\Delta Q_\Theta = \int_0^{T/2} \Delta i dt = \frac{2}{R_g} \frac{T}{2\pi} \int_0^\pi \Delta \varphi \left[\frac{U_m}{R_g} \sin \omega t, \Theta^0 \right] d\omega t +$$

$$+ 2 \frac{T}{2\pi} \int_0^\pi \Delta \psi \left\{ \Delta \varphi \left[\frac{U_m}{R_g} \sin \omega t, \Theta^0 \right] + + \frac{U_m}{R_g} \sin \omega t r_0 [1 + \alpha(\Theta^0 - \Theta_0^0)] \right\} d\omega t.$$

При любой заданной температуре величины ΔQ_Θ может быть определена графически, или аналитически, если воспользоваться аппроксимацией вольтамперных характеристик выпрямителей.

Так, при температуре $\Theta^0 = \Theta_1^0$ она определяется величиной заштрихованных площадей рис. 9, д и 9, е.

Относительное изменение постоянного тока в гальванометре, обусловленное изменением температуры, можно найти как

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta Q_{\Theta_2} - \Delta Q_{\Theta_1}}{Q_{\Theta_0}}.$$

Заключение. Количество примеров, иллюстрирующих эффективность применения общего метода оценки малых изменений в электрических цепях, можно было бы увеличить. Расчет разнообразных модуляторов преобразователей частоты, стабилизаторов тока и напряжения, теории многих измерительных устройств и дистанционных передач, определение моментов, возникающих при малых отклонениях различных электро-механических систем от состояния статического [Л. 9] или динамического равновесия, теория магнитных усилителей слабых сигналов, оценки эффектов, обусловленных нелинейностью характеристик трансформаторов и электрических машин, количественное определение неустойчивости частоты и амплитуды колебаний в автокоммутационных системах и ряд других задач может быть решен с помощью наглядных эквивалентных схем, составляемых по общему методу.

Литература

1. В. Н. Мильштейн. Автоматика и телемеханика № 2, 1940.
2. Ф. Е. Темников и Р. Р. Харченко. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1944.
3. М. Л. Быховский. Изв. Академии наук СССР, Отд. техн. наук, № 8, 1948.
4. К. М. Поливанов. Теорема вариации параметров линейной электрической цепи. Электричество, № 1946.
5. М. И. Левин. Общие свойства измерительных схем. Электричество, № 2, 1946.
6. К. М. Поливанов. Теорема вариации для параметров электрической цепи. Электричество, № 7, 1946.
7. М. И. Левин. Методы расчета электроизмерительных схем. Электричество, № 7, 1947.
8. В. Н. Мильштейн. Электричество, № 4, 1941.
9. В. Н. Мильштейн. ЖТФ, № 4—5, 1945.

Об уравнениях четырехполюсника, включенного в сложную электрическую цепь*

Кандидат техн. наук, доц. Г. Е. ПУХОВ

Львовский политехнический институт

Иногда полагают [Л. 3-5], что электрическое состояние линейного пассивного четырехполюсника вполне определяется следующими известными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Это не совсем так. При использовании уравнений (1) следует учитывать, что вывод их делается применительно к случаю, когда только две стороны четырехполюсника являются рабочими [Л. 1]. По терминологии А. А. Харкевича соотношения (1) являются уравнениями двустороннего преобразователя [Л. 2]. При включении же четырехполюсника в сложную схему

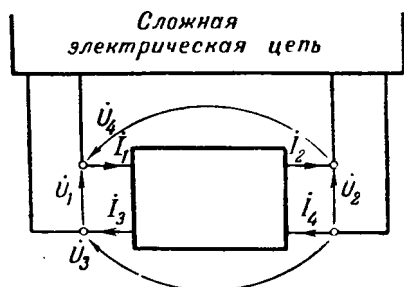


Рис. 1.

рис. 1) заранее нельзя утверждать, что прохождение энергии совершается только через две стороны четырехполюсника. Поэтому приведенная система уравнений в ряде случаев теряет свое значение и должна быть заменена другой, более общей. Коэффициенты уравнений (1), которые при наличии двух рабочих сторон являются функциями исключительно тех элементов, из которых собран четырехполюсник,

Доказывается, что применяемый иногда метод расчета сложных электрических цепей, состоящих из четырехполюсников, страдает существенным и принципиальным недостатком, заключающимся в том, что в основу его положены исходные уравнения, в общем случае не отражающие физического состояния четырехполюсника. Указано, что для решения задачи в общем виде необходимо состояние каждого из четырехполюсников описывать тремя независимыми уравнениями, которые могут быть записаны в виде общего линейного соотношения. Применение этого соотношения иллюстрировано на примере параллельного соединения двух четырехполюсников.

будут, вообще говоря, зависеть и от внешней цепи. Так, для схемы, состоящей из двух параллельно соединенных четырехполюсников (рис. 2), уравнения, записанные в форме (1), получаются в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \\ &+ \left(Z_1 + Z_2 \frac{Z_4 Z_1 + Z_3}{Z_3 Z_2 + Z_4} \right) \dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2, \end{aligned} \quad (2)$$

отсюда

$$A = 1, \quad B = Z_1 + Z_2 \frac{Z_4 Z_1 + Z_3}{Z_3 Z_2 + Z_4}, \quad C = 0 \text{ и } D = 1.$$

Коэффициент B зависит теперь от сопротивлений Z_3 и Z_4 , находящихся вне четырехполюсника. Из рис. 2 видно и то, что уравнения (2) действительно не дают полного представления о рассматриваемой части цепи, так как не содержат тока $\dot{I}_3$, который может и не равняться току $\dot{I}_1$.

Для однозначного определения электрического состояния четырехполюсного устройства необходимо иметь по крайней мере три независимых уравнения. Эти уравнения в общем виде можно записать в виде линейного соотношения

$$\bar{y} = a \bar{x}, \quad (3)$$

где $\bar{y} = (y_1, y_2, y_3)$ и $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$ — трехмерные векторы, компоненты которых y_i и x_i являются не-

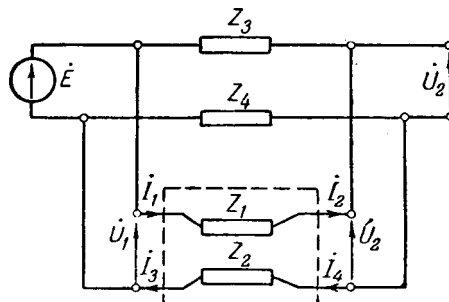


Рис. 2.

* После сдачи статьи в печать нам стало известно, что некоторые ее положения были высказаны Э. В. Зелянским еще в 1931 г., в издававшемся тогда журнале «Вестник электротехники», где, кроме того, были указаны конкретные цепи, для которых являются справедливыми рассужденные формулы, приводимые в работах Р. Фельдткелера, Б. П. Асеева и других авторов.

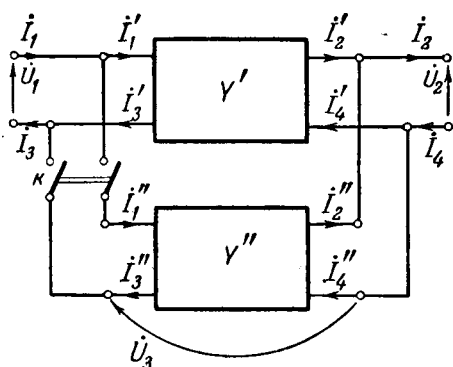


Рис. 3.

зависимыми линейными комбинациями напряжений и токов четырехполюсника (рис. 1), а α представляет собой некоторую девятиэлементную матрицу. Токи i_1 , i_2 , i_3 и i_4 и напряжения U_1 , U_2 , U_3 , U_4 не являются независимыми, а подчиняются условиям¹.

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0,$$

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_4 = 0. \quad (4)$$

Целесообразность выбора в качестве компонент векторов $\bar{y}$ и $\bar{x}$ тех или иных величин зависит от условий задачи, которую необходимо решать. Мы здесь на подобном выборе останавливаться не будем. Заметим лишь, что, если $\bar{y}$ и $\bar{x}$ взять в виде:

$$\bar{y} = (i_1, i_2, i_3), \quad \bar{x} = (U_1, U_2, U_3), \quad (5)$$

то общая зависимость (3) будет эквивалентна системе уравнений:

$$\begin{aligned} i_1 &= Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3, \\ i_2 &= Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3, \\ i_3 &= Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3. \end{aligned} \quad (6)$$

При каком-либо ином выборе компонент векторов (5) уравнения (6) соответственно изменятся, но число их в общем случае должно быть равно трем, и может быть сведено до двух лишь при наличии в дополнение к зависимостям (4) каких-либо иных связей. Эти связи могут быть обусловлены как внутренней, так и внешними схемами.

Для трансформатора, например, уравнения (1) часто будут иметь место, так как для него, вследствие особенностей внутренней схемы, кроме (4), обычно можно считать, что² $i_1 = i_3$.

Приведенные соображения довольно очевидны. Тем более разительным является тот

факт, что они не всегда учитываются. Примером может служить способ расчета сложных цепей, используемый в радиотехнике [Л. 3, 4], на ошибочность результатов которого для ряда конкретных схем автору указал Р. А. Воронов.

В ходе расчета по этому методу, основанному на применении уравнений (1), оперируют с матрицами четырехполюсников, входящих в сложную схему, причем считается, что элементы матриц суть величины, не зависящие от способа соединения отдельных четырехполюсников. Тем самым скрытым образом не учитывается показанная выше зависимость коэффициентов уравнений (1) от параметров присоединяемой цепи. Коэффициенты уравнений четырехполюсника не будут зависеть в общем случае от внешней цепи, лишь когда число уравнений, причем независимых, будет равно трем.

Рассмотрим, например, схему параллельного соединения двух четырехполюсников (рис. 3). Б. П. Асеев и некоторые другие авторы [Л. 3, 4] считают возможным для такого соединения применять уравнения, которые в соответствии с нашими обозначениями можно записать так:

$$\begin{bmatrix} i_1' \\ i_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{12}' & Y_{13}' \\ Y_{21}' & Y_{22}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1' \\ U_2' \end{bmatrix} = Y' \begin{bmatrix} U_1' \\ U_2' \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_1'' \\ i_2'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{12}'' & Y_{13}'' \\ Y_{21}'' & Y_{22}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1'' \\ U_2'' \end{bmatrix} = Y'' \begin{bmatrix} U_1'' \\ U_2'' \end{bmatrix},$$

где Y' и Y'' — матрицы проводимости параллельно соединенных четырехполюсников. Элементы Y_{ik}' и Y_{ik}'' определяются без учета внешней по отношению к каждому из четырехполюсников цепи.

В свете изложенного ясно, что без специальных оговорок, вроде допущения равенств $i_1' = i_3'$, $i_1'' = i_3''$, $U_3 = 0$ и т. п., этого делать нельзя. Коэффициенты Y_{ik} будут зависеть от того, включен рубильник или нет, а если в дополнение к этому нельзя считать, что $i_1 = i_3$, то Y_{ik} будут зависеть еще и от параметров всей остальной цепи. Сами уравнения (7) теряют свою общность и универсальность.

Для замены схемы рис. 3 эквивалентным четырехполюсником необходимо воспользоваться уравнениями (6) или какими-либо их линейными комбинациями. Матрица проводимости эквивалентного четырехполюсника получится тогда в виде:

$$Y = Y' + Y'' = \begin{bmatrix} Y_{11}' + Y_{11}'', & Y_{12}' + Y_{12}'', & Y_{13}' + Y_{13}'' \\ Y_{21}' + Y_{21}'', & Y_{22}' + Y_{22}'', & Y_{23}' + Y_{23}'' \\ Y_{31}' + Y_{31}'', & Y_{32}' + Y_{32}'', & Y_{33}' + Y_{33}'' \end{bmatrix},$$

где Y_{ik}' и Y_{ik}'' , конечно, не равны элементам обычных матриц, входящих в (7).

¹ Мы предполагаем, что четырехполюсник с внешней цепью не имеет иных связей, кроме тех, которые обусловлены его зажимами, включенными в схему.

² Если учитывать междообмоточную емкость, то (при наличии обратных связей) условие $i_1 = i_3$, в общем случае, написать нельзя.

При других способах соединения четырехполюсников (последовательном, цепочечном или частичном и т. п.) указанные авторы вместо уравнений (7) применяют иные соотношения, однако все, используемые ими зависимости являются следствиями уравнений (1). Правда, В. Зелях [Л. 6] указывает, что выводимые им выражения являются справедливыми лишь при условии для каждого из четырехполюсников, входящих в сложную схему равенства $I_1 = I_3$. Однако, совершенно очевидно, что, не проделав ответственного расчета, только в исключительных случаях, например при наличии трансформаторов, можно заранее утверждать, что равенство $I_1 = I_3$ имеет место.

В дополнение к сказанному следует отметить, что в известной статье Х. Ф. Фазылова [Л. 5], в которой рассматриваются многократозамкнутые контуры, составленные из четырехполюсников, автор не отмечает, что предлагаемые им аналитические зависимости не носят общего характера и могут применяться лишь для тех

частных случаев, когда состояние каждого из четырехполюсников при их совместной работе может быть описано двумя уравнениями.

Из изложенного следует сделать тот вывод, что, применяя уравнения (1) или их какие-либо следствия, в каждом конкретном случае следует убедиться в том, что только две стороны четырехполюсника являются рабочими.

В противном случае надо пользоваться общей зависимостью (3), конкретизировав ее применительно к решаемой задаче.

Литература

1. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники, т. II, 1943.
2. А. А. Харкевич. Теория преобразователей, 1948.
3. R. Feldtkeller. Vierpoltheorie, 1943.
4. Б. П. Асеев. Основы радиотехники, 1947.
5. Х. Ф. Фазылов. Обобщение метода контурных уравнений. Электричество, № 8, 1948.
6. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейного четырехполюсника. Автоматика и телемеханика, № 2, 1949.

[23. 9. 1949]



Экспериментальное определение кривой изменения среднего тока

Кандидат техн. наук, доц. В. Е. БОГОЛЮБОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В цепях переменного тока при переходных процессах (в частности, при различных колебаниях) среднее значение тока за период, так называемый «средний ток»

$$I_{cp} = \int_{-\pi}^{+\pi} i d\vartheta \quad (\text{где } \vartheta = \omega t),$$

который оказывается отличным от нуля. Во многих случаях бывает важно знать величину этого среднего значения, которое трудно непосредственно установить экспериментально ввиду наличия значительно более интенсивной основной гармонической составляющей.

В частности, как было установлено автором [2, 3], при всяком изменении напряжения на обмотках подмагниченного дросселя в определенном контуре возникает средний ток. В случае, если обмотки переменного тока подмагниченного дросселя соединены параллельно, средний ток возникает в контуре, образованном этими обмотками.

В упомянутых работах [Л. 2, 3] показано, что зависимость среднего тока от времени наиболее полно и всесторонне характеризует так называемый

В ряде случаев представляет интерес выделение медленно меняющейся слагающей переменного тока. Предлагается прибор для записи зависимости этой слагающей от времени, а также способ получения той же зависимости при помощи любого регистрирующего магнитоэлектрического прибора.

ваемые квазирелаксационные колебания, возникающие в том случае, если такой дроссель соединить последовательно с конденсатором. На рис. 1 представлена снятая обычным

вибратором осциллограмма тока в одной из параллельно включенных обмоток переменного тока дросселя, так называемого частичного тока (i').

Возникает вопрос, какие способы можно предложить для определения зависимости среднего тока от времени. Самый естественный и вместе с тем самый трудоемкий способ состоит в планировании кривой частичного тока и определении его среднего значения за каждый период сетевого напряжения. Именно так и была впервые построена кривая зависимости среднего

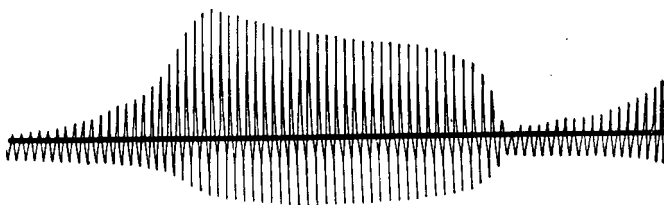


Рис. 1.

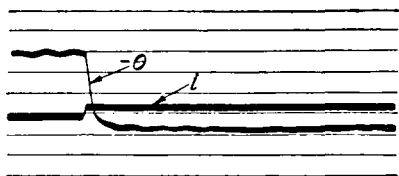


Рис. 2.

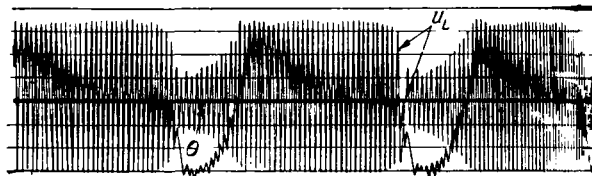


Рис. 3.

тока от времени. Однако, этот способ страдает существенными недостатками. Во-первых, необходимо снимать кривую частичного тока по времени в достаточно больших масштабах, чтобы было возможно произвести планиметрирование. Во-вторых, процесс планиметрирования кривой и подсчета среднего тока представляется делом достаточно кропотливым. Оба эти недостатка усугубляются тем, что период изменения среднего тока часто измеряется десятками секунд, причем планиметрирование полуволн за каждую сотую долю секунды должно быть выполнено с достаточной точностью. При этом надо учесть, что важно проследить, как зависит кривая $I_{cp}(t)$ от целого ряда величин: от переменного напряжения, от тока подмагничивания и др.

Из всего сказанного ясно, насколько желательно создать простой и достаточно точный прибор для определения зависимости среднего тока от времени. Выбор параметров такого прибора следует делать, исходя из условия, что период собственных колебаний подвижной системы прибора должен быть много больше периода основной синусоиды измеряемого тока и много меньше периода колебаний среднего тока.

Наиболее простое решение поставленной задачи удалось получить следующим образом. К зеркалу обычного магнито-электрического вибратора (сзади) была приклеена шеллаком хорошо отбалансированная полоска свинца¹, и удалось получить систему с заданной частотой собственных колебаний (баллистический или инерционный вибратор). Осциллограмма $\theta(t)$, снятая при помощи такого вибратора при включении его на постоянное напряжение, представлена на рис. 2 (кривая θ). На том же рис. 2 показана осциллограмма отклонения обычного вибратора, включенного последовательно с первым (кривая i).

На рис. 3 изображены: осциллограмма напряжения на зажимах дросселя, снятая обычным вибратором (кривая U_L), и осциллограмма частичного тока, снятая при помощи баллистического вибратора (кривая θ)².

Сопоставляя рис. 2 и 3, мы видим,³ что период собственных колебаний баллистического

вибратора оказался приблизительно в 7 раз больше периода основной синусоиды измеряемого тока и приблизительно в 7 раз меньше периода колебаний среднего тока.

Для получения кривой среднего тока проведем среднюю линию той же кривой θ , не учитывая вибраций этой кривой с частотой сетки. Для проверки точности этого метода был проведен следующий эксперимент. Кривая исследуемого тока осциллографировалась в большом масштабе, производилось планиметрирование кривой за каждый период, после чего строилась кривая зависимости среднего тока от времени. Сопоставление полученной кривой со средней линией кривой θ показало, что эти кривые при данных скоростях изменения среднего тока расходятся лишь очень незначительно. Наибольшая приведенная погрешность при измерении среднего тока баллистическим вибратором оказалась меньше 5%.

Итак, баллистический вибратор оказался прибором, вполне пригодным для решения поставленной выше задачи. Для оценки погрешности, вносимых баллистическим вибратором, нет необходимости производить планиметрирование кривой исследуемого тока; для этой цели можно воспользоваться графическим способом, изложенным ниже. Если нет возможности изготовить этот специальный прибор, то можно пользоваться любым регистрирующим магнитоэлектрическим прибором, но к его показаниям следует вносить поправки. Ниже будет изложен способ внесения поправок, предложенный автором, вытекающий из анализа дифференциального уравнения движения системы магнитоэлектрического прибора.

Уравнение движения системы магнитоэлектрического прибора в каноническом виде будет [Л. 1]:

$$\theta'' + 2\alpha\theta' + \theta = iS_i, \quad (1)$$

где θ — угол отклонения подвижной системы;
 θ' и θ'' — первая и вторая производные по времени $\tau = \frac{2\pi t}{T}$;

α — степень затухания (при критическом затухании $\alpha = 1$);

S_i — чувствительность на постоянном токе

(при $\theta' = \theta'' = 0$, $S_i = \frac{\theta}{i}$);

T — период собственных колебаний подвижной системы.

Для определения параметров, входящих в это уравнение, необходимо прежде всего снять кривую

¹ Параметры вибратора до переделки были: 1) частота собственных колебаний 5 100 гц; 2) чувствительность 0,29 мм/мм; 3) допустимый ток 90 ма. Момент инерции вибратора до переделки около $2,2 \cdot 10^{-8}$ г·см², момент инерции вибратора после переделки около $7,8 \cdot 10^{-3}$ г·см².

² Общая нулевая линия кривых U_L и θ показана на осциллограмме.

³ Масштаб по оси абсцисс для этих осциллограмм одинаков.

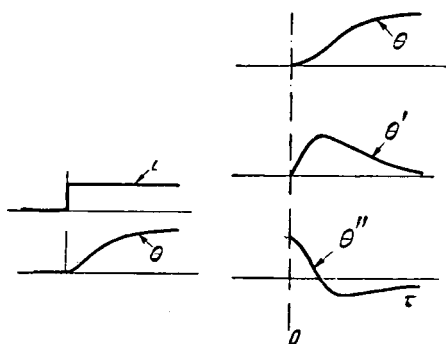


Рис. 4.

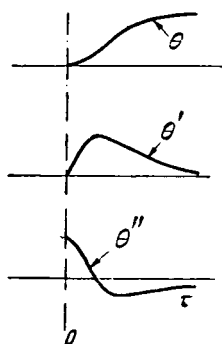


Рис. 5.

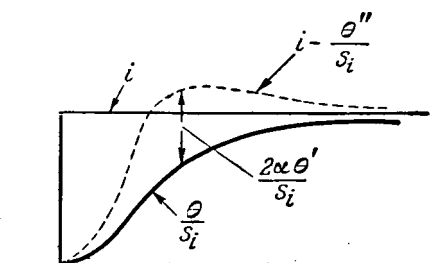


Рис. 6.

по собственным колебаниям магнитоэлектрического прибора, что дает возможность установить масштаб для τ . Затем следует получить кривую отклонения магнитоэлектрического прибора $\theta(\tau)$ при включении его на постоянное напряжение (рис. 4).

По этой кривой можно графически построить зависимости $\theta'(\tau)$ и $\theta''(\tau)$ (рис. 5).

Величина θ'' в момент $\tau=0$ определяет масштаб S_i :

$$\theta''_0 = i S_i.$$

Вычитая из i значения $\frac{\theta''}{S_i}$, получаем кривую, изображенную на рис. 6 пунктиром. Разность между пунктирной кривой и кривой $\frac{\theta}{S_i}$, являющаяся $2\alpha \frac{\theta'}{S_i}$, позволяет определить величину 2α .

Зная величины S_i и 2α , можно по любой кривой $\theta(t)$ (осциллограмма) получить кривую i по уравнению (1). Для этого нужно лишь предварительно (графически) определить кривые θ' и θ'' .

Используя описанный прием, мы можем принципиально по показаниям любого магнитоэлектрического прибора построить кривую среднего тока. Величина поправок к кривой среднего тока, записанной прибором, определяется, кроме той кривой, еще кривой отклонения прибора при включении его на постоянное напряжение. Сопоставление этих двух кривых позволяет судить о величине поправок, которые следует вносить в том или другом частном случае.

Рассмотрим некоторые примеры.

Для получения кривой изменения среднего тока может быть использован обычный регист-

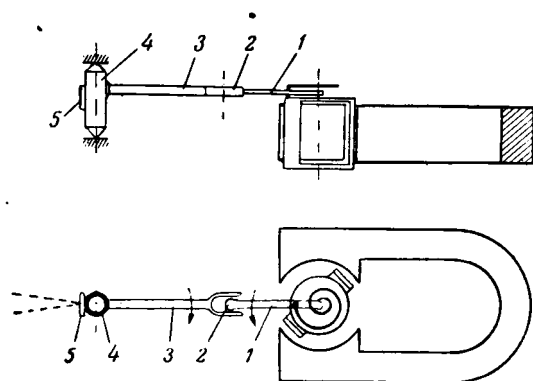


Рис. 7.

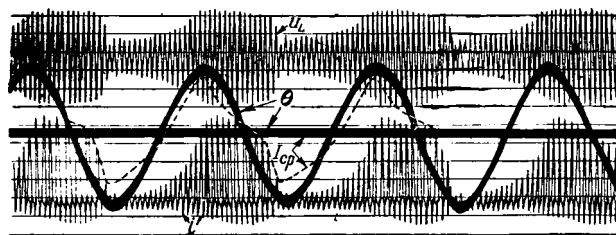


Рис. 8.

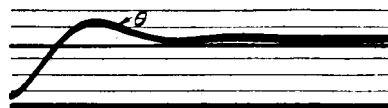


Рис. 9.

рирующий магнитоэлектрический амперметр. Нами для этой цели был использован прибор, схема устройства которого показана на рис. 7. На месте стрелки обычного щитового амперметра на один ампер был укреплен рычаг 1, приводящий в движение поводок 3 при помощи вилки 2. Поводок 3 жестко связан с осью 4, на которой укреплено зеркало 5. Вся эта конструкция была заключена в кожух и соединена с обычным шлейфовым осциллографом таким образом, чтобы на месте зеркала шлейфа стояло зеркало прибора.

Кривая тока в одной из обмоток дросселя представлена на рис. 8 кривой i' . Последовательно с вибратором, записавшим эту кривую, был включен только что описанный прибор, показания которого представлены на том же рис. 8 кривой θ . Свободные колебания прибора при включении его на постоянное напряжение показаны на рис. 9.

В данном случае, как видно из сопоставления рис. 8 и 9, частота колебаний среднего тока оказалась близкой к частоте собственных колебаний прибора. Наступило явление резонанса системы, и потому кривая, записанная прибором, оказалось очень близкой к синусоиде. Внесение поправок к кривой θ способом, описанным выше, позволяет получить кривую I_{cp} . На рис. 8 кривая I_{cp} изображена пунктиром. Общая нулевая линия кривых θ и I_{cp} показана на осциллограмме, сверху изображена кривая изменения напряже-

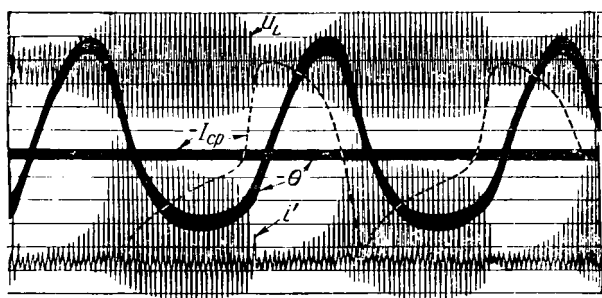


Рис. 10.

ния на зажимах дросселей, снятая обычным вибратором (U_L).

Рассмотрим другой пример.

Если прибор имеет слишком большое успокоение, то кривая, записанная прибором, будет также весьма сильно отличаться от кривой изменения среднего тока. В качестве примера рассмотрим осциллограмму, приведенную на рис. 10. Внизу изображена осциллограмма частичного тока, записанная обычным вибратором (i'), над ней изображена осциллограмма, записанная миниатюрным магнитоэлектрическим гальванометром ($- \theta$), через который проходил тот же частичный ток в обратном направлении; действительная кривая изменения среднего тока, полученная после внесения поправок, проведена пунктиром (I_{cp})⁴. Последние две кривые имеют общую нулевую линию, показанную на осциллограмме. Вверху на том же рис. 10 представлена кривая изменения напряжения на зажимах дросселя, снятая обычным вибратором (U_L). Рамка гальванометра, использованного для снятия кривой I_{cp} , была изготовлена из латуни, вследствие чего прибор сильно тормозился вихревыми токами. Кривая отклонения этого гальванометра при включении его на постоянное напряжение изображена на рис. 11.

Поправка в этом случае оказывается практически пропорциональной тангенсу угла наклона касательной к кривой среднего тока, снятой при помощи этого гальванометра. Эта поправка на большинстве участков кривой намного превосходит величину, полученную непосредственным измерением, поэтому, после внесения поправки, вид кривой совершенно изменяется. Понятно, что внесение таких больших поправок графическим методом связано с довольно значительными

⁴ Положительное направление оси ординат кривых θ и I_{cp} идет вниз, а положительное направление оси ординат кривой i' идет вверх.

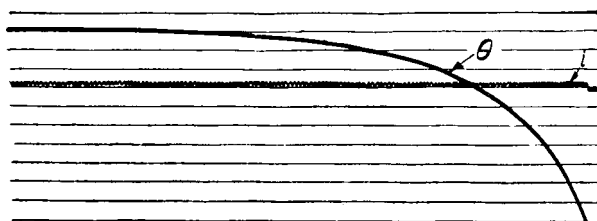


Рис. 11.

погрешностями. Чтобы величина поправок была меньше, важно потребовать, чтобы подвижная система гальванометра была так рассчитана, чтобы из всех слагаемых в левой части уравнения (1) третье имело бы наибольшую величину, а поправки, обусловленные наличием первой и второй производной от угла поворота, были бы относительно малы.

В заключение остановимся кратко на практическом значении данной работы. В технике довольно часто приходится производить экспериментальное исследование переходных процессов в нелинейных системах, находящихся под воздействием периодической внешней силы. Примером такой системы может служить феррорезонансная цепь с подмагничиванием. Чтобы уяснить сущность происходящих в такой системе явлений, необходимо выделить медленно меняющуюся слагающую, непосредственно выделение которой по осциллограмме иногда осложняется наличием целого семейства гармоник, часто очень значительных. Предлагаемый баллистический вибратор, параметры которого связаны определенным образом с параметрами исследуемого явления, повидимому, наилучшим образом позволяет решить поставленную задачу. Однако, при отсутствии возможности изготовить этот прибор, можно пользоваться для той же цели любым регистрирующим магнитоэлектрическим прибором, к показаниям которого следует вносить поправки способом, изложенным выше.

Литература

1. Е. Г. Шрамков. Электрические измерения. ОНТИ, 1937.
2. В. Е. Боголюбов. Квазирелаксационные колебания в феррорезонансных цепях. Труды МЭИ, Сборник, посвященный 75-летию члена-корр. Академии наук СССР К. А. Круга. Госэнергоиздат, 1948.
3. В. Е. Боголюбов. Квазирелаксационные колебания в феррорезонансных цепях с подмагничиванием. Электричество, № 6, 1949.
4. В. Е. Боголюбов. Переходные процессы в дроселях насыщения, вызванные изменением напряжения. Электричество, № 3, 1950.

[19. 12. 1949]



Аналитическое определение постоянного потока в дросселе насыщения

Кандидат техн. наук Л. А. БЕССОНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Пусть последовательно соединенные обмотки w_1 подключены к синусоидальному напряжению (рис. 1). Обозначим поток левого дросселя Φ_1 , а правого Φ_2 . Суммарный переменный поток обмоток $\Phi_1 + \Phi_2$ синусоиден, но каждый из потоков порознь несинусоиден. Кривая потока Φ_2 за второй полупериод будет являться зеркальным отражением относительно горизонтали потока Φ_1 за первый полупериод. Четные гармоники потоков Φ_1 и Φ_2 наводятся в цепи обмоток w_2 четные гармоники э. д. с.,

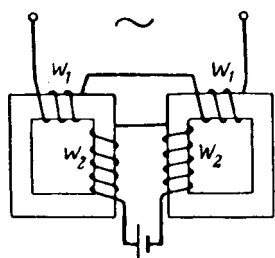


Рис. 1.

под действием которых в цепи обмоток w_2 могут протекать, кроме постоянного, еще и токи четных частот. Эти токи четных частот, величины которых ограничиваются соответствующими полными сопротивлениями цепи обмоток w_2 для этих частот, снижают величины четных гармоник токов. Чем меньше сопротивление цепи обмоток w_2 , тем меньше четные гармоники в потоках Φ_1 и Φ_2 .

В пределе, когда сопротивление цепи обмоток w_2 для четных гармоник тока очень мало, соответствующие гармоники в потоках Φ_1 и Φ_2 вовсе исчезнут. Исчезновение же четных гармоник в потоках приведет к тому, что форма потоков Φ_1 и Φ_2 при синусоидальном напряжении, приложенном ко всей цепи, станет синусоидальной, и амплитуда потока Φ_1 будет равна ампли-

туде потока Φ_2 и равна половине амплитуды результирующего переменного потока. Итак, в предельном случае, когда полное сопротивление цепи обмоток w_2 для четных гармоник токов стремится к нулю, потоки Φ_1 и Φ_2 стремятся к синусоидам. В другом предельном случае, когда в цепи обмоток w_2 включено либо очень большое активное, либо очень большое (в омах) индуктивное сопротивление, токи четных частот стремятся к нулю, а четные гармоники в потоках Φ_1 и Φ_2 проявляются в полной мере. В этом втором предельном случае форма потоков более всего отличается от синусоидальной. Следовательно, в этом случае следует ожидать наибольшего отклонения от зависимости между постоянной составляющей индукции B и постоянной составляющей напряженности поля H_0 при наличии синусоидальной индукции амплитуды B_1 , выражаемой формулой

$$H_0 = aJ_0(j\beta B_1) \operatorname{sh} \beta B. \quad (1)$$

Возможны и промежуточные режимы, когда четные гармоники есть и в токе, и в потоке и с такими режимами и приходится чаще всего иметь дело. Ниже будет показано, как найти снижение постоянной составляющей потока в общем случае, т. е. когда есть четные гармоники и в токе и в потоке, подробное же исследование будет проведено для наиболее интересного гра-

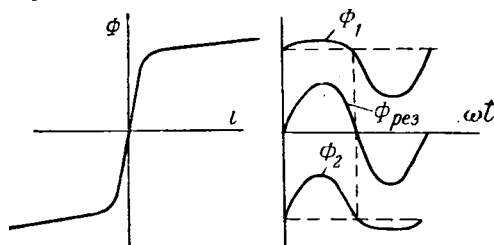


Рис. 2.

ничного режима, когда форма потоков наиболее искажена по сравнению с синусоидальной. Форма потоков Φ_1 и Φ_2 для этого граничного случая представлена на рис. 2.

Индукция в первом сердечнике (верхний индекс 1) может быть выражена рядом

$$B^I = B + B_1 \sin \omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots; \quad (2)$$

здесь B — постоянная составляющая, а B_1 и B_2 — соответственно амплитуды первой и второй гармоник индукции. Для промежуточного случая, когда четные гармоники есть и в токах и в потоках, необходимо изменить начальную фазу индукции B_2 и разложение индукции в ряд запишется так:

$$B^I = B + B_1 \sin \omega t + B_2 \cos (2\omega t + \psi) + \dots \quad (3)$$

Начальная фаза ψ зависит от величины подмагничивания, напряжения переменного тока и от величины и характера полного сопротивления цепи обмоток w_2 для второй гармоники.

В свою очередь индукция во втором сердечнике запишется так:

$$B^{II} = -B + B_1 \sin \omega t - B_2 \cos (2\omega t + \psi) - \dots$$

Для того чтобы не сделать вычисления чрезмерно громоздкими, ограничимся второй гармоникой, хотя принципиально можно было бы учесть и более высокие гармоники. Выразим основную кривую намагничивания в виде гиперболического синуса $H = \alpha \operatorname{sh} \beta B$ и подставим вместо B ее выражение в виде ряда (3). После некоторых преобразований¹ получим три уравнения относительно трех неизвестных ψ , B и B_2 :

$$k_7 B_2 \cos (\psi - \varphi) = \sin 2\psi \operatorname{sh} \beta B J_2 (j\beta B_1) J_2 (j\beta B_2) + \\ + \sin \psi j \operatorname{ch} \beta B J_0 (j\beta B_1) J_1 (j\beta B_2) + \\ + \sin \psi j \operatorname{ch} \beta B J_1 (j\beta B_2) J_4 (j\beta B_1) + \dots; \quad (4)$$

$$k_7 B_2 \sin (\psi - \varphi) = \operatorname{sh} \beta B J_0 (j\beta B_2) J_2 (j\beta B_1) - \\ - \cos 2\psi \operatorname{sh} \beta B J_2 (j\beta B_1) J_2 (j\beta B_2) - \\ - \cos \psi j \operatorname{ch} \beta B J_0 (j\beta B_1) J_1 (j\beta B_2) + \\ + \cos \psi j \operatorname{ch} \beta B J_1 (j\beta B_2) J_4 (j\beta B_1) + \dots; \quad (5)$$

$$\frac{H_0}{\alpha} = \operatorname{sh} \beta B [J_0 (j\beta B_1) J_0 (j\beta B_2) - \\ - 2J_4 (j\beta B_1) J_2 (j\beta B_2) \cos 2\psi] + \\ + \operatorname{ch} \beta B [2jJ_3 (j\beta B_2) J_6 (j\beta B_1) \cos 3\psi - \\ - 2jJ_1 (j\beta B_2) J_2 (j\beta B_1) \cos \psi]; \quad (6)$$

здесь H_0 — постоянная составляющая напряженности поля.

Под k_7 понимается следующее:

$$k_7 = \frac{2\omega s w_2^2 10^{-8}}{\alpha l z},$$

где s — сечение магнитопровода в см^2 ;

l — длина его средней линии в см ;

¹ См. книгу автора, Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948, стр. 318—319, уравнения (18,21) — (18,23).

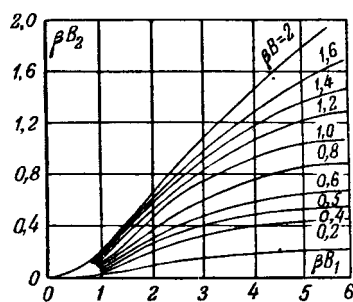


Рис. 3.

z — полное сопротивление цепи обмоток w_2 по второй гармонике;

ω — угловая частота первой гармоники;

w_2 — число витков одной обмотки;

φ — угол сдвига между э. д. с. и током второй гармоники. Он определяется сопротивлением z .

Совместное решение уравнений (4) — (6) даст возможность определить ψ , B и B_2 при любом режиме. По ψ , B и B_2 могут быть найдены нечетные гармоники тока в первичной цепи, а следовательно, и ток, забираемый схемой из сети, вторая гармоника тока, протекающая по цепи обмоток w_2 . Для нахождения гармоник тока необходимо выделить из произведений гиперболических синусов и косинусов периодических аргументов члены, которые дают соответствующие частоты.

Перейдем к исследованию наиболее интересного режима, называемого режимом „вынужденного“ намагничивания, при котором потоки Φ_1 и Φ_2 более всего искажены по сравнению с синусоидой. В этом режиме, как отмечалось выше, вторая гармоника тока не протекает по цепи обмоток w_2 и начальная фаза ψ индукции B_2 в выражении (3) равна нулю. При $\psi = 0$ и $z = \infty$ уравнение (6) приводится к следующему:

$$\operatorname{sh} \beta B J_0 (j\beta B_2) J_2 (j\beta B_1) + j J_1 (j\beta B_2) \operatorname{ch} \beta B J_4 (j\beta B_1) = \\ = \operatorname{sh} \beta B J_2 (j\beta B_1) J_2 (j\beta B_2) + \operatorname{ch} \beta B j J_1 (j\beta B_2) J_0 (j\beta B_1).$$

При помощи этого уравнения может быть построено семейство кривых $\beta B = f(\beta B_1)$ при параметре βB . Такое семейство дано на рис. 3. Из же семейство кривых рис. 3, при помощи уравнения (6) нетрудно построить семейство кривых $\beta B_2 = f\left(\frac{H_0}{\alpha}\right)$ при параметре βB_1 , представленное

на рис. 4. Семейство рис. 4 более удобно для практического использования, чем данное на рис. 3.

поскольку, как правило, известна величина $\frac{H_0}{\alpha}$, а величина βB неизвестна. При помощи кривых рис. 4 может быть определена величина второй гармоники индукции при заданном переменном напряжении на входе всей цепи (βB_1 определяется половиной синусоидального напряжения приложенного к двум дросселям) и при известной постоянной составляющей напряженности поля $\frac{H_0}{\alpha}$. Кривые рис. 4 быстро стремятся к своим предельным значениям, равным 0,63 при $\beta B_1 =$

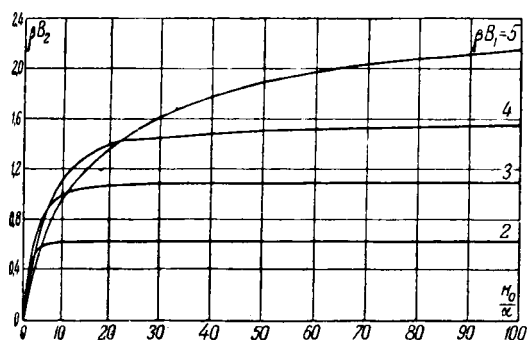


Рис. 4.

при $\beta B_1 = 3$; 1,55 при $\beta B_1 = 4$; 2,2 при $\beta B_1 = 5$ и т. д. Эти кривые помимо тех целей, для которых мы будем их ниже использовать, весьма удобны при проектировании удвоителей частоты. Если расчесть кривые рис. 4 прямыми $\frac{H_0}{\alpha} = \text{const}$ воспользоваться кривыми рис. 3 для определения значений βB , то получим кривые $\beta B = f(\beta B_1)$ при параметре $\frac{H_0}{\alpha}$. Такие кривые изобра-

жены на рис. 5. Параметр $\frac{H_0}{\alpha}$ принимал значения от 10 до 160. Эти кривые показывают, как падает постоянная составляющая индукции при наложении переменного поля при вынужденном намагничивании и при неизменном значении постоянного тока, протекающего по обмоткам w_2 .

Из сети будет забираться переменный ток, состоящий только из нечетных гармоник. Найдем значение нечетных гармоник напряженности поля в „вынужденном“ намагничивании, выделив соответствующие частоты из произведений гиперболических функций от периодических аргументов.

Первая гармоника напряженности поля

$$-2 \operatorname{ch} \beta B \sin \omega t [J_0(j\beta B_2)jJ_1(j\beta B_1) + J_2(j\beta B_2)jJ_3(j\beta B_1) - J_2(j\beta B_2)jJ_5(j\beta B_1)] -$$

$$-2 \operatorname{sh} \beta B \sin \omega t [jJ_1(j\beta B_1)jJ_1(j\beta B_2) - jJ_3(j\beta B_1)jJ_1(j\beta B_2) - jJ_5(j\beta B_1)jJ_3(j\beta B_2)]; \quad (8)$$

третья гармоника

$$-2 \operatorname{ch} \beta B \sin 3\omega t [J_0(j\beta B_2)jJ_3(j\beta B_1) + J_2(j\beta B_2)jJ_1(j\beta B_1) - J_4(j\beta B_2)jJ_5(j\beta B_1)] +$$

$$+ 2 \operatorname{sh} \beta B \sin 3\omega t [jJ_1(j\beta B_1)jJ_1(j\beta B_2) + jJ_5(j\beta B_1)jJ_1(j\beta B_2) + jJ_3(j\beta B_1)jJ_3(j\beta B_2)]; \quad (9)$$

пятая гармоника

$$2 \operatorname{ch} \beta B \sin 5\omega t [J_2(j\beta B_2)jJ_1(j\beta B_1) + J_4(j\beta B_2)jJ_3(j\beta B_1)] + 2 \operatorname{sh} \beta B \sin 5\omega t \times$$

$$[jJ_3(j\beta B_1)jJ_1(j\beta B_2) + jJ_1(j\beta B_1)jJ_3(j\beta B_2)]; \quad (10)$$

седьмая гармоника

$$2 \operatorname{ch} \beta B \sin 7\omega t [J_2(j\beta B_2)jJ_3(j\beta B_1) + J_4(j\beta B_2)jJ_1(j\beta B_1)] + 2 \operatorname{sh} \beta B \sin 7\omega t \times$$

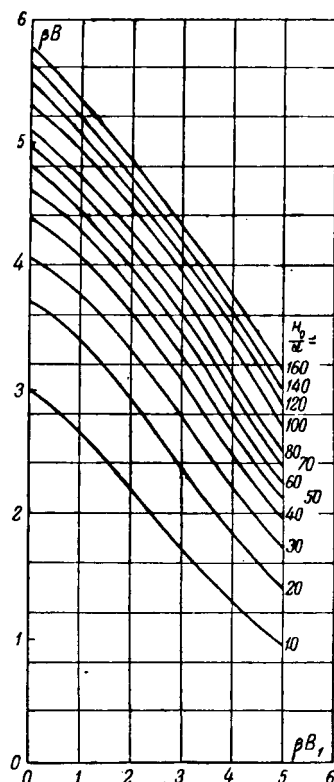
$$[jJ_5(j\beta B_1)jJ_1(j\beta B_2) - jJ_1(j\beta B_1)jJ_3(j\beta B_2)]. \quad (11)$$


Рис. 5.

При численных подсчетах в формулы следует подставлять значения βB и βB_2 , взятые из кривых рис. 4 или 5, при заданных значениях βB_1 и $\frac{H_0}{\alpha}$.

Зная выражения для нечетных гармоник напряженности поля, можно найти и эффективное значение напряженности поля $\frac{H_{эфф}}{\alpha}$:

$$\frac{H_{эфф}}{\alpha} = \frac{1}{\alpha\sqrt{2}} \sqrt{H_{1m}^2 + H_{3m}^2 + H_{5m}^2}. \quad (12)$$

Эффективное значение напряженности поля $\frac{H_{эфф}}{\alpha}$ является чисто расчетной величиной, характеризующей величину эффективного значения тока, забираемого из сети переменного тока:

$$I_{эфф} = \frac{H_{эфф} \alpha l}{\omega}.$$

В результате таких подсчетов построены кривые $\beta B_1 = f\left(\frac{H_{эфф}}{\alpha}\right)$ при параметре $\frac{H_0}{\alpha}$, изображенные на рис. 6. Их можно трактовать как вольт-амперные характеристики при одновременном действии постоянного и переменного поля и при соблюдении „вынужденности“ намагничивания.

Если сравнить их с вольт-амперными характеристиками при синусоидальной индукции (рис. 7), то бросается в глаза, что при одном и том же значении $\frac{H_0}{\alpha}$ и при одном и том же синусоидальном напряжении сети, приходящемся на каждый дроссель, переменный ток, забираемый из сети при параллельном соединении обмоток

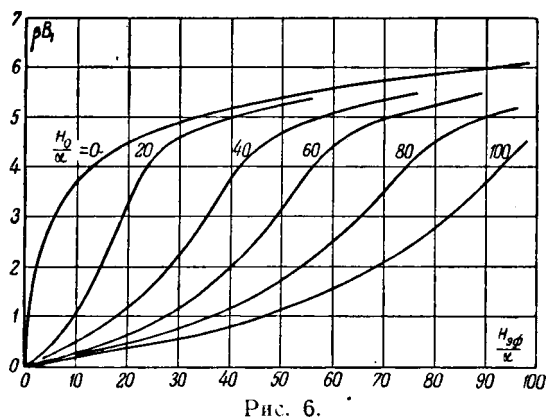


Рис. 6.

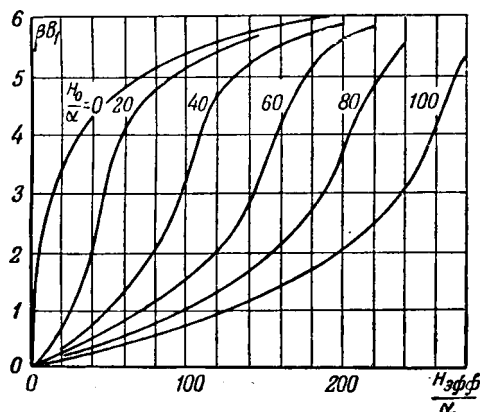


Рис. 7.

переменного тока, значительно больше, чем переменный ток, забираемый из сети при последовательном соединении обмоток w_1 и при вынужденном намагничивании. С точки зрения возможностей регулирования величины реактивного сопротивления дросселя схема с параллельным соединением обмоток w_1 представляется более выгодной, чем схема с последовательным соединением w_1 , так как при пропускании того же постоянного тока реактивное сопротивление дросселя, подсчитанное как отношение эффективного напряжения на дросселе к эффективному значению переменного тока, протекающего через него, при параллельном соединении изменится гораздо больше, чем при последовательном. Преимущества, даваемые параллельным соединением обмоток переменного тока, с точки зрения кратности регулирования реактивного сопротивления практически хорошо известны. Рис. 6 и 7 интересны не столько тем, что ими теоретически подтверждается практически известный факт, сколько тем, что они дают возможность количественной оценки максимальных преимуществ, даваемых параллельным соединением обмоток w_1 при различных режимах, т. е. при различных $\frac{H_0}{\alpha}$ и различных βB_1 .

Из кривых рис. 4 или 5 может быть найдено значение постоянной составляющей индукции при заданном значении переменного напряжения (т. е. фактически при заданном βB_1) и при известной постоянной составляющей напряженно-

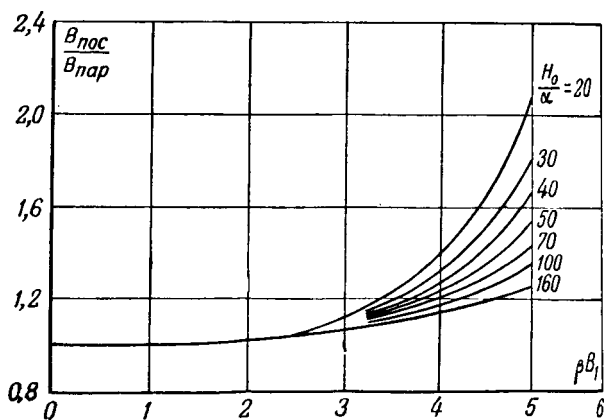


Рис. 8.

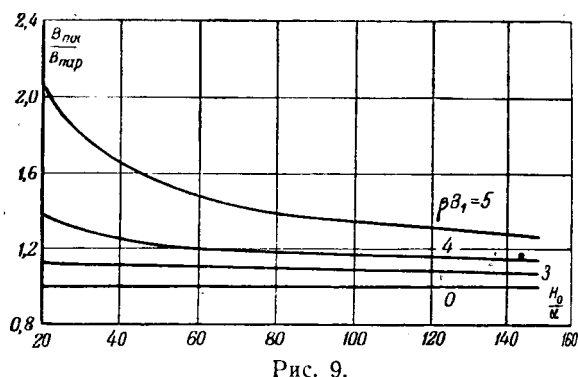


Рис. 9.

сти поля $\frac{H_0}{\alpha}$. Это значение постоянной составляющей индукции при последовательном соединении обмоток w_1 и при соблюдении условия „вынужденности“ намагничивания назовем $B_{\text{нв}}$. При параллельном соединении обмоток двух таких же дросселей постоянная составляющая индукции, $\beta B_{\text{пар}} = \text{Ar sh} \frac{H_0}{\alpha J(j\beta B_1)}$. (13)

Сопоставим значения $B_{\text{пос}}$ и $B_{\text{пар}}$ при одинаковых значениях βB_1 и $\frac{H_0}{\alpha}$. При сопоставлении значения $\beta B_{\text{пос}}$ будем брать из кривых рис. 4 или 5, а значения $\beta B_{\text{пар}}$ будем определять при тех же $\frac{H_0}{\alpha}$ и βB_1 по формуле (13). Построим два семейства кривых, выражающих зависимость отношения индукции $B_{\text{пос}}$ к индукции $B_{\text{пар}}$ в одном случае в функции от βB_1 при параметре $\frac{H_0}{\alpha}$, в

другом в функции от $\frac{H_0}{\alpha}$ при параметре βB_1 . Первое из перечисленных семейств изображено на рис. 8, второе — на рис. 9. Из кривых рис. 8 видно, что когда переменное поле отсутствует ($\beta B_1 = 0$), то при любых $\frac{H_0}{\alpha}$ отношение $\frac{B_{\text{пос}}}{B_{\text{пар}}} = 1$. С увеличением βB_1 отношение $\frac{B_{\text{пос}}}{B_{\text{пар}}}$ растёт.

Это означает, что при неизменном постоянном токе наложение одного и того же переменного

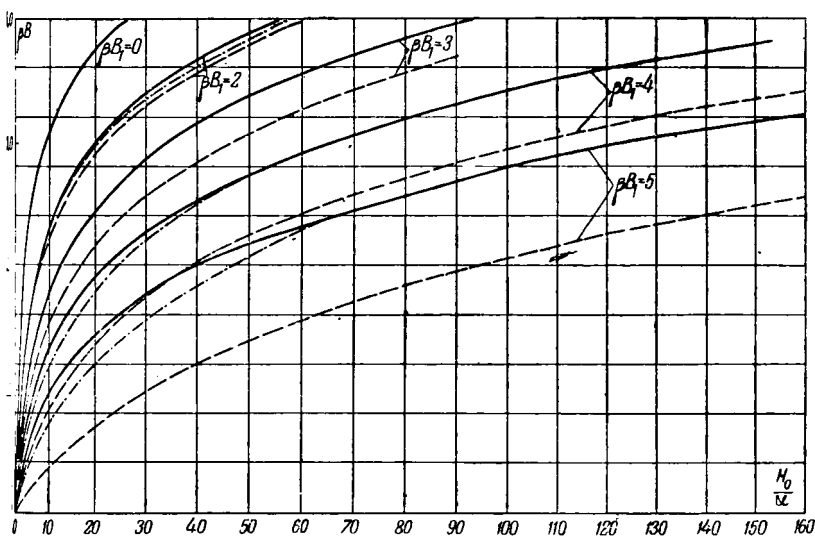


Рис. 10.

тока приведет к более резкому снижению постоянной составляющей индукции, когда обтки w_1 соединены параллельно, и к меньшему снижению, когда обмотки w_1 соединены последовательно. Из рис. 9 видно, что с увеличением намагничивания (с увеличением $\frac{H_0}{\alpha}$) неравномерность в величинах $B_{\text{пос}}$ и $B_{\text{пар}}$ сглаживается.

Перейдем к основному вопросу, который привел к необходимости исследования закона изменения постоянной составляющей потока при последовательном соединении обмоток w_1 переменного тока, а именно к вопросу об учете влияния переменного потока на скорость нарастания и спада постоянной составляющей потока при последовательном соединении обмоток переменного тока. Если параметры схемы таковы, что полное сопротивление цепи обмоток w_2 по второй гармонике мало, то вторая гармоника тока исчезает и при расчете процессов спада нарастания постоянной составляющей потока в наличии переменного поля можно без каких-либо изменений пользоваться формулой $B = \alpha \text{sh} \beta B J_0 \cdot (j \beta B_1)$. При „вынужденном“ намагничивании, когда вторая гармоника полностью является в потоках, пользоваться формулой можно только после некоторого ее изменения. Рассмотрим, каковы должны быть эти изменения (рис. 10). По оси ординат на нем откладывается значение постоянной составляющей функции βB , по оси абсцисс значение постоянной составляющей напряженности поля.

На рис. 10 изображено три семейства кривых. Первое семейство (нанесено сплошными линиями), полученное путем сечения кривых рис. 5 прямыми $\beta B_1 = \text{const}$, дает зависимость $\beta B = f\left(\frac{H_0}{\alpha}\right)$ для последовательного соединения обмоток w_1 и для вынужденного намагничивания. Значения βB_1 , являющиеся параметром, написаны на кривых. Второе семейство, представленное пунктирными линиями, дает ту же зависимость, но при па-

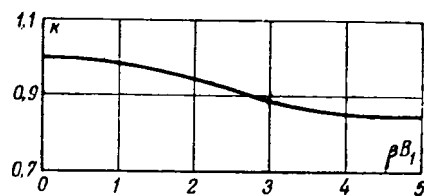


Рис. 11.

раллельном соединении обмоток. Сравнив пунктирные кривые со сплошными при одном и том же βB_1 , видим, что при малых βB_1 , например, при $\beta B_1 = 2$ кривые разнятся мало. С увеличением βB_1 расхождение в кривых увеличивается и при больших значениях βB_1 , например при $\beta B_1 = 5$, различие в кривых весьма большое. Сплошные кривые, могут быть приближенно описаны

$$H_0 = \alpha \text{sh} \beta B J_0 (k \beta B_1). \quad (14)$$

Формула (14) отличается от (13) тем, что в аргумент бесселевой функции введен множитель k , меньший единицы. Он учитывает, насколько должно быть снижено βB_1 при вынужденном намагничивании, чтобы можно было пользоваться прежней формулой. Строго говоря, k зависит не только от βB_1 , но и от $\frac{H_0}{\alpha}$. Но можно так подобрать k для

каждой сплошной кривой рис. 10, чтобы на значительном участке аппроксимирующая кривая (пунктир с точкой) совпадала с соответствующей сплошной кривой (при одном и том же βB_1). Это тем легче сделать, чем меньше βB_1 . При $\beta B_1 > 4$ может оказаться целесообразным каждую сплошную кривую разбить на два участка и аппроксимировать их отдельно. Наибольший интерес представляет замена сплошных кривых аппроксимирующими при значениях βB_1 , не превышающих примерно 4, 5. Значение коэффициента k в функции от βB_1 дано на рис. 11. Таким образом расчет процессов спада или роста постоянной составляющей потока при „вынужденном“ намагничивании может производиться по тем же формулам, что и при параллельном соединении, но аргумент бесселевой функции должен быть умножен на коэффициент k , (кривая рис. 11). Значения k для промежуточных режимов, когда вторая гармоника есть и в токе и в потоке, могли бы быть получены таким же образом, как это выше было сделано для режима „вынужденного“ намагничивания. Однако, подсчеты при этом были бы весьма громоздки и их практически проводить не следует. При переходе от одного крайнего режима (четные гармоники в токе), когда $k=1$, к другому крайнему режиму (четные гармоники в потоке), когда k берется из кривой рис. 11, значение k меняется все же не сильно, то при ориентировочных расчетах промежуточных режимов при $\beta B \leq 4,5$ целесообразно вводить в расчет вместо коэффициента k некоторый коэффициент $k_1 = 0,5 + 0,5k$.

[7. 2. 1950]

Первая электротехническая выставка (1880 г.)

Семьдесят лет назад в Петербурге была открыта первая в мире специальная электротехническая выставка.

Это событие заслуживает быть отмеченным не только потому, что с него начинается история специально электротехнических выставок во всем мире, но, главным образом, потому, что оно с исключительной убедительностью раскрывает передовую роль выдающихся русских электротехников-изобретателей в применении общественных форм содействия развитию новой отрасли техники и освещает их ценный вклад в дело технической пропаганды научных идей приложения электричества в России.

Теперь, когда электричество широко проникло во все производственные процессы и в быт, подчас бывает трудно оценить по всей справедливости то, что три четверти века назад сделали Чиколев, Яблочков, Лачинов, Попов, Лодыгин, Пироцкий, Писаревский, Боресков, Славянов, Доливо-Добровольский и многие другие талантливые русские электротехники и изобретатели в этой области.

В течение 70-х и 80-х годов минувшего века в России и в не меньшей степени за ее пределами интерес ученых, техников, изобретателей, любителей естествознания, различного рода предпринимателей к проблемам технического применения электричества возрастал буквально из года в год и из месяца в месяц, причем круг интересующихся этими проблемами непрерывно расширялся, вопросы электричества были модными, каждая весть о новом приложении этой энергии подхватывалась, как сенсация, и быстро облетала все страны. В России вопросы применения электричества начинали привлекать к себе самое живое общественное внимание.

Довольно значительная группа членов Русского технического общества, среди которых были: Ф. К. Величко, П. Н. Яблочков, В. Н. Чиколев, Д. А. Лачинов, А. Н. Лодыгин, О. Д. Хвольсон, В. Я. Флоренсов, Я. И. Ковальский, Н. П. Булыгин, А. И. Шпаковский, Ф. А. Пироцкий, Н. М. Алексеев и др., в конце 1879 г. добились учреждения в составе Общества специального Электротехнического (VI) отдела для объединения научной, изобретательской и пропагандистской деятельности русских электротехников. При этом задача широкой и повседневной публичной *технической пропаганды* проблем электротехники была, безусловно, одной из самых первоочередных задач, какие с самого начала ставили перед собой учредители VI отдела.

Учредительное собрание Электротехнического (VI) отдела состоялось 11 января 1880 г. (30 декабря 1879 г. ст. ст.). Уже в протоколе второ-

го собрания — 18 (6) февраля 1880 г. — мы читаем: «г. Чиколев прочел предложение об издании журнала по электротехнике», а в протоколе третьего собрания — 3 марта (20 февраля) 1880 г.: «г. Чиколев предложил открыть выставку, по приложениям электричества, в течение предстоящего поста. Положено обсудить вопрос о выставке в следующем заседании».

Действительно, уже через неделю, в четвертом собрании VI отдела — 10 марта (27 февраля) 1880 г. — вопрос об организации электротехнической выставки был всесторонне обсужден и решен VI отделом положительно.

Не случайно, что именно В. Н. Чиколев предложил организовать электротехническую выставку, также как и издавать электротехнический журнал. Владимир Николаевич Чиколев был одним из крупнейших электротехников-изобретателей второй половины XIX в., пионером русской военной электротехники и светотехники, одним из самых горячих и эрудированных пропагандистов электротехники своего времени, человек широкой инициативы, выдающийся организатор. Он много потрудился над созданием электротехнического отдела на Московской политехнической выставке в 1872 г. За выставленные экспонаты своих изобретений Чиколев был удостоен золотой и серебряной медалей.

Не удивительно, что имя В. Н. Чиколева мы видим первым в числе утвержденных на собрании 10 марта членов распорядительного комитета электротехнической выставки 1880 г. Председателем выставки был утвержден секретарь Р.Т.О. Федор Николаевич Львов — в дальнейшем первый ответственный редактор журнала «Электричество».

О желании выставить экспонаты VI отдел заявили: Экспедиция заготовления государственных бумаг (коллекции и работы по гальванопластике), Артиллерийское ведомство (электроосветительные аппараты для военных целей), Морское ведомство (электроосветительные аппараты для шлюпок, броненосцев, крейсеров и т. д.), Кронштадтская гальванопластическая мастерская, Товарищество Яблочков и К^о (разные предметы относящиеся к электрическому освещению), фирма Сименс (аппараты электрического освещения, телеграфные принадлежности, телефоны и др.) а также частные лица: Н. П. Булыгин (измерительные приборы), А. Н. Ковако (гальванопластика), Ф. Л. Крестен (телеграфия), В. Н. Чиколев, Д. А. Лачинов и др.

Первая электротехническая выставка, имевшая целью «показать обществу современное состояние развития различных отраслей электротехники», торжественно открылась 8 апреля

7 марта) 1880 г. в помещении Русского технического общества в Соляном Городке, что у Пантелеймоновского (быв. Цепного) моста.

Выставка состояла из восьми отделов: 1) телеграфии и телефонии; 2) электрического освещения и электродвижения; 3) электрического искусства в военном и морском деле; 4) гальванопластики; 5) электричества в учебном деле; 6) измерительных приборов по электричеству; 7) собрание рисунков, чертежей, сочинений и журналов электротехники; 8) электротерапии.

Выставка работала утром и вечером до (16) апреля и затем с 5 мая (23 апреля) по (4) мая 1880 г., т. е. всего в течение 33 дней. Выставку посетило 6 187 чел. (по утрам 2 418 чел. по вечерам 3 769 чел.). По тем временам это была внушительная цифра, свидетельствующая о решительном успехе выставки. Доход от продажи билетов (цена, в зависимости от дня и часа, коп., 50 коп. и 1 руб.) составил 2 806 р. 55 к.; заток за погашением расходов по устройству выставки — в сумме 1 258 р. 98 к. был обращен в фонд издания журнала «Электричество».

В обращении редакции журнала «Электричество» в № 1, 1880 г., вышедшем вскоре после выставки, о последней сказано так: «...интересной силой (электричеству. — Д. Р.) и у нас сильно вырастать в последнее время, чему оказательством может служить то значительное число посетителей, ежедневно, с утра до вечера, наполнявших залы, бывшей в текущем году, впервые в России Электро-Технической выставки, несмотря на то, что она не представляла, да, по жизни дела и не могла еще представлять полную картины завидного положения, по праву завоеванного уже в наш век электричеством».

Газеты систематически освещали деятельность выставки. Вот, что сообщали читателям «С.-Петербургские ведомости» 19 (7) апреля 1880 г. «...руками членов VI отдела Императорского русского технического общества устроена и открыта первая электротехническая выставка, с целью ознакомить общество с современным развитием различных отраслей электротехники. Посетители выставки видят параллельно: грандиозную механическую работу, производимую при помощи электрического тока; тончайшие измерения низких давлений микроватиметром, недоступные никаким другим чувствительнейшим приборам; задачу на большие расстояния ничтожных по силе звуков — микрофонами; мгновенную передачу человеческой мысли на тысячи верст различными телеграфами; электрический свет в тысячи тысяч свечей, освещающий на войне не только на расстояниях 8—9 верст; слабые лучники электрического света в несколько световых осаждение слоев разнообразных металлов; покрытие, золочение, никелирование и т. п. — это производит та могущественная всеобъемлющая, покорная человеку сила природы, которая называется электричеством.

Посетители выставки имеют также возможность ознакомиться с богатой литературой и журналистикой по электричеству на французском, немецком и английском языках, но они напрасно

обращаются к распорядителям выставки с просьбой указать им специальные русские журналы — таких еще не существует, несмотря на то, что русские имена занимают выдающееся положение в новейшей истории электротехники»¹. Корреспондент, правда, тут же добавляет: «VI отдел твердо решил пополнить существенный пробел в нашей журналистике: изданием особого органа, посвященного специально электричеству и его применениям...».

Спустя два дня, 21 (9) апреля, петербургская «Молва» писала: «Открытая недавно нашим императорским техническим обществом» в Соляном Городке выставка электрической техники... согласно с ее чисто-научною целью, отличается отсутствием всяких декорировок, составляющих почти неизбежную принадлежность всех наших выставок. При самом входе в залу, занимаемую выставкой, расположены принадлежности освещения Яблочкова, дающие возможность каждому составить себе отчетливое понятие о производстве электрического освещения этим способом. На противоположном конце залы выставлены снаряды для освещения минных офицерских классов; там же мы встречаем почти все наиболее выдающиеся заграничные изобретения, каковы: прожектор Манжена, катодический фонарь Барбье и Фенестра и подобный же фонарь Сименса с рассеянием света. Не менее внимания заслуживает и выставка телеграфного ведомства, отличающаяся своей полнотой. В числе предметов этой выставки находятся не только телеграфные аппараты, но и образцы различных принадлежностей телеграфов, как-то: прокатной гуттаперчи, берегских и морских кабелей и изоляторов, употребляемых как у нас, так и в других государствах. Говоря вообще, настоящая выставка дает весьма полное представление не только об успехах электрического освещения, но и о применении электричества к различным практическим целям, ввиду чего посещение ее представляет интерес не только для специалистов, но и для каждого любознательного и образованного человека. В особенности много привлекает публики выставка гальванических и гелиографических работ главного штаба, о которой мы уже упоминали. Выставка отличается чрезвычайным разнообразием входящих в состав ее предметов, между которыми нельзя не обратить внимания на исполненные чрезвычайно художественно блюда и другие работы с рельефными украшениями. Особенно интересный вид представляет выставка по вечерам, когда все выставленные аппараты находятся в действии».

По вечерам члены распорядительного комитета В. Н. Чиколев, Ф. Л. Крестен, И. Н. Деревянкин, А. С. Владимирский (председатель Физического отделения Общества любителей естествознания) и их добровольные помощники — объяснители сопровождали посетителей по выставке, знако-

¹ Подчеркнуто нами. Как известно, первый русский электротехнический журнал «Электричество» начал выходить на 3 месяца позже: в июле 1880 г. — Д. Р.

мили их с назначением и особенностями экспонатов, демонстрировали работу различных приборов и производили эффектные опыты и пробы. В числе объяснителей были такие видные деятели науки и техники, как акад. А. М. Бутлеров, Д. А. Лачинов, П. Н. Яблочков (являвшийся, как и Чиколев, одним из инициаторов выставки), Я. И. Ковальский, Н. М. Алексеев, молодой А. С. Попов, тогда еще студент последнего курса Физико-математического факультета Петербургского университета.

А. М. Бутлеров и Я. И. Ковальский демонстрировали приборы Крукса, «показывающие лучистое состояние материи»; эти приборы были экспонированы петербургским оптиком Рихтером. Н. М. Алексеев производил эксперименты с телефонами, микрофонами и фонографами. Опыты по статическому электричеству производил Д. А. Лачинов, по источникам электрического тока и по электрическому освещению — В. Н. Чиколев и П. Н. Яблочков, по передаче механической работы при помощи электрического тока — Д. А. Лачинов. В объявлении, которое от имени распорядительного комитета было опубликовано 22 (10) апреля в «С.-Петербургских ведомостях» по поводу опытов электропередачи механической работы, было сказано: «Большая электрическая передача механической работы с водяным каскадом работает ежедневно от 1 часа до 3-х и по вечерам..., за исключением тех промежутков времени, когда электрический ток требуется для опытов в другие приборы выставки». Электроэнергию выставка имела собственную: временная электростанция была оснащена двадцатисильным локомотивом и четырьмя генераторами, из них двумя переменного тока. Машины (1 Грамма и 3 Сименса) были установлены в бараке посреди двора Соляного Городка. Здесь же был установлен тогда изобретенный аппарат, показывающий число оборотов машины в минуту (тахометр). При входе на выставку был установлен коммутатор для переключения тока от любого генератора к любому приемнику электроэнергии в выставочных залах.

О большом интересе, проявлявшемся публикой к выставке, свидетельствует между прочим то, что почти ежедневно на протяжении всего периода функционирования выставки в газетах помещались те или иные сообщения, связанные с ее работой. Так, спустя два дня, 24 (12) апреля та же газета уведомила читателей, что «На днях, благодаря инициативе г. Здекауера, электротехническая выставка обогатилась обширным отделом аппаратов по электромедицине». 28 (16) апреля, сообщая о докладе Ф. А. Пироцкого в Русском техническом обществе на тему «Передача механической работы электрическим током на всякие расстояния», цитируемая нами газета в той же информации отмечала, что «Перед сообщением и в антракте посетители были приглашены осмотреть выставку, где г. Ковальский показывал опыты Крукса относительно передачи тока в сильно разреженных воздухе и газах, причем разреженное пространство окрашивалось, под влиянием тока, различными цветами; г. Чиколев показывал

большой индуктор Румкорфа, посредством которого получалась неправильного вида искра (молния), доходившая до 14 дюймов», т. е. около 35 см.

Этот интерес к электротехнической выставке в 1880 г. вызывался в большой мере также тем сообщениями, которые проникали периодическими в печать о всяческих применениях электричества в быту и в промышленности. Публика жадно хватывала любые новости, комментировала их. Они с энтузиазмом отзывались о каждом новом успехе зарождавшейся электротехники, мечтали о грядущем веке электричества так же, как сравнительно недавно о веке пара. Другие подмечали лишь трудности молодой отрасли техники, ставили всяческие кривотолки, стремясь, иной раз из корыстных побуждений, дискредитировать применение электричества. Особенно остро протекала борьба между сторонниками развития применения электричества к освещению и сторонниками газа.

И вот в этой атмосфере шла работа выставки, которая как раз и преследовала цель — показать широкой публике действительные достижения электротехники, реальные ее возможности, научно-обоснованные перспективы дальнейшего развития. Выставка своим содержанием устраняла сомнения, оздоравлила характер проводившихся дискуссий и окружала надеждой и творческими идеями многочисленных русских почитателей новой отрасли техники, русских изобретателей, экспериментаторов, исследователей. Уместно привести в связи с этим значительные по своему глубокому смыслу слова В. Н. Чиколеза, написанные им через не продолжительное время после выставки:

«...Благо тем, кто во-время примкнет к прогрессу; — напрасная трата энергии и посрамление будут уделом тех, кто пойдет против неодолимых сил течения. Ожидаемый прогресс ускорится тем более, чем менее техники будут закрывать глаза пред несовершенствами практикующих способов; — будут более руководствоваться, в своих трудах, непогрешимыми принципами науки, а не случайными прихотями фантазии; когда изобретатели не будут преувеличивать значения их изобретений и тем посеять в публике напрасные и крайне вредные разочарования; наконец, самым сильным, самым действительным пособием прогресса, всегда и везде, — будут: интерес, сочувствие и поддержка общества; без этого последнего условия и все другие теряют свою силу и значение»².

Для того чтобы круг интересов, относящихся к периоду выставки, и уровень вопросов, связанных с электричеством, были ощутимы в большей степени, приведем ниже некоторые газетные и журнальные публикации того времени.

— В Петербурге, после успешного перехода в 1879 г. на электрическое освещение по системе Яблочкова Дворцового моста, площади перед Александринским театром, рассматривается вопрос об электрическом освещении Литейного моста и моста императора Александра II...

² Подчеркнуто нами. — Д. Р.

— Из Одессы сообщают: 1 июля вечером пригородный Николаевский бульвар был осажден публикой, привлеченной сюда электрическим освещением, которым бульвар будет освещаться ежедневно, от 9 до 2 часов ночи. Всех электрических фонарей поставлено десять. Возле каждого фонаря сидела публика и некоторые, вблизи фонарей, читали газеты в 11—12 часов ночи...

— «St.-Peterburger Zeitung» сообщает, что в пятницу, 25 апреля, устроено, в виде опыта, телефонное сообщение между среднюю царскую ложу в Александринском театре и Аничковым дворцом. Таким образом, все пьесы, исполненные в театре в бенефис г. Петипа, можно было пропускать во дворец наследника цесаревича...

— В Петербурге, на Петровском острове Крестен произвел опыты с новыми телефонами; при этом земля была использована в качестве обратного проводника...

— В Марселе намерены соединить телефонными пожарные части с городской ратушей...

— В Лондоне устраивается телефонное сообщение между Темплом и парламентом...

— В Петербурге гостиница Демута оборудуется 10 дифференциальными электрическими лампами системы г. Чиколева...

— В знаменитом венском саду Фольксгартене оборудуется электрическое освещение 30 свечами Яблочкова...

— Появились слухи о разработке проекта осуществления трансатлантической телефонии с использованием телеграфного кабеля, проложенного через океан...

— Муниципалитет Берлина рассматривает проект электроосвещения главнейших пунктов города...

— По указанию французского министра народного просвещения рассматривается вопрос о замене на сцене Парижской оперы газа электрическим освещением по системе Яблочкова и др. Имеется в виду осветить электричеством также все помещения и фасад оперы. (Парижский театр в этот период уже освещался 120 свечами Яблочкова)...

— Из Вены сообщают, что после перехода типографии местной газеты на электрическое освещение наборщики выразили особенные удовлетворение приятным, ровным, относительно холодным и не загрязняющим воздух источником освещения...

— Société Générale d'Electricité (Франция), с капиталом в 7 500 000 франков эксплуатирует исключительно освещение Яблочкова...

— На Нуазельской ферме, близ Парижа, меньше пашет при помощи электричества свои поля: двигательная сила ближайшей фабрики приводит во вращение первую динамо-электрическую машину Грамма, ток которой передается по проводникам, на несколько верст в поле, где первая машина Грамма двигает плуг, при посредстве приборов, подобных тем, которые употребляются при паровом пахании...

— В Петербурге торговый дом «Свет» принимает на себя устройство освещения по способу М. Хотинского во всякого рода помещениях:

частных квартирах, магазинах, мастерских, фабриках и заводах; освещение улиц и т. д. (Свет по способу Хотинского получается от накаливания огнеупорного вещества в пламени жидких и газообразных углеводородов, которое раздувается и питается струей кислорода)...

Представляет также известный интерес справка о распространении в России, в период, к которому относится выставка, электрического освещения фонарями системы Яблочкова общественных мест. Всего действовало приблизительно 500 фонарей; из них: в Петербурге с окрестностями — 120 фонарей (Большой театр, мосты, Балтийский, Путиловский, Ижорский и другие заводы, сад «Ливадия»), в Москве — 100 фонарей (Рязанский вокзал, Петровские линии, сады «Эрмитаж» и «Альгамбра», Каменный мост, фабрика Алексева, ресторан «Яр» и др.), в Одессе, в Кронштадте, в Киеве, в Н.-Новгороде, на морских судах и пр. — остальные.

В отделах электрического освещения Выставки экспонаты, выставленные Товариществом Яблочков и К°, были наиболее многочисленными. Среди них были не только разнообразнейшие устройства электроосвещения системы Яблочкова (всякого рода свечи, фонари и другие светильники), но и различные детали, схемы и приборы, применявшиеся Яблочковым, и в их числе, изготовленные на заводе Т-во Яблочков и К°, одни из первых в мире, электротехнические измерительные приборы. Тут же был выставлен автоматический переводитель Чиколева, переключавший каждые 1½ часа ток на следующие свечи. Автоматическое реле, изобретенное Хотинским, при случайном потухании какой-либо свечи или ее догорании — автоматически переводило ток на следующий номер. Сименс выставил свою дифференциальную лампу усовершенствованной конструкции; однако, рядом экспонированный регулятор системы Чиколева давал тот же эффект, при значительно более простой схеме устройства и действия. Прожектор Манжена со сферическим стеклом неравномерной толщины, исключаящим явление сферической абберации, был установлен среди группы стэндов, относящихся к военной светотехнике.

«Электрическая передача силы» была „гвоздем“ выставки. Вот как описывается эта передача в Записках Р. Т. О., опубликованных в августе 1880 г.

«Машина Сименса (с постоянным током), находящаяся в машинном бараке, посылает гальванический ток другой такой же машине, установленной на выставке. Эта последняя начинает быстро вертеться и сообщает посредством ремня свое движение центробежному насосу, который поднимает, к самому потолку здания, воду в количестве более восьми тысяч ведер в час, потребляя на это около трех лошадиных сил. Лица, обрабатывавшиеся с обыкновенными электродвигателями, силы которых едва хватает на приведение в движение швейной машинки, с недоверием относятся к передаче движения посредством электричества; но посещение выставки быстро разубеждает их в этой ошибке: шумный каскад,

падающий с трехсаженной высоты, и заметное дрожание всего пола, происходящее от энергического вращения машины, убедят, даже скептика, в том, что это дело далеко не шуточное».

Исключительно полно и систематично был организован отдел телеграфии. В нем была собрана вся историческая коллекция телеграфных аппаратов, начиная с оптического телеграфа, осуществленного в 1837 г. между Петербургом и Варшавой, и кончая новейшим печатающим аппаратом Юза, средняя скорость передачи которого достигала по тем временам выдающихся показателей: 30 слов в минуту или 45 условных депеш в час. Представленные весьма подробно описания, схемы, отдельные узлы и т. п. позволяли посетителям выставки подробно проследить весь путь развития в России, на родине электромагнитного телеграфа, телеграфного дела³.

Из приборов, аналогичных телеграфным, привлекали внимание публики электрические семафоры. Эти семафоры согласно указаниям о достоинствах схемы были предназначены для предупреждения столкновения поездов на станциях. «Они устроены так, что когда один поднят и, следовательно, путь поезду открыт, то другой не может быть поднят до тех пор, пока первый не опустится. Сверх того, положение обоих семафоров передается электрически в комнату начальника станции».

В отделе гальванопластики на глазах посетителей, за 30 сек. железные изделия покрывались медью, латунию, никелем; публика обычно восторженно встречала эту почти мгновенную метаморфозу вещей, которые, как в волшебной сказке, меняли свой цвет, приобретали красивый вид, свойственный применявшимся металлам покрытия. В отчетах о выставке отмечались превосходные гравюры и барельефы лучших мастеров, воспроизведенные гальванопластически. В числе большой группы экспонированных в этом отделе изделий, выполненных в мастерских Главного штаба русской армии, особенно выделялись карты, воспроизведенные при помощи гальваностереотипии.

Открытая в 1837 г. русским акад. Б. С. Якоби гальванопластика разрослась ко времени устройства выставки в обширную отрасль промышленности; применение гальванопластики оказалось выгодным в техническом отношении в самых различных областях. Свечи Яблочкова и вообще угли, служащие для электрического освещения, покрывались с помощью гальванопластики медью, так как опыт показал, что медненные угли горят дольше и светят ровнее обыкновенных. Казначейские билеты печатались с клише, изготовленных методом гальванопластики. Такие клише — гальвано оказывались во много раз долговечнее и от-

³ Через шесть лет, в 1886 г., открылась, приуроченная к столетию со дня рождения изобретателя электромагнитного телеграфа — русского ученого П. Л. Шиллинга, специальная телеграфная выставка, возбуждавшая исследование вопроса о приоритете изобретения и осуществления электромагнитного телеграфа. Известно, что работами Шеллена, Гамеля, Н. Г. Писаревского и О. Д. Хвольсона совершенно точно и окончательно подтвержден приоритет П. Л. Шиллинга.

печатки оставались стабильными в течение всей серии. Открытие акад. Б. С. Якоби принесло всему человечеству неоценимые услуги.

Успех первой электротехнической выставки имел плодотворные результаты. Замысел инициаторов и устроителей выставки, в которой они выдвинули наиболее доходчивую форму популяризации среди широких слоев населения достижений электротехники, получил практическое подтверждение. Эта форма технической пропаганды сыграла роль эффективного средства содействия прогрессу отечественной электротехники. Петербургская выставка 1880 г. явилась началом целой серии электротехнических выставок в России в последующие годы.

В 1882 г. в Петербурге состоялась вторая выставка, на которой большое место занимали экспонаты русского отдела Международной электротехнической выставки 1881 г. в Париже. В 1883 г. была проведена третья выставка. На третьей выставке, между прочим, особый интерес вызвала электропередача энергии на выставку, где был осуществлен электропривод различных станков машин; электроэнергия передавалась с патронного завода, находившегося на расстоянии 1 версты. Интерес к электропередаче энергии проявлялся в России в течение ряда лет. Ф. А. Пироцкий еще в 1874 г. запатентовал свой «электрический способ передачи сил по рельсовым и другим проводникам». В сентябре 1874 г. он демонстрировал передачу на Волковом поле, а в 1876 г. — в Сестрорецке. В апреле 1880 г. Пироцкий выступил с обширным докладом по этому вопросу в Русском техническом обществе. Тогда, 27 (15) апреля 1880 г., в петербургской прессе отмечалось, что «Вопрос о применении электрического тока для передачи движения принадлежит по своему значению для практической жизни несомненно к числу важнейших вопросов, выдвинутых вперед за последнее время технической наукой. Практическое разрешение этого вопроса, которое, судя по всему, не заставит ожидать себя долго, повлечет за собою неизбежно громадный переворот во всех отраслях промышленности... Сообщение г. Пироцкого привлекло до того многочисленную публику, что в обширной аудитории положительно не было свободного места». Спустя 5 мес., в течение 12 дней, с 3 сентября (22 августа) 1880 г. Ф. А. Пироцкий демонстрировал в Петербурге на Песках, на углу Болотной улицы и Деятарного переулка, движение первого рельсового электро транспорта: «...двинут вагон электрического силою, идущую по рельсам, по которым катятся колеса вагона». (Электричество, № 5, 1880, стр. 84).

Четвертая электротехническая выставка была проведена VI отделом в начале 1892 г. Эта выставка по своему размаху и содержанию экспонатов превосходила во много раз все предыдущие. Ее посетило более 50 000. Следующая, после четвертой, выставка была организована уже Всероссийским электротехническим съездом⁴.

Д. Р.

⁴ О Всероссийских электротехнических съездах см. статью М. А. Шателера (Электричество, № 1, 1950).



ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Попытки исследования зависимости сопротивления контакта от статически задаваемого относительного смещения соприкасающихся поверхностей столкнулись с невозможностью надежно задавать и контролировать весьма малые смещения, порядка $1 \cdot 10^{-7}$ см, в области которых происходит переход от полного контакта к разрыву контакта, когда сопротивление последнего еще выражается конечной величиной.

Динамический метод, предложенный С. Э. Хайкиным, исключает указанную трудность. В качестве поверхностей исследуемого контакта применены: 1) металлизированная поверхность пьезокварцевого резонатора и 2) металлическая пластинка, свободно лежащая на первой поверхности. Вызываемые колебаниями пьезокварца (десятки килогерц и более) периодические изменения расстояния между названными двумя поверхностями контакта легко контролируются. При этом возможно установить зависимость сопротивления контакта, при колебаниях пьезокварца, от относительного смещения соприкасающихся поверхностей.

Исследование, выполненное с применением динамического метода, показало, что, начиная от смещений порядка $5 \cdot 10^{-8}$ см, сопротивление электрического контакта увеличивается равномерно и обратимо вплоть до смещений порядка $5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-6}$ см, в зависимости от материала поверхностей и величины нагрузки. При увеличении смещений изменения сопротивлений становятся нерегулярными и необратимыми.

Авторы считают, что данный метод позволяет исследовать поведение электрического контакта между соприкасающимися поверхностями при столь ничтожных смещениях, которые до сих пор были недоступны. Экспериментальное исследование поведения электрического контакта с одновременным исследованием механического взаимодействия соприкасающихся поверхностей осуществил А. Е. Саломинович.

(Доклады АН СССР, т. 70, № 4, 1950. С. Э. Хайкин, Г. К. Демишев, А. Е. Саломинович)

РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Советскими учеными и инженерами внесен крупнейший вклад в развитие акустической науки и электроакустической техники. Под редакцией члена-корр. Академии наук СССР Н. Н. Андреева опубликованы труды Совещания, проведенного в 1949 г. Комиссией по акустике Академии наук СССР с участием представителей 56 научных институтов и организаций. В сборнике помещены, в частности, руководящие статьи и авторефераты: И. Г. Дрейзена «Обзор советских работ по звукоусилению», И. Е. Горона «Отечественные конструкции аппаратов магнитной звукозаписи», И. К. Иофе «Советская электроакустическая аппаратура», А. А. Варшавского «О способах расчета многорезонансных электроакустических систем», А. А. Володина «Электроакустический музыкальный инструмент В-8», А. В. Римского-Корсакова «Развитие музыкальной акустики в СССР», П. Г. Гатера «Из истории развития советского звукового кино», А. А. Хрущева «Новая двухканальная система воспроизведения звука с высокими качественными показателями», Л. Д. Навяжского «Борьба с производственным шумом в Советском Союзе», С. П. Алексеева «Уличные шумы Москвы», И. Г. Русакова «Методы акустических измерений» и др.

В обзорной статье И. Г. Дрейзена подчеркивается ведущий характер советских работ по звукоусилению и приоритет СССР в разработке методики для решения мно-

гих важнейших задач в области акустики. Трудом отечественных акустиков и инженеров создана стройная схема физических представлений и инженерных расчетов. Глубокое аналитическое исследование процессов самовозбуждения систем с обратной связью, выполненное советскими физиками, вошло в состав теоретических основ техники звукоусиления.

Превосходной иллюстрацией приоритета отечественных инженеров в области электроакустических изысканий служит статья И. Е. Горона. В 1948—1949 гг. американские фирмы широко рекламировали аппарат магнитной звукозаписи с двухдорожечной записью на ленте шириной 6,5 мм. Такой аппарат впервые был осуществлен еще в 1942 г. в СССР И. С. Рабиновичем. Ему же принадлежит весьма интересная идея строчной магнитной записи речи; конструкция аппарата позволяет легко найти и воспроизвести нужное место записи.

Сообщения в американских журналах в середине 1948 г. о демонстрации установки магнитной звукозаписи с сохранением пространственной перспективы в общем повторяли то, что в 1947 г. демонстрировалось в СССР Институтом звукозаписи на юбилейной сессии Всесоюзного научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова; разработанная в СССР трехканальная установка магнитной звукозаписи показала высококачественное воспроизведение звука с сохранением пространственной перспективы.

В. К. Иофе в сжатом обзоре рассмотрел историю советской электроакустической аппаратуры и охарактеризовал выпущенные промышленностью разнообразные виды электроакустической аппаратуры, разработанные благодаря развитию в СССР научно-исследовательской работы в области электроакустики (ИРПА, НИКФИ, ЛИКИ, ЦНИИС МС и др.). Достаточно отметить новый ассортимент микрофонов и в их числе: ленточный градиентный и кардиоидный; удачные разработки по применению новых пьезоэлектриков (помимо сегнетовой соли, например, фосфата аммония и др.). Важное значение имеют проведенные в самое последнее время работы по расчету затухания рупоров, по исследованию к. п. д. рупорных громкоговорителей, по созданию оригинальных малогабаритных рупоров нового профиля и др.

Способом определения величины элементов многорезонансной колебательной системы в зависимости от заданных требований к форме ее частотной характеристики посвящен автореферат Л. А. Варшавского. Основой расчета является выбор аналитического выражения частотной характеристики, удовлетворяющего заданным требованиям к форме характеристики. Колебательная система рассматривается как четырехполюсник.

В новом электрическом музыкальном инструменте В-8 применен делитель частоты основного генератора с коэффициентом деления 2:1 (триггерного типа); это позволяет транспонировать строй инструмента на октаву вниз, без перестройки основного генератора. Помимо получения яркой тембровой группы кларнетного типа в новом инструменте А. А. Володин добился улучшенного звучания в тембрах струнно-смычкового характера, а также гобоя, рожка, фагота и др.; кроме того, получены возможности для создания путем синтеза новых музыкальных тембров высокой художественности. Ценной особенностью конструкции В-8 является примененный в ней метод регулирования режима установления и затухания звука: при отрыве пальца исполнителя от грифа-клавиатуры генератор автоматически консервируется на частоте последнего взятого тона; одновременно возбуждается действие электронного реле-манипулятора, обеспечивающего затухание звука по экспоненциальному закону с любой заданной постоянной времени.

Большой интерес вызывает автореферат А. А. Хрущева о разработанной НИКФИ и получившей в эксплуатации высокую оценку новой аппаратуре двухканальной системы высококачественного воспроизведения звука. Эта система предусматривает раздельное воспроизведение области низких и высоких частот двумя самостоятельными каналами, начиная со входа усилителя, с помощью релактано-емкостных фильтров мостового типа, включенных в цепь отрицательной обратной связи первого каскада. Примененная в этой системе специально разработанная конструкция двухзвенных громкоговорителей позволяет воспроизводить широкую полосу частот от 40 до 10 000 гц при отклонениях частотной характеристики не более ± 6 дб. К принципиальным преимуществам новой системы относятся также резкое снижение интермодуляционных искажений, малые нелинейные искажения (менее 1% при номинальной мощности) и др.

(Известия Академии наук СССР, серия физическая, т. 13, № 6, 1949)

О ПРИМЕНЕНИИ ПРОВОДОВ С ПОЛИХЛОРВИНИЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И КАБЕЛЕЙ С ПОЛИХЛОРВИНИЛОВОЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

В отмену запрещения применения проводов с винилитовой изоляцией для осветительных и силовых электроустановок Государственная инспекция по промэнергетике и энергонадзору при МЭС разрешила в ряде случаев пользоваться этими проводами, изготовленными только на кабельных заводах Министерства электропромышленности. Приводим изложение этого постановления в несколько сокращенном виде.

Допущены к прокладке провода марок ПВ и ПГВ и кабели ВРГ, КВРГ, КСРГ и КСГ. В основном ограничения сходятся к следующему. Температура окружающей среды должна лежать в пределах от -40° до $+40^\circ$ для проводов и от -10° до $+30^\circ$ для кабелей. Напряжения допускаются до 500 в при переменном токе и до 1000 в при постоянном токе как для проводов, так и для кабелей. Нагрузки на провода марок ПВ и ПГВ допускаются те же, что и для проводов марки ПР, нагрузки на кабели ВРГ те же, что на кабели марки СРГ.

Впредь до издания специальной инструкции по монтажу указанных проводов и кабелей необходимо руководствоваться следующими указаниями: монтаж проводов допускается при температуре окружающей среды не ниже -15° , а кабелей не ниже -5° . Крепление проводов делать так же, как проводов марки ПР, а соединения пайкой, сваркой или механическим путем с последующим изолированием мест соединений прорезиненной или полихлорвиниловой лентой. Монтаж кабелей марок ВРГ и КВРГ в отношении крепления, соединения и оконцевания выполнять так же, как при монтаже кабелей марок СРГ и КСРГ. Окончание как проводов, так и кабелей рекомендуется выполнять наконечниками с механическим зажимом с последующей изоляцией поврежденных мест лентой. Наименьший допустимый радиус закруглений для кабелей — десятикратный наружный диаметр.

(Промэнергетика, стр. 16, № 9, 1949)

НОВЫЙ СПОСОБ СОХРАНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Этот способ состоит в том, что вокруг столба отывается воронка на глубину 15—20 см, в которую насыпаются огарки серного колчедана. Кроме того, огарки могут быть насыпаны вокруг столба в качестве противопожарного средства в желаемой для этого зоне (рис. 1). Огарки являются отходами химических и бумажноцеллюлозных предприятий и накопились в стране в количестве многих десятков миллионов тонн. Механизм пропитки состоит в том, что из увлажненных огарков выделяются содержащиеся в них соли, которые диффундируют в древесину на значительную глубину и высоту. В древесине, куда проникли растворы солей, создается кислая среда, препятствующая жизнедеятельности организмов. На столбах, подсыпанных огарками, уже в первые 1—2 мес. на выходе из земли появляется желтоватый налет из солей.

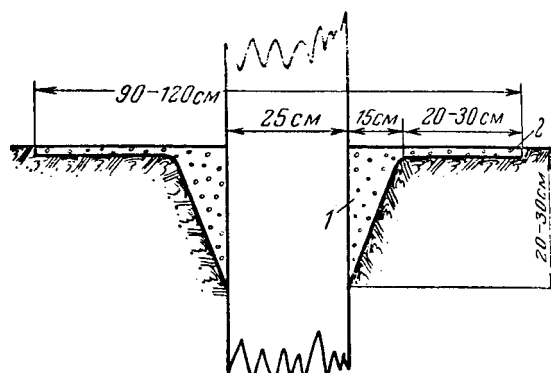


Рис. 1.

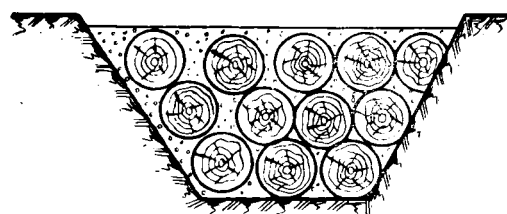


Рис. 2.

У извлеченных образцов пропитка распространилась на комля, на глубину 1,8—2 м.

Устройством антисептического «бандажа» из рубероида толя или жести с огарками можно сохранить верхушки столбов, узлы деревянных мостов, части свай на участках переменного уровня воды и т. п. С помощью огарков серного колчедана может быть весьма просто осуществлена общая пропитка древесины путем контакта ее с влажными огарками в котловане или штабеле (рис. 2) с выдержкой в течение 3—5 мес.

Описанный способ сохранения древесины является весьма эффективным. Применяя дешевый материал для консервации, мы получаем весьма надежную защиту дерева от гниения. Наблюдения над столбами, защищенными указанным методом, показали, что и через 11 лет никаких признаков загнивания нет.

(Электрические станции, № 12, 1949, А. В. Клейн, П. А. Куликов; Тоцкая промышленность, № 11, 1949, В. А. Виноградов)

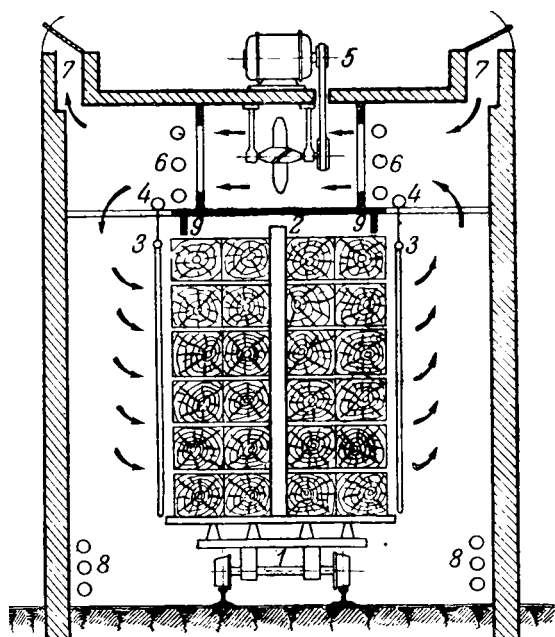
ВНЕДРЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОСУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

В области высокочастотной электросушки древесины приоритет принадлежит Советскому Союзу. Работы в этом направлении были начаты в 1932 г. Центральной научной исследовательской лабораторией треста «Севзаплес». Сложные вопросы технологии сушки пиломатериалов на заводском масштабе разрешались на опытной заводской установке.

В статье описывается сушильная камера, разработанная автором в названной лаборатории. Эскиз камеры дан на рисунке. Две стационарные электродные пластины (рисунке) камеры, установленные на подштабельной вынетке 1, разделяют штабель древесины на две части. Поверх электроды 3, числом 4, расположены попарно в передней и задней частях камеры. Электродные пластины свариваются из труб диаметром 50 мм. Поверх образованной, таким образом, рамы натягивается латунная сетка.

Камера позволяет также вести обычную паровую сушку. В камере осуществлена мощная реверсивная циркуляция воздуха поперек камеры, что обеспечивает равномерный нагрев древесины и позволяет укладывать ее без штабелей.

Камера работает по принципу непрерывного действия. Применение высокой частоты ускоряет процесс сушки по сравнению с паровой сушкой в 20—30 раз. Прогрев материала осуществляется по всему сечению штабеля, что обеспечивает высокие качества сушки. Для сушки при-



Высокочастотная электросушилка непрерывного действия искусственной реверсивной циркуляцией конструкции ЦНИЛ треста „Севзаплес“.

1—полштабеля вагонетка; 2—средняя электродная пластина, укрепленная на вагонетке; 3—подвесные электродные пластины; 4—балки для перемещения подвесных электродных пластин; 5—реверсивный вращатель; 6—калориферные трубки; 7—приточно-вытяжные воздушники; 8—дополнительные калориферные трубки; 9—воздушные экраны.

используют ламповые генераторы полезной мощности 40—50 кВт, $f=300$ —500 кГц. Суточная производительность 5—10 м³.

При всей его высокой технической эффективности процесс по причинам сравнительно большой затраты энергии можно рекомендовать к применению только для материалов, трудно поддающихся сушке в паровой камере, как, например, толстые сосновые и еловые ерщевинные брусья.

(Электротермия, № 4, 1949, В. А. Бирюков)

КЛЕЙКА ФАНЕРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ПОЛЕ

Лаборатория «Севзаппромэлектропечь» по инициативе Института фанеры (НИФ) произвела экспериментальную клейку фанеры из березового шпона в электрическом поле. При склейке применялся смоляной фенолформальдегидный клей. Температура склейки 140—150°С при удельном давлении на пакет 22—25 кг/см².

Клейка фанеры требует нагрева всего пакета, поэтому шпальные швы были расположены перпендикулярно направлению электрического поля. Важными параметрами для процесса склейки в поле высокой частоты являются диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь и пробивная прочность электрического поля. Диэлектрическая проницаемость при влажности шпона от 3 до 10% и температуре его 130—150°С колеблется в зависимости от степени влажности в пределах 4—4,5 при частоте $f=1,3$ мГц от 2,5 до 3 при $f=0,834$ мГц. Резко зависит от степени влажности тангенс угла потерь. При колебании процента содержания влаги от 3 до 10% и при $f=0,5$ мГц тангенс угла потерь изменяется от 0,05 до 0,5. Пробивная напряженность поля при $f=1$ мГц падает от 2,9 до 1,75 кВ/см при изменении содержания влаги от 4 до 14%.

В процессе исследования было достигнуто достаточно равномерное распределение температуры как по толщине пакета, так и в плоскости листа (6—8°С), что обеспечивает хорошее качество склейки.

О влиянии величины напряженности поля на скорость нагрева пакета можно судить по следующим цифрам: при напряженности поля $E=4$ кВ/см температура 150°С достигается через 2—3 мин., при $E=2,2$ кВ/см — через 4,5 мин.,

при $E=1,7$ уже через 10 мин., а при $E=1,5$ кВ/см температура 150° достигается лишь в 16 мин.

Влажность резко влияет на величину тангенса угла потерь, а следовательно, на величину поглощаемой в начале нагрева мощности. Опыты показали, что при влажности 10% температура склейки (150°С) достигается в 4—5 мин., а при начальной влажности 6% через 7 мин. Повышенная начальная влажность является фактором отрицательным, вызывающим повышенный расход энергии.

До известных пределов повышение частоты ускоряет процесс нагрева. Но, например, уже при достижении частоты 2 мГц пробивная напряженность поля шпона падает до 1,2 кВ/см, а при 1 мГц она составляет 1,7 кВ/см. Таким образом, выбор частоты 2 мГц может повести вследствие необходимости снизить напряженность поля к увеличению времени нагрева.

Ускоряет процесс нагрева также применение тонких шпонов и увеличение числа клеевых прослоек.

Механические испытания образцов фанеры показали, что коэффициент крепости клея находится в пределах требований стандарта, если температура пакета шпона в 150°С достигалась не менее чем за 5—6 мин с последующей выдержкой при этой температуре не менее 2 мин. Когда температура 150°С достигается в 3—4 мин., а выдержка при этой температуре составляет менее 1—1,5 мин, то крепость фанеры неудовлетворительная. При очень медленном нагреве (например, 16 мин) качество фанеры также неудовлетворительно.

Электротермия, № 4, 1949, А. В. Донской, С. М. Куляшов, С. Б. Соколов)

ЗА РУБЕЖОМ

КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Применение керамических материалов для изготовления высокочастотных конденсаторов хорошо известно. Вместе с тем возможность применения этих материалов даже при повышенном значении диэлектрической проницаемости в целях технической частоты при высоких значениях рабочего напряжения оспаривается многими специалистами современного конденсаторостроения. Фарфоровые конденсаторы высокого напряжения нашли себе несколько лет тому назад известное применение для непосредственного подключения к линиям передачи энергии в качестве «конденсаторов связи», используемых в установках высокочастотной связи; однако эти конденсаторы были весьма громоздки и не выдержали конкуренции с более компактными и надежными бумажно-масляными конденсаторами. В 1947 г. идея об использовании керамических масс с повышенной диэлектрической проницаемостью типа тиконд для изготовления конденсаторов, рассчитанных на работу в целях технической частоты при высоком рабочем напряжении, была выдвинута инж. Ракушевым, предложившим изготавливать эти конденсаторы из системы параллельно-соединенных тикондовых трубок, помещенных в фарфоровый кожух и залитых в нем маслом. В реферируемой статье описана конструкция керамического конденсатора емкостью 2000 пф с рабочим напряжением 110 кВ; в этой конструкции отчасти использована идея Ракушева. Конденсатор представляет собой систему керамических дисков специальной конфигурации, собранных в виде вертикальной стопки, помещенных в фарфоровый корпус и залитых в нем маслом. Диски изготовлены из титановой массы с диэлектрической проницаемостью порядка 80—100. Толщина диска составляет 3,5 мм; емкость каждого диска 1600 пф. Диски соединены параллельно в ряд групп; эти группы соединены между собой последовательно с таким расчетом, чтобы получить заданное значение суммарной номинальной емкости. Для изготовления дисков керамическая масса спрессовывается в виде плоских цилиндров, в которых затем (перед окончательным обжигом) протачиваются углубления необходимой формы.

В качестве обкладок конденсатора используется серебряный слой, нанесенный методом зжигания и усиленный гальваническим покрытием. При сборке конденсатора диски надеваются на керамический стержень, для чего в каждом диске проделано отверстие. Число дисков в каждой параллельной группе и число последовательно соеди-

ненных групп в статье не указано; можно полагать, что конденсатор собран из 8 групп, соединенных последовательно, при числе параллельно соединенных дисков в каждой группе, равной 10; в этом случае общее число дисков будет равно 80 шт. Рабочее напряжение на один диск составит тогда 14,25 кВ, что даст значение рабочей напряженности поля около 4 кВ/мм.

Разность закраин у отдельных дисков указана равной 10 мм; опасность разряда по закраине уменьшена применением заливки масла. Размеры тотового конденсатора: диаметр 600 мм и высота 1500 мм. Конденсаторы этого типа предназначаются для использования в качестве «конденсаторов связи». Удельная емкость конденсатора составляет 4,7 пф/дм³, в то время как фарфоровые конденсаторы старого типа имели удельную емкость 1,4 пф/дм³. Бумажно-масляные конденсаторы по данным реферируемой статьи имеют удельную емкость 5—5,5 пф/дм³, т. е. лишь немного больше, чем у нового типа керамического конденсатора, но уступают ему в отношении величины угла потерь и стабильности емкости. Следует отметить, что значения удельной емкости бумажно-масляных конденсаторов, указанные в статье, несколько занижены. Отечественные бумажно-масляные конденсаторы связи с рабочим напряжением 70 кВ, емкостью 4 400 пф имеют диаметр 436 мм и высоту 820 мм, что дает значение удельной емкости около 36 пф/дм³. При соединении двух таких конденсаторов последовательно имеем емкость 2 200 пф и возможность использования при напряжении 110 кВ. В этом случае удельная емкость будет составлять 18 пф/дм³, что больше чем в 3 раза превышает цифры, указанные в реферируемой статье.

Температурный коэффициент емкости керамических конденсаторов, изготовленных из массы, имеющей диэлектрическую проницаемость порядка 80, составляет — 0,07% на 1°С, в то время как для пропитанной маслом бумаги можно получить около — 0,01% на 1°С; таким образом, по температурной стабильности емкости тикондовый конденсатор также уступает бумажно-масляному. В отношении величины угла потерь при технической частоте тиконд также не должен давать особых преимуществ перед пропитанной бумагой. Таким образом, в наших условиях при технической частоте и высоком рабочем напряжении бумажный конденсатор еще имеет неоспоримые преимущества по сравнению с керамическим конденсатором.

(Elektrotechnik, № 1, 1949, O. Naumann)

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ФИРМЫ МЕТРОПОЛИТЕН-ВИККЕРС

В последние годы в Институте английских инженеров-электриков была проведена серия докладов по воздушным выключателям. Здесь мы остановимся лишь на последнем докладе, представленном фирмой Метрополитен-Виккерс в конце 1948 г. и опубликованном в конце 1949 г. На рис. 2 доклада приведена гасительная камера этой фирмы. Расстояние между трубчатыми контактами в отключенном состоянии составляет 16 мм. Номинальные параметры камеры: 66 кВ, 1 500 тыс. кВА. Путем последовательного соединения двух таких камер фирма получает выключатель 132 кВ, 3 500 тыс. кВА и четырех камер (рис. 5 доклада) выключатель 264 кВ 5 000 тыс. кВА. Судя по приведенным схемам выключателей, камеры (в отличие от других воздушных выключателей) соединены в них газодинамически симметрично. Такое соединение обеспечивает совершенно равномерное распределение дутьевого потока между камерами. Однако, получающееся при этом пространственное расположение камер приводит к весьма неравномерному распределению напряжения между ними, и

особенно неблагоприятную роль здесь играет разьединитель. Неравномерность усугубляется еще тем, что камеры располагаются горизонтально, что создает возможность случайного образования на некоторых из них загрязнений со значительной проводимостью. В связи с этим фирма уделила большое внимание вопросу регулирования распределения напряжения шунтирующими устройствами. Фирма считает наиболее пригодными для этой цели нелинейные сопротивления. По утверждению докладчика нелинейное сопротивление, пропускающее ток 9 а при пятидесятикратном амплитудном напряжении: 1) обеспечивает самые жесткие требования в отношении регулирования напряжения; 2) защищает от перенапряжений; 3) срезает амплитуду восстанавливающегося напряжения. Вместе с тем пропускаемый этим сопротивлением ток может быть отключен простым разьединителем, вследствие того что нелинейная характеристика сопротивления вызывает значительное подавление тока вблизи нуля.

Введение столь небольшого регулирующего сопротивления предопределило методику осуществления повторного включения в рассматриваемом выключателе. Очевидно, что общепринятое при этом размыкание только рабочих контактов здесь неприемлемо, поскольку слишком большой остаточный ток, протекающий через сопротивление, будет поддерживать отключаемую дугу. Таким образом, повторное включение здесь необходимо производить не только с помощью рабочих контактов, но и разьединителем. Однако, фирма указывает, что при этом получают некоторые преимущества по сравнению с общепринятой методикой: 1) отпадает специальный механизм повторного включения; 2) достигается довольно большая экономия воздуха. Из вышесказанного далее следует, что фирма должна была обратить серьезное внимание на конструкцию последовательного разьединителя. Наиболее целесообразным нашли двухразрядный разьединитель с вращающимся изолятором. Большая прочность фарфора на кручение и малая инерция позволяют достаточно легко получить скорость размыкания в 15 м/сек.

Конструкция камеры, естественно, привела к вышеописанной конструкции выключателя. Особенностью этой конструкции является также небольшое число камер. Это обстоятельство вызывает затруднения при испытании. Так испытание одной камеры при требуемом для этого напряжении 57 кВ (восстанавливающееся напряжение, приходящееся на камеру при отключении первой фазы) фирма могла довести лишь до 10 кВ, что составляет около 65% номинальной отключаемой мощности. Отключение больших токов могло производиться только при пониженном напряжении — 30 кВ. Таким образом, для суждения о работе камеры при предельных условиях пришлось прибегнуть к экстраполяции. Опытно было доказано¹, что в том случае, если ток и скорость восстановления напряжения настолько велики, что требуют при 20—30 кВ давления сжатого воздуха, превосходящего 60% номинального, то при 60 кВ и том же токе и скорости требуемое давление не будет выше, чем при 30 кВ. Это позволило производить испытания при 30 кВ и давлениях сжатого воздуха, превосходящих 60% номинального.

В заключение отметим, что как в самом докладе, так и в последующей дискуссии были подвергнуты рассмотрению различные вопросы, связанные с воздушными выключателями: величина резерва воздуха, сушка воздуха, сокращение расхода воздуха, равномерность распределения воздуха по разрывам, способы регулирования напряжения на разрывах, методика испытания, скорости восстановления напряжения и т. д. При этом по многим вопросам мнения выступающих оказались далеко не единодушными.

(PIEE, ч. II, т. 96, № 52, 1949, C. H. Fluzschelm, E. L. L. Léstrange)

Кандидат техн. наук Н. Н. ЛИННИЧЕНКО

¹ Приведенный в докладе материал не позволяет судить об устойчивости.



К статье А. А. Глазунова „Пути технического развития и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза“

(Электричество, № 10, 1949)

**Кандидат техн. наук, доц.
А. Н. ДМИТРИЕВ**

*Ленинградский электротехнический институт
им. Ульянова (Ленина)*

В статье затронуты весьма важные вопросы выполнения и реконструкции сетей больших городов. С большинством из них нельзя не согласиться. Однако, по некоторым из них мне хотелось бы высказать следующие соображения:

1. Автор утверждает, что «экономически целесообразную схему сети большого города можно получить только с применением глубоких вводов 35—110 кВ». Положение принципиально правильное. Однако, в ряде случаев экономически целесообразную схему сети большого города можно и даже необходимо строить без глубоких вводов. В самом деле, большинство городов и промышленных центров нуждаются не только в электрической энергии, но и в тепле. В крупных городах имеются или строятся теплофикационные станции (тэц). Поэтому при построении сетей больших городов приходится с ними считаться. При напряжении генераторов теплофикационных станций в 6,3—10,5 кВ осуществление глубоких вводов потребует дополнительно двойной трансформации энергии. Вот почему в ряде случаев осуществление глубоких вводов в большие города линий 35—110 кВ может оказаться экономически нерентабельным. Не следует также забывать, что промышленные нагрузки в больших городах обычно расположены на окраинах городов (кроме городского электрического транспорта).

2. Автор утверждает, что питательная сеть большого города должна строиться на напряжение 35 кВ. Но при рассмотрении питательной и распределительной сети города с точки зрения капиталовложений, расхода меди, потери энергии и прочих эксплуатационных расходов может оказаться, что напряжение 35 кВ для питательной сети не является наиболее экономичным. Повышение напряжения городских питательных (и даже распределительных) сетей, безусловно, необходимо. Наиболее целесообразно это начинать с повышения генераторного напряжения до возможного максимума, хотя бы на первом этапе до 20—22 кВ. В этом случае можно добиться, чтобы от шин 22-кВ теплофикационных станций и понизительных подстанций 220—110/22 кВ до отдельного приемника было не более 1—2 ступеней трансформации. Расчеты показывают, что именно этот случай соответствует минимальным потерям в сети. Но напряжение 22 кВ не стандартизовано, и электропротяженность на это напряжение не выпускает кабели, аппаратуру, трансформаторы, генераторы и пр. Поэтому следует напряжение 22 кВ ввести в ГОСТ. Кстати следует заметить, что напряжение 22 кВ, повидимому, найдет значительное распространение при электрификации сельского хозяйства.

Таким образом, напряжение 22 кВ для питательной и распределительной сетей большого города

да при устройстве глубоких вводов является более целесообразным вариантом. В старых городах, имеющих разветвленную питательную и распределительную сети 6 кВ и электрические станции в черте города с генераторным напряжением 6,3 кВ — вопрос о напряжении питательной сети может быть решен на основе сравнительных технико-экономических расчетов и в пользу 35 кВ.

3. Выбор схемы питательной сети (22 или 35 кВ) следует производить, исходя из необходимости обеспечить высокую надежность электроснабжения. Это требование для сетей больших городов должно быть основным, определяющим. При проектировании электроснабжения больших городов следует, по возможности, исключить обмен мощностями между источниками питания через питательную сеть города. Исходя из требования высокой надежности электроснабжения, питательная сеть 22 или 35 кВ должна проектироваться как сложная замкнутая сеть. Схема сети в известной мере зависит от релейной защиты. Современная техника релейной защиты позволяет выполнить достаточно надежную защиту и в весьма сложной замкнутой сети.

4. При наличии сложной замкнутой питательной сети 22—35 кВ и замкнутой сети низкого напряжения бесперебойность питания потребителей должна быть обеспечена. Автоматизация еще больше повысит надежность электроснабжения и позволит уменьшить потери в сети. Например, осуществление автоматического включения и отключения сетевых трансформаторов в зависимости от их загрузки может серьезно уменьшить потери энергии в сетевых трансформаторах.

5. В сетях больших городов должно быть обеспечено поддержание у потребителей определенного уровня напряжения. Средства регулирования и их возможное размещение: а) трансформаторы с автоматической регулировкой напряжения под нагрузкой на подстанциях 35/10—6 кВ (или 22/10—6 кВ); б) синхронные компенсаторы на этих же подстанциях; в) конденсаторы, включенные последовательно в линии питательной сети 35 кВ (питательной сети и распределительной сети 22 кВ); г) сетевые трансформаторы с автоматической регулировкой напряжения под нагрузкой. Многие вопросы, связанные с регулированием напряжения в сетях крупных городов, требуют серьезного изучения, а главное — требуют проведения широких экспериментов в сетях. К их проведению следует привлечь и вузы.

Кандидат техн. наук А. И. САНДЛЕР

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Схемы электроснабжения больших городов с глубоким вводом напряжением 35 кВ, как справедливо указывает автор, должны быть широко использованы при сооружении и реконструкции городских сетей. Проведенные расчеты для некоторых областных центров показали, что глубокие вводы с подстанциями 35/6,0—10 кВ с двумя трансформаторами мощностью по 7 500 кВА позволяют сократить число питательных пунктов и кабельных цепей

6,0—10 кВ. Каждая подстанция 35 кВ, сооруженная в центре городской нагрузки, позволит сократить число питательных пунктов на 2—3, а длину кабельных цепей—до 10 км. Число существующих центральных распределительных пунктов (ЦРП) сохраняется без изменений, питание их осуществляется от подстанций 35/6,0—10 кВ. Уменьшение числа питательных пунктов и кабельных связей снижает капитальные затраты, позволяет значительно упростить схему городской сети и улучшить условия ее эксплуатации.

Применение глубоких вводов с подстанциями 35/6,0—10 кВ для питания городских сетей позволит уменьшить число коммутационных переключений в сети и, что особенно важно, уменьшит число переключений, производимых с помощью разъединителей. Кроме того, при указанной схеме электроснабжения появляется возможность более широкой автоматизации. Таким образом, наличие глубоких вводов с подстанциями 35/6,0—10 кВ в качестве питательных центров повышает надежность электроснабжения. Уменьшение числа питательных пунктов и кабельных линий 6,0—10 кВ позволит уменьшить число профилактических испытаний, проводимых непосредственно в сети в неудобных и неблагоприятных условиях. Профилактические испытания, проводимые на подстанциях 35/6,0—10 кВ, значительно менее трудоемкий процесс, чем испытания в городских сетях.

Нам представляется, что наиболее рационально построенные сети 35 кВ для питания глубоких вводов должны быть сети радиально резервированные и петлевые (кольцевые). Обмен крупных мощностей между источниками энергии по городским сетям 35 кВ, как правило, не должен допускаться. Поэтому применение сложных замкнутых сетей 35 кВ, затрудняющих эксплуатацию, увеличивающих капитальные и эксплуатационные затраты, для указанных целей нерационально. Глубокие вводы 35 кВ, построенные по указанным выше принципам, увеличивают надежность электроснабжения городов, позволяют применить простые и надежные блокировочные и автоматические устройства, позволяют выбирать более простые схемы коммутации подстанций 35 кВ, что также уменьшает капитальные затраты на сооружение последних. Естественно, что окончательный выбор схемы сети 35 кВ может быть решен лишь при учете всех конкретных местных условий. Подстанции 35 кВ для глубоких вводов в крупных городах должны быть закрытого типа. Применение воздушных выключателей 35 кВ вместо масляных позволит отказаться от взрывных камер в закрытых распределительных устройствах, даст возможность разместить оборудование в открытых камерах, что коренным образом изменит конструкцию распределительных устройств и позволит выполнить их более компактными и дешевыми. В отношении сети 6,0—10 кВ можно сказать, что наиболее распространенная кольцевая схема при наличии определенных резервов по пропускной способности и должной автоматизации, хотя и не решает полностью всех вопросов надежного электроснабжения городов, все же является в настоящее время наиболее рациональной. Здесь уместно сказать, что вопросу целесообразного резерва в городских сетях необходимо уделить особое внимание. Городская сеть, выбранная по экономической плотности тока, уже сама по себе содержит значительный скрытый резерв. В случае повреждения или ненормального режима работы сети она может с успехом работать, исходя из условий нагрева. Однако, большинство городских сетей было выбрано, исходя из условий нагрева. Поэтому реконструкцию необходимо производить, таким образом, чтобы сети могли принять некоторую дополнительную нагрузку без коренной их переладки.

В городах Советского Союза все большее число домов газифицируется и теплофицируется, что приводит к снижению нагрузки от бытовых нагревательных приборов. С другой стороны, увеличивается мелкомоторная нагрузка городов, обслуживающая нужды населения. Это приводит к снижению коэффициента мощности ($\cos \varphi$). Повышение напряжения, подводимого к зажимам асинхронных двигателей, приведет к еще большему снижению коэффициента мощности вследствие увеличения магнитного потока, а следовательно, реактивной мощности и тока холостого хода. Поэтому, прежде чем окончательно принять решение о переводе сети низкого напряжения со 110/220 на 220/380 В, необходимо учесть увеличение по-

требляемой мощности лампами накаливания 220 В, о чем указывается в статье, а также снижение коэффициента мощности. При замене ламп накаливания газосветными и широкое применение компенсирующих устройств вопрос о напряжении низковольтной сети будет решаться однозначно, в пользу повышения его до 220/380 В.

В заключение следует указать, что вопрос о глубоком вводе для питания городских сетей должен быть изучен в значительно большей степени. Идея глубокого ввода должна быть распространена и для питания сетей низкого напряжения.

Инж. Н. И. МЕДВЕДСКИЙ

Ростропроект

Вопрос о путях развития сетей поднимается на страницах журнала не впервые. В частности, идея глубоких вводов высокого напряжения, которая содержится и в рассматриваемой статье, была предложена в начале 1948 г. П. Г. Грудинским¹. Новым в этой части является рекомендация авторов ввести промежуточную трансформацию 110/35 кВ.

В основу развития электрических сетей положен значительный рост нагрузок на квадратный километр в связи с постройкой многоэтажных зданий. Для этого типа городов возможно, что устройство промежуточной трансформации при определенных условиях и окажется целесообразным. Во всяком случае целесообразность осуществления этого мероприятия должна быть доказана на конкретном случае, а как общее решение это предложение не может быть рекомендовано ввиду невысоких экономических показателей. В целях использования существующей сети 6 кВ автор предлагает либо строить подстанции 35/6 кВ вместо существующих распределительных подстанций, либо объединять последние по несколько штук на питание от одной подстанции глубокого ввода 35 кВ.

Возведение многоэтажной застройки за счет 4—6-этажной приведет к настолько резкому увеличению нагрузки на данной площади, что существующие сети 6 кВ потребуют замены или по крайней мере полной их реконструкции. При такой реконструкции целесообразность сохранения количества и местоположения распределительных подстанций находится под сомнением.

Для районов многоэтажной застройки сеть низкого напряжения, прокладываемая по улицам города вне зависимости от ее схемы, в основном отпадает. Для этих районов встает вопрос о схемах внутридомовых сетей многоэтажных зданий. Следует отметить, что внедрение городских замкнутых сетей низкого напряжения как проектной, так и эксплуатационной практики является насущной задачей для города с обычной застройкой в 5—6 этажей. Поэтому надо поддержать предложение о необходимости изучения и внедрения замкнутых сетей низкого напряжения, преимущества которых для всех очевидны.

В заключение можно указать, что в дальнейшем развитии идея глубокого ввода имеет большое будущее. Введение же двойной трансформации вряд ли может быть рекомендовано как общее решение.

Инж. Л. Ф. ТЕЙХМАН

Секция электрических сетей Ленинградского отделения ВНИТОЭ

Указания А. А. Глазунова о целесообразности применения «глубоких вводов» 35 кВ, несомненно, правильны, однако при решении вопроса о их применении в существующих сетях следует учитывать технико-экономические сопоставления вариантов применения 6, 10 и 35 кВ, когда принимаются в расчет величины нагрузок, их расстояния от центров питания и соотношение нагрузки высоковольтных двигателей у потребителей и их общей нагрузки. Правильны также указания А. А. Глазунова о необходимости внедрения замкнутых электрических сетей, однако указания А. А. Глазунова о том, что такие сети в наибольшей степени подходят для небольших городов, не

¹ П. Г. Грудинский. Электрические станции, № 1, 1948.

обоснованы. Такие схемы оказались как раз наиболее целесообразными в районах нового жилищного строительства Ленинграда при весьма значительных плотностях нагрузки (удельная погонная плотность нагрузок — 4400—0,500 kвт/м против 0,250—300 kвт/м в существующей сети в центре Ленинграда); никаких ограничений в части размера сети при осуществлении ее по схеме замкнутой сети без сетевых автоматов нет, так, например, осуществленный в центре Ленинграда участок сети, выполненный по этой схеме, связывает 10 трансформаторных пунктов, и это число может быть удвоено или утроено в зависимости от местных условий.

Организацией ЛОНИТОЭ в Ленинградской кабельной сети Ленэнерго весной 1949 г. был проведен ряд докладов, посвященных принципам построения городских электрических сетей, опыту проектирования замкнутых сетей в результате эксплуатации опытного участка замкнутой сети, осуществленного в Ленинграде. При обмене мнений было отмечено, что принятие выдвинутого А. А. Глазунова положения о преимуществах напряжения 220/127 в по сравнению с напряжением 380/220 в , основанное на двадцатипроцентной разнице в потреблении энергии лампами более высокого напряжения, нецелесообразно. При существующей шкале мощности ламп накаливания замена лампы 40 вт возможна только на лампу 60 вт (кстати, лампы маркируются в настоящее время не на свечи, как в то время, когда этот вопрос был поднят проф. Хрущевым, а на ватты). В жилых квартирах выбор мощности ламп не производится по светотехническому расчету, поэтому соображения о большей экономичности системы 220/127 в являются только условными. Перерасход же при системе 380/220 в отнюдь не является условным и пересмотр правительственного решения о принятии для всех новых сетей напряжения 380/220 в следует считать совершенно излишним.

Выводы. 1. При развитии городских сетей среднего напряжения следует считать целесообразным применение более высоких напряжений, однако, только при экономической равноценности вариантов, или по крайней мере когда вариант более высокого напряжения не многим дороже варианта более низкого напряжения. 2. Построение новых и реконструкция существующих сетей низкого напряжения следует осуществлять по замкнутой схеме без сетевых автоматов. 3. Новые сети должны осуществляться при напряжении 380/220 в .

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ
Московский энергетический институт
и м. Молотова

А. Н. Дмитриев считает, что в ряде случаев экономически целесообразную схему сети большого города можно осуществить без глубоких вводов 35—110 kв , опирая сеть 6—10 kв на теплоэлектроцентрали, расположенные в городе. С этим положением согласиться нельзя. Эксплуатация современных теплоэлектроцентралей показывает, что несмотря на принимаемые меры, они загрязняют воздух и значительную территорию города. Поэтому, как известно, наметилась тенденция на вынос теплоэлектроцентралей за черту города, с удалением от центра города на 15—20 и более километров. При таких расстояниях передавать и распределять сотни тысяч и более киловатт, с применением только напряжений 6—10 kв , безусловно невозможно.

Нет сомнения, что в отдельных случаях экономически наиболее целесообразным напряжением для электрификации большого города может оказаться напряжение 20—22 kв , не являющееся стандартным. Однако введение ГОСТ нового напряжения 20—22 kв не может быть оправдано только экономической целесообразностью этого напряжения для отдельных частных случаев. Общее решение вопроса о шкале стандартных напряжений было дано в статье, написанной мною совместно с С. А. Гелинским «Экономически целесообразная шкала стандартных напряжений в диапазоне 10—220 kв ». В этой статье¹ была показана нецелесообразность введения в шкалу напряжения 20 kв . С выводами этой статьи согласился Технический совет Министерства электростанций СССР.

¹ Электричество, № 11, 1948.

А. Н. Дмитриев считает, что сети 22—35 kв должны строиться сложными, замкнутыми. Сложные сети потребуют сложных схем городских подстанций; это повлечет увеличение размеров подстанций и приведет к практической невозможности их размещения в городе. Подстанции должны быть с простейшими схемами, однотрансформаторными с резервированием питания по сети 6—10 kв . Присоединение трансформаторов к сети должно быть упрощено через выключатели нагрузочных токов и плавкие предохранители. Ряд подстанций, по всей видимости, придется строить подземными. Все это возможно только при простейших схемах сети 35 kв . Рекомендация А. Н. Дмитриева о применении для регулирования напряжения в сетях больших городов синхронных компенсаторов на подстанциях 35/10—6 kв и конденсаторов, включенных последовательно в линии питательной и распределительной сетей 22—35 kв не обоснована. Городская питательная и распределительная сети должны быть выполнены кабелями и, следовательно, будут иметь очень небольшие реактивные сопротивления. При малом реактивном сопротивлении потребуются для регулирования напряжения очень большая мощность синхронных компенсаторов, что приведет к увеличенным капитальным вложениям и повышенным эксплуатационным расходам. Безусловно, возрастут суммарные потери мощности и энергии в сети из-за внутренних потерь мощности в компенсаторах. Но даже, идя на большие неоправданные расходы, осуществить регулирование напряжения в кабельной сети города в нужных пределах синхронными компенсаторами невозможно.

Последовательное включение конденсаторов может дать эффект регулирования напряжения только при большом реактивном сопротивлении передачи, когда потери напряжения определяются в основном этим сопротивлением. Врезание конденсаторов последовательно в кабельные линии с малыми реактивными сопротивлениями нецелесообразно. Значительно возрастут первоначальные затраты и эксплуатационные расходы, увеличатся размеры подстанций и снизится надежность работы сети. При всем этом напряжение у потребителя отрегулировано не будет. Целесообразное решение регулирования напряжения при кабельных сетях может быть получено только применением трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой.

Л. Ф. Тейхман и А. И. Сандлер считают, что применение напряжения 220/127 в нецелесообразно, и полагают доказанной экономичность применения напряжения 380/220 в для больших городов Советского Союза. Опыт строительства в Москве десятиэтажных и высотных зданий показал целесообразность применения напряжения 220/127 в ; на это напряжение и осуществляются сети этих домов.

Защитники напряжения 380/220 в для больших городов оперируют доводами, которыми они оперировали более 15 лет тому назад и не считаются с коренными изменениями, происшедшими в строительстве больших городов. Большие города застраиваются многоэтажными зданиями, что приводит к необходимости устанавливать трансформаторы непосредственно в домах. В постройках с высотой более 8—10 этажей трансформаторы размещаются не только на уровне земли, но и на других этажах. Наружная распределительная сеть низкого напряжения в таких условиях отпадает. Раздача энергии осуществляется на очень небольшие расстояния. Если вспомнить прежнюю дискуссию с В. М. Хрущевым, то придется констатировать, что решающее влияние на величину экономического напряжения сети низкого напряжения оказывали затраты на наружную распределительную сеть низкого напряжения, которой теперь не должно быть. Л. Ф. Тейхман считает, что выбор мощности ламп в жилых помещениях не производится на основе технических расчетов и потому соображения о большей экономичности системы 220/127 в являются условными. Думается, что принятое в статье увеличение осветительной нагрузки при системе 380/220 в на 20%, по сравнению с системой 220/127 в , является не преувеличенным, а преуменьшенным. Совершенно правильно, что жители города не производят светотехнических расчетов, а решают задачу более просто. Если освещение комнаты или рабочей поверхности недостаточное, покупают и ввертывают более мощную лампу. При этом их совсем не смущает, что они переходят от лампы

40 вт на лампу 60 вт потому, что стоимость электроэнергии на освещение составляет малую долю бюджета советского гражданина, проживающего в большом городе. Таким образом, один из основных доводов, что потребитель должен будет перейти от лампы 40 вт на лампу 60 вт выглядит «страшно» только на бумаге и является чисто формальным положением, основанном на нежелании считаться с реальностью жизни.

В статье написано, что вопрос напряжения сети низкого напряжения связан с распространением люминесцентных ламп. Необходимо уточнить это положение. В настоящее время, люминесцентные лампы на 127 в изготавливаются, начиная с мощностей $15 \div 20$ вт, а на напряжение 220 в только начиная с $30 \div 40$ вт. Возможность изготовления ламп на 220 в. меньшей мощности еще неясна. Если не удастся снизить мощность люминесцентных ламп на 220 в, то от лампы 30—40 вт будем иметь световой поток такой же, как от лампы накаливания мощностью 75—100 вт. Вряд ли можно считать целесообраз-

ным устройство системы освещения, при которой наименьший источник света дает столь большой световой поток, который в целом ряде случаев не может быть использован. Специальная форма люминесцентных ламп в виде длинных трубок не способствует их внедрению для освещения жилых помещений.

Предложение Л. Ф. Тейхмана о выполнении в крупных городах замкнутых сетей без сетевых автоматов, а лучшим случае, является спорным. Можно согласиться, что в средних городах выполнение ограниченно замкнутых сетей без сетевых автоматов имеет ряд преимуществ. В больших городах вопрос об уменьшении потерь энергии в сетевых трансформаторах и вопрос о гибкости работы сети не могут быть отброшены. Целесообразность построения в этих условиях сетей без сетевых автоматов должна быть серьезно доказана. При этом стоимость сетевых автоматов не должна приниматься высокой, определявшейся стоимостью первых образцов автоматов.

К проекту стандарта на номинальные напряжения стационарных электрических сетей¹

(Электричество, № 1, 1950)

Член-корр. АН СССР, проф. М. А. ШАТЕЛЕН

*Ленинградский политехнический институт
и.м. Калинина*

Считая проект стандарта отвечающим современным требованиям, все же нужно обратить внимание на предложение включить в шкалу высоких напряжений (выше 1000 в) напряжение 150 кв. Его следует ввести с такой же оговоркой, какая сделана для напряжения в 60 кв, т. е., что оборудование на 150 кв изготавливается как для существующих установок, так и для новых в случаях, когда это напряжение окажется исключительно целесообразным. Введение в шкалу напряжения 150 кв наравне с 110 и 220 кв мне кажется нежелательным, так как оно усложнит связи между системами и во многих случаях из-за временных соображений будет применяться там, где, имея в виду развитие системы, надо было бы применить напряжение 220 кв.

Снижение напряжения больших линий электропередачи никогда не давало преимуществ при развитии сети. Наоборот, применение пониженного напряжения часто создавало затруднения при увеличении передаваемой мощности, в связи с развитием потребителей. Это обстоятельство вызывало даже необходимость во вторичной трансформации, в частности, со 150 на 220 кв.

Учитывая, что стоимость оборудования 220 кв уже понизилась и будет, несомненно, понижаться в дальнейшем, я считал бы возможным ограничить применение напряжения 150 кв только самыми необходимыми случаями.

Инж. В. Н. АНТОНОВ

Министерство легкой промышленности СССР

1. Введение нового междупазного напряжения трехфазного тока 50 гц — 1000 в является для предприятий Министерства легкой промышленности излишним и нецелесообразным по следующим соображениям:

а) Массовое внедрение в легкую промышленность мелкого индивидуального электропривода, устанавливаемого непосредственно на технологических машинах и работающих с многократным остановом, пуском и регулировкой, исключает применение напряжения 1000 в, повышающего опасность поражения рабочих электрическим током.

б) Широко рекомендуемое решениями Всесоюзной научно-технической сессии по электроснабжению промышленных предприятий устройство глубоких высоковольтных вводов и применение комплектных распределительных

устройств, комплектных внутрицеховых подстанций и шинно-проводов сокращает до минимума протяженность внутрицеховых низковольтных распределительных сетей и тем самым исключает необходимость применения напряжения 1000 в для распределительных сетей.

Применение напряжения 1000 в для магистральных силовых сетей с последующей трансформацией энергии на напряжение 380 и 220 в привело бы к усложнению схемы питания и не дало бы экономии электроэнергии, в связи с необходимостью дополнительной трансформации энергии с напряжением 1000 в на напряжение 380 и 220 в.

в) Включение кабельных сетей, имеющих номинальное напряжение 1000 в, на рабочее напряжение 1000 в повлечет к снижению надежности питания электрических генераторов, приемников электрической энергии, так как изоляция кабелей 1000 в будет работать на пределе.

2. В примечании 4 после слов: «Для существующих систем с номинальным напряжением...» следует поместить слова: «0,127; 0,5; 2,1; 15 и 31,5 кв изготовление трансформаторов и приемников электрической энергии заводами-изготовителями по заказам промышленности обязательно».

Без внесения такого добавления в это примечание предприятия, имеющие сети с междупазовым напряжением 127 в, будут лишены возможности применить трансформаторы и приемники электрической энергии на это напряжение.

Кандидат техн. наук Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ

Гидроэлектростроитель

Введение напряжения 20 кв имеет существенное значение для развития сельской электрификации. При напряжении 20 кв явится возможность применять одностолбовые опоры со штыревыми изоляторами, с подвеской в ряде случаев железных проводов, что обеспечит невысокую стоимость таких линий, незначительно отличающуюся от стоимости линий 10 кв.

Пропускная способность линий напряжением 35 кв и выше хорошо характеризуется их натуральной мощностью, которая для применяемых в настоящее время напряжений 35, 110 и 220 кв соответственно равна 3, 30 и 120 тыс. квт.

Вследствие столь резкого скачка пропускных способностей нередко сооружаются линии с большим перерасходом стали для опор и цветного металла и увеличенными потерями энергии, т. е. линии явно неэкономичные.

Существующие типы деревянных опор на напряжение 35 кв по своим габаритам и применяемым на них проводам полностью пригодны для напряжения 60 кв, требуется лишь некоторое усиление изоляции, а потому стоимость линий 60 кв останется почти такой же, как и ли-

¹ Начало дискуссии см. Электричество, № 1, 3, 1950.

35 кВ. Удорожание трансформаторов и аппаратуры на напряжение 60 кВ по сравнению с напряжением 35 кВ относительно невелико, а потому следует ожидать значительного уменьшения капиталовложений по сетям при его введении.

Целесообразность введения напряжения 60 кВ будет убедительнее, если его рассматривать одновременно с напряжением 154 кВ. Применение напряжения 154 кВ позволит сократить число линий по сравнению с напряжением 110 кВ и, несмотря на некоторое увеличение стоимости подстанций, получить в конечном результате уменьшение капитальных затрат, а также потерь энергии. При экономическом сравнении вариантов напряжений следует исходить из одинаковой экономической плотности тока. Переход с напряжения 110 кВ на более высокое напряжение 154 кВ дает теоретически уменьшение затрат цветного металла и потерь энергии в отношении $\frac{154}{110} = 1,4$.

Кроме того, уменьшается расход металла для опор и количество изоляторов.

В том случае, когда одновременно с магистральными линиями 154 кВ применяется распределительная сеть напряжением 35 кВ, имеющая относительно небольшой экономический радиус действия, то расстояние между подстанциями 154/35 кВ не может быть взято достаточно малым и это существенно увеличивает капиталовложения в подстанции по сравнению с подстанциями 110/35 кВ. Введение взамен 35 кВ напряжений 60 кВ позволяет приблизительно вдвое сократить число 154-кВ подстанций. Для дальнейшего распределения энергии применять 60 кВ, то получать сеть со следующими ступенями напряжений: 154—66—20 кВ вместо применяемых в настоящее время 110—35—10 кВ.

Если в существующих энергосистемах широкое введение напряжений 60 и 154 кВ будет, вероятно, затруднительно, то для новых энергетических систем применение неуклонно возрастающей шкалы напряжений может обеспечить существенный экономический эффект и позволит построить электрическую сеть на более рациональных основаниях. Следует учесть также, что на понижающих подстанциях будет применяться не трансформаторы, а автотрансформаторы, имеющие приблизительно в 3 раза меньшую стоимость, в 2,5 раза меньшие потери энергии и приблизительно на 40% меньшую стоимость.

Необходимо отметить еще следующее.

В табл. 3 напряжение 60 кВ заключено в скобки, их следует снять.

В той же табл. 3 указано, как номинальное напряжение 150 кВ — следует его изменить на 154 кВ, так как лишь в последней величине получается удвоение натуральной мощности линии по сравнению с напряжением 110 кВ. Соответственно, напряжения вторичных обмоток трансформаторов и наивысшее напряжение сети будут равны 169 и 177 кВ. Проектом ГОСТ предусматривается за пределами 1 кВ введение еще одной ступени напряжения — 400 кВ, натуральная мощность линии при этом будет равна 400 тыс. кВт, что дает скачок мощности $\frac{400}{120} = 3,33$ раза.

Ближайшей по сроку конкретной сверхмощной электростанции это напряжение будет, по видимому, вполне целесообразным с точки зрения капитальных затрат и потерь энергии, но для других возможных объектов его применение вызывает сомнение, так как столь большая натуральная мощность не координируется с мощностью приемных систем. Следует предусмотреть промежуточную ступень 310 кВ, чему соответствует натуральная мощность 1 тыс. кВт.

Для некоторых конкретных объектов оно будет, по мнению, оптимальным по технико-экономическим показателям. В необходимых случаях величина 240 тыс. кВт может быть существенно повышена при применении распределительных проводов, продольной компенсации и некоторых других мероприятий, а также если длина линий не чрезмерно большая — порядка 500 км.

В заключение следует отметить, что в табл. 2 отсутствует напряжение 500 В, которое имеется в действующем стандарте и имеет достаточное распространение в промышленности. Целесообразность его исключения из шкалы напряжений сомнительна.

Доктор техн. наук А. Г. ЗАХАРИН
Энергетический институт им. Кржижановского
АН СССР

и кандидат техн. наук Л. Е. ЭБИН

Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства

По протяженности существующих высоковольтных линий электропередачи и их ежегодному приросту сельское хозяйство превосходит все другие, вместе взятые отрасли народного хозяйства; поэтому одним из важнейших требований к новому стандарту напряжений является требование обеспечить наиболее экономичные условия распределения электроэнергии в сельскохозяйственных районах.

Учитывая важность вопроса о введении напряжения 20 кВ, мы сочли необходимым подвергнуть его дополнительно исследованию с целью подтвердить те общие соображения, которые уже были высказаны раньше (Электричество, № 6, 1949) в пользу введения специально для нужд сельского хозяйства напряжения 20 кВ.

В связи с указанием, сделанным в правительственном постановлении от 29 мая 1948 г. о развитии сельской электрификации, мощности сельских электростанций за последние годы неуклонно возрастали; в руководящих указаниях министерства сельского хозяйства по составлению генеральной схемы сельской электрификации верхний предел мощности сельских электростанций принят равным 5 000 кВт. Теперь, когда электростанции от 500 до 5 000 кВт получают применение в связи с широкой электрификацией сельскохозяйственных районов, пришлось столкнуться с значительными затруднениями в вопросах распределения электроэнергии. Уже при мощностях 500—1 000 кВт применение напряжения 10 кВ при низких плотностях нагрузки связано с большим расходом цветных металлов и тяжелых, дорогих сечений стальных проводов Ж-70, Ж-95, а с дальнейшим ростом мощности мы приходим к такому положению, когда напряжение 10 кВ уже неприемлемо из условий электрического расчета, а переход на систему двух высоких напряжений 35 и 10 кВ еще очень невыгоден из экономических соображений. В этом интервале мощностей напряжение 20 кВ имеет столь серьезные преимущества, что заставляет настойчиво выдвигать его как напряжение, необходимое при широкой электрификации сельскохозяйственных районов.

Для выяснения закономерностей, связывающих технические и экономические параметры распределения электроэнергии в сельскохозяйственных районах, использованы приближенные формулы для сельских сетей, определяющие протяженность распределительной сети высокого напряжения L и вес металла проводов G :

$$L = \frac{\alpha}{\gamma} \sqrt{\frac{N}{F}} = \frac{\alpha}{\gamma P_T} \text{ км/кВт}; G = \frac{\beta}{5\epsilon} \left(\frac{CR}{U} \right)^3 \text{ кг/кВт},$$

где F — территория, охватываемая сетью, в км²;

P_T — средняя мощность одного трансформаторного пункта, в кВт;

N — количество трансформаторных пунктов;

α — коэффициент формы сети, равный $\alpha = 0,80 - 0,90$;

R — наибольший радиус сети в км;

ϵ — допускаемая потеря напряжения в проводах, в %;

β — коэффициент, учитывающий материал проводов;

C — коэффициент, учитывающий увеличение веса по отношению к идеальному случаю равномерно распределенной нагрузки и равный $C = 1,15 - 1,25$;

γ — плотность нагрузки в кВт/км².

Как показало исследование, в отдельных сетях при пользовании приближенными формулами ошибки могут достигать $\pm 15 - \pm 17\%$, но в среднем по большому количеству сетей получаются достаточно близкие результаты, что позволяет применить их в данном случае. На рис. 1 построены кривые расходы металла в кг/кВт в зависимости от радиуса действия сети при напряжениях 10 и 20 кВ. Каждая кривая состоит из двух частей: при малых радиусах сечение проводов определяется механической прочностью применяемого сечения (Ж-4) и вес проводов при любом радиусе определяется лишь длиной сети

$$G = gL \text{ кг/кВт},$$

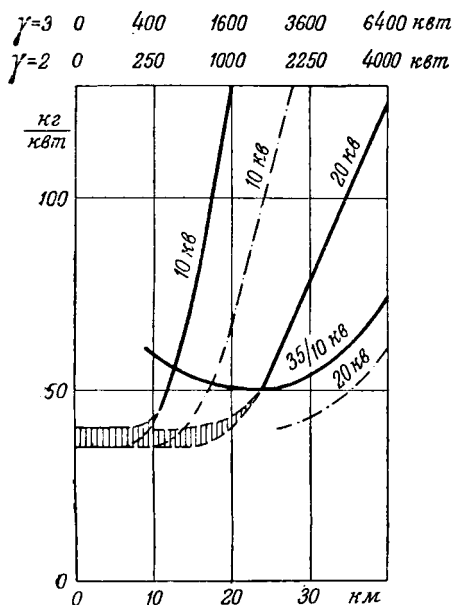


Рис. 1. Вес проводов в зависимости от радиуса сети.

где g — вес проводов на 1 км сети, в кг/км. На рис. 1 для этого случая построены два прямолинейных участка кривой, соответствующих плотности нагрузки $\gamma = 2$ и 3 кВт/км^2 при $P_T = 20 \text{ кВт}$. Заштрихованная часть между этими линиями определяет значения расхода металла при плотности нагрузки от 2 до 3 кВт/км^2 . Вторая часть кривой соответствует сетям с тяжелыми сечениями проводов (при $\epsilon = 10\%$), в которых расход металла на 1 кВт в пределах применяемых сечений определяется радиусом передачи энергии и возрастает пропорционально квадрату радиуса, т. е. кривая имеет вид отрезка параболы, проходящей через начало координат. Переход от первых кривых ко второй изображен пунктирными линиями, характеризующими примерные значения веса металла в переходной области.

Описанные выше кривые построены на рис. 1 применительно к стальным проводам. Для приближенного учета влияния применения в сети также цветных металлов в формулы могут быть подставлены коэффициенты, соответствующие средней весовой структуре проводов в сети. Так, если принять, что в сеть вкладывается по весу 90% стали и 10% алюминия (что в обычной практике считается большим удельным весом цветных металлов), то условный провод будет иметь характеристики: удельный вес 7,3, сопротивление $70 \text{ ом/мм}^2 \text{ и км}$, откуда $\delta = 7,3 \cdot 70 = 510$, т. е. в два раза ниже, чем для стальных проводов. Характеристики для такой структуры вложений металла в сеть построены на рис. 1 штрих-пунктиром.

Переход от радиусов сети к мощности станций может быть осуществлен при помощи выражения:

$$P = \gamma a_1 a_2 \pi R^2,$$

где a_1 — коэффициент для перехода от суммарной мощности максимумов в трансформаторных пунктах к мощности станций, принятый равным 0,7;

a_2 — коэффициент, учитывающий переход от заселенной территории, в пределах которой развивается высоковольтная сеть, ко всей территории района, включающей лесные массивы, болота, озера и т. п. Этот последний коэффициент, на основании имеющегося опыта для основных сельскохозяйственных районов может быть принят равным 0,5—0,7, в среднем 0,6, откуда мощность станции будет равна:

$$\begin{aligned} \text{при } \gamma = 2 \quad P &\approx 2,5 R^2, \\ \text{при } \gamma = 3 \quad P &\approx 4 R^2. \end{aligned}$$

Значения соответствующих мощностей нанесены в виде шкалы мощностей на графике рис. 1 сверху.

Из рассмотрения рис. 1 могут быть сделаны следующие выводы: напряжение 10 кВ позволяет применять стальные провода малых сечений в пределах радиуса $R \leq 10 \text{ км}$, что соответствует мощности станций и сетей в пределах 250—400 кВт. С ростом мощности и радиусов передачи выше этих пределов расход металла начинает быстро возрастать и уже при радиусе 15 км (мощность 550—900 кВт) приводит к необходимости применения тяжелых сечений (Ж-50, Ж-70). Для определения предельного веса металла, при котором сети еще могут быть выполнены проводами применяемых на практике марок, принят наибольший средний вес стальных проводов на 1 км сети равным 800 кг (что соответствует цифрам, получаемым в некоторых проектах с тяжелыми сетями, применением только стальных проводов). Тогда предельный по сечению вес металла $G \text{ кг/км}$ будет равен:

$$G = 800 L \text{ кг/км},$$

откуда в соответствии с рис. 1 предельный радиус и мощность станций для стальных проводов будут равны:

$$R = 18 \text{ км}, P = 800 - 1300 \text{ кВт}.$$

Добавление 10% алюминия позволяет увеличить предельный радиус до 25 км при мощности станций 1700—2300 кВт.

Напряжение 20 кВ позволяет получить легкие сети из стальных проводов для радиусов в пределах $R \leq 20 \text{ км}$ при мощности станций до 1000—1600 кВт; предельные радиусы и мощности при этом напряжении для стальных проводов будут равны:

$$R = 35 \text{ км}, P = 3000 - 5000 \text{ кВт}.$$

Добавление 10% алюминия позволяет в этих пределах получать легкие сети с затратой металла 40—50 кг/км. Система двух напряжений 35/10 кВ с характерной для нее U-образной кривой расхода металла (вследствие добавления веса проводов линий 35 кВ) в пределах радиуса $R \leq 25 \text{ км}$ расходует больше металла, чем система 20 кВ. Заметные преимущества по расходу металла эта система приобретает лишь при радиусах 30—35 км и выше, когда для системы 20 кВ становится необходимой добавка 5—10% алюминия. Экономия трансформаторной мощности в сети с одним высоким напряжением может быть определена из расчета, что мощность подстанции 35/10 кВ составляет 60—70% от суммарной мощности трансформаторных пунктов (без учета дополнительной мощности, связанной с учетом шкалы мощностей трансформаторов). Дополнительные потери энергии в системе 35/10 кВ могут быть определены, исходя из тех соображений, что потеря напряжения в проводах линий 35 кВ и линий 10 кВ, вместе взятых, принимаются равными потерям напряжения в сети 10 или 20 кВ при одном высоком напряжении и составляют в среднем около 10% (при существующих нормах допускаемых отклонений напряжения от номинального напряжения токоприемников +7,5 и -10%). Как показали проведенные расчеты, дополнительные потери в системе 35/10 кВ составляют при этом около 3—4%.

Экономическое сравнение вариантов может быть сделано лишь приближенно, так как цены на линии электропередачи и подстанции 20 кВ по понятным причинам не могут быть определены с желаемой точностью. Размеры первоначальных затрат в зависимости от радиуса действия сети определены по укрупненным расценкам в соответствии с приведенными формулами, исходя из длины сети и веса проводов при заданных плотности нагрузки и количестве трансформаторных пунктов на единицу площади, в ценах 1936 г. Для напряжения 35 кВ предусматриваются облегченные конструкции линий электропередачи и подстанций для сельских районов с применением одностоечных деревянных опор, штыревых изоляторов и деревянных конструкций открытой части подстанций 35/10 кВ при одной отходящей или подходящей линии передачи 35 кВ. Для напряжения 20 кВ считалось, что стоимости в пределах от 10 до 35 кВ возрастают пропор-

¹ При этом для сети двух напряжений амплитуда встречного регулирования напряжения генераторами больше, чем для системы одного напряжения, т. е. условия сравнения наиболее благоприятны для системы двух напряжений. Если исходить из условия равных потерь энергии, то придется уменьшить допускаемые потери напряжения в варианте 35/10 кВ и тем самым резко ухудшить все его экономические показатели.

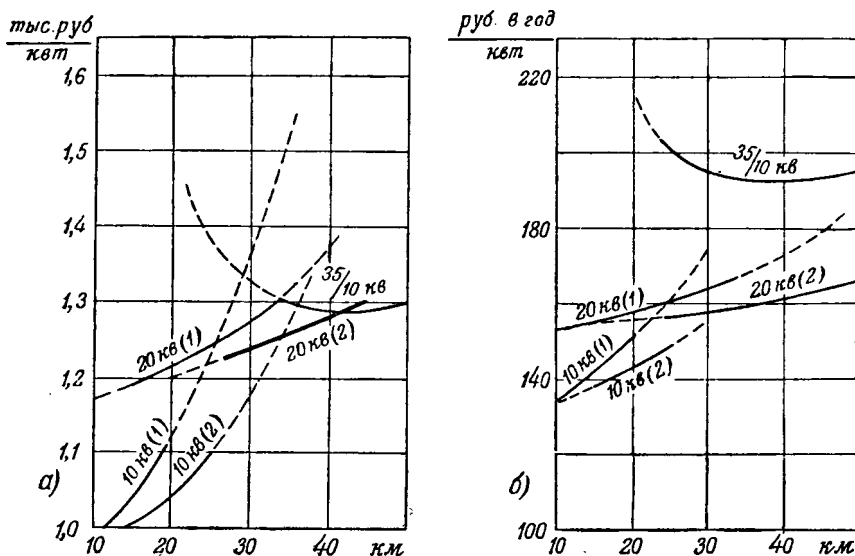


Рис. 2. Капиталовложения и эксплуатационные расходы в сельскохозяйственных сетях при

$$\gamma = 3, \sqrt{\frac{N}{F}} = 0,4.$$

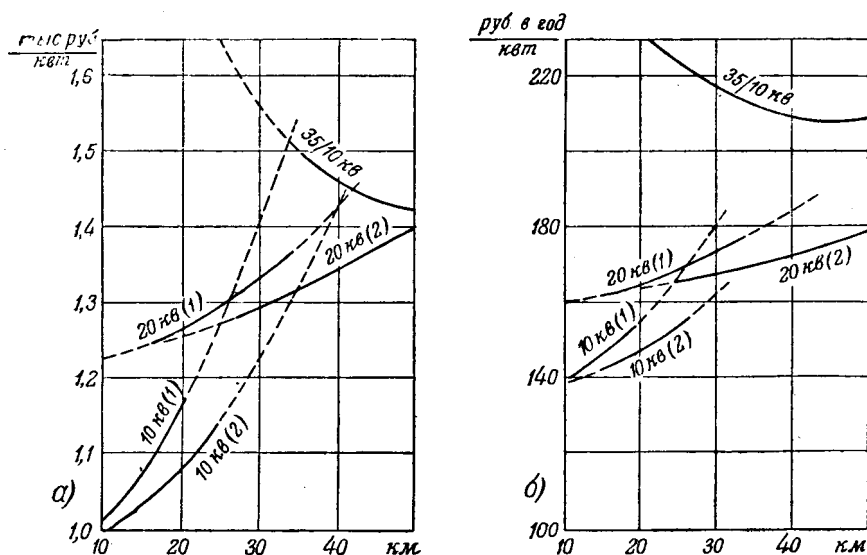


Рис. 3. Капиталовложения и эксплуатационные расходы в сельскохозяйственных сетях при

$$\gamma = 2, \sqrt{\frac{N}{F}} = 0,3.$$

напряжению². На рис. 2,а и 3,а результаты расчетов приведены в виде кривых, выражающих зависимость первоначальных затрат на 1 кВт мощности трансформаторных пунктов в зависимости от радиуса действия. А на рис. 2,б и 3,б даны кривые эксплуатационных расходов, включающие расходы по амортизации и ремонту. Кривые построены для двух вариантов плотности нагрузки. Все стоимости подсчитаны также в двух вариантах: для варианта применения только стальных проводов (кривые 1) и для рассматривавшегося выше варианта с добавлением 10% алюминия (кривые 2). Кривые стои-

мости, изображенные сплошными линиями, ограничены со стороны больших радиусов теми пределами, в которых сети могут быть выполнены проводами существующих марок. Со стороны малых радиусов кривые стоимости (сплошные линии) также ограничены и переходят в пунктирные кривые в тех случаях, когда применение соответствующего напряжения на данном участке явно нецелесообразно. С учетом этих ограничений из рассмотрения рис. 2 и 3 могут быть сделаны следующие выводы:

А) Для сетей с применением стальных проводов: радиусы $R \leq 15$ км, которым соответствует мощность $< 550-900$ кВт, являются областью применения напряжения 10 кВ. В этой области напряжение 10 кВ позволит строить сравнительно легкие сети с весом стальных проводов в пределах 40—75 кг/квт, а стоимость сети 10 кВ получается на 15—20% дешевле сети 20 кВ. Для радиусов $R = 15-20$ км (мощности 550—1 600 кВт) сети

² Принято как среднее. При другом характере зависимости плотности нагрузки от радиуса действия сети (например, при более низких цифрах экономии за счет введения напряжения 20 кВ) конечно, иными; однако принципиальные выводы и порядок весов сохраняют свое значение в широких пределах.

10 кв дешевле сетей 20 кв на 10—15%, но требуют удвоенного и утроенного расхода металла. Поэтому радиусы $R=15-20$ км надо считать переходной областью, в которой напряжение — 10 или 20 кв — должно выбираться в зависимости от местных условий с учетом перспектив роста нагрузки. Для радиусов 20—35 км и мощностей 1 000—5 000 квт напряжение 10 кв уже не может применяться, а переход к системе двух напряжений связан с резким увеличением капитальных затрат, и особенно эксплуатационных расходов. Применение напряжения 20 кв при радиусах 20—30 км дает экономии капитальных затрат в пределах от 5 до 40% и экономии эксплуатационных расходов (без учета дополнительного эксплуатационного персонала при системе двух напряжений) от 10 до 45%. Система 35/10 кв становится экономичной и может получить преобладающее значение для мощностей свыше 5 000 квт, при радиусах >35 км, для которых напряжение 20 кв уже достигает предела своей пропускной способности; однако следует отметить, что и в этом случае система двух напряжений дает вполне приемлемые результаты только при достаточно высокой плотности нагрузки. При плотности нагрузки 2 квт/км², а тем более при еще более низких плотностях нагрузки, система двух напряжений характеризуется повышенными эксплуатационными расходами по сети.

б) Добавление цветных металлов сдвигает кривые рис. 2 и 3 в сторону увеличения радиусов и снижения стоимости, так как медь при расчете по проводимости в два раза, а алюминий в три раза дешевле стальных проводов. Кривые, построенные на рис. 2 и 3 для структуры по весу 90% стали и 10% алюминия, также ограничены, с одной стороны, соответствующими предельными радиусами, а с другой, — теми наименьшими радиусами, для которых стальные провода без применения алюминия дают возможность строить легкие сети с расходом металла до 40 кг/квт. В этих условиях напряжение 10 кв дает возможность строить легкие сети до $R=20$ км, $P=1\,000-1\,600$ квт, а в случае необходимости может быть применено до значения $R=25$ км, $P=1\,500-2\,500$ квт при расходе металла до 100 кг/квт. Сети 10 кв в этих пределах дешевле сетей 20 кв на 10—20%. Напряжение 20 кв в этих условиях также имеет расширенную область применения: оно начинает конкурировать с напряжением 10 кв при $R=20$ км, $P=1\,000-1\,600$ квт и совершенно исключает систему двух напряжений для сельских электростанций в пределах мощностей до 5 000 квт, так как в пределах от 20 до 40 км оно дает экономии 10—15% капитальных затрат и еще более значительную экономию эксплуатационных расходов (без учета дополнительного персонала на подстанциях 35/10 кв); расход металла для 20 кв ниже на 5—10 кг/квт.

Эффективность введения напряжения 20 кв. Для оценки того суммарного эффекта, который дает введение напряжения 20 кв при электроснабжении сельских районов от местных электростанций, были использованы данные, которые получены в результате предварительной разработки материалов по схемам электрификации республик и областей Советского Союза. Согласно этим предварительным данным мощность местных электростанций должна составлять около 70% от суммарной мощности всех источников электроснабжения сельских районов, а суммарная мощность станций и систем свыше 1 000 квт составит не менее 40% суммарной мощности всех местных электростанций. Считая, что при отсутствии напряжения 20 кв половина этой мощности распределялась бы сетями с одним высоким напряжением 10 кв и половина — сетями с двумя высокими напряжениями 35/10 кв, получим следующее:

1. Применение напряжения 20 кв в сельских районах связано с некоторым увеличением капиталовложений в высоковольтные сети. Однако, ежегодная экономия эксплуатационных расходов превышает перерасход первоначальных вложений, который окупается, следовательно, в течение первого года эксплуатации. В абсолютных цифрах экономия от введения напряжения 20 кв в масштабе Союза измеряется многими десятками миллионов рублей в год.

2. Введение напряжения 20 кв для сельского хозяйства требует производства 21 новых исполнений повышающих и понижающих трансформаторов³. Однако, за

счет этого достигается экономия трансформаторной мощности, измеряемая миллионами киловольтампер.

3. Введение напряжения 20 кв позволит получить экономии металла проводов (до 100 тыс. т), экономии электроэнергии (свыше 100 млн. квтч), сокращение квалифицированного рабочего персонала (несколько тысяч человек).

Помимо указанных важных преимуществ напряжение 20 кв позволит широко применить смешанную систему распределения электроэнергии, о чем уже указывалось раньше.

Касаясь вопроса о применении напряжения 35 кв как распределительного с непосредственной трансформацией на напряжение 400 в (35/0,4 кв) следует отметить: а) в настоящее время не выпускаются промышленностью трехфазные трансформаторы малых мощностей: 30, 20 и 10 кв на напряжение 35/0,4 кв, которые необходимы для сельской электрификации; б) смешанная система распределения электроэнергии при напряжении 35/0,4 кв практически не может получить применения, так как необходимые для этого однофазные трансформаторы мощностью 3, 5 и 10 кв не могут быть выполнены при этом напряжении достаточно малых табаритов и веса для непосредственной подвески на опорах линий, а стоимость их и мачтовых подстанций в целом будет столь велика, что не может быть достигнут эффект от применения смешанной системы.

Вследствие этого распределение энергии при напряжении 35 кв с непосредственной трансформацией 35/0,4 кв не является приемлемым для сельской электрификации и нами не рассматривалось. Предложение Министерства электростанций СССР о введении напряжения 20 кв следует считать вполне правильным.

Инж. К. Е. Булгаков

Завод «Электроаппарат»

В отзыве завода «Электроаппарат» на первую редакцию проекта было указано на желательность сохранения для аппаратов на номинальные напряжения 110 кв и выше диапазона между наибольшим рабочим напряжением и номинальным, равным 10, а не 15%. Это особенно важно потому, что в Советском Союзе установлено большое количество аппаратов на 110 кв и выше, которые не только по изоляции, но и по другим параметрам (мощность отключения выключателей, связанная с их способностью гашения дуги при некотором наибольшем напряжении), рассчитаны на наибольшие рабочие напряжения до 121 кв при 110 кв и соответственно до 242 кв при 220 кв. Необходимость повышения диапазона между наибольшим рабочим и номинальным напряжениями была, повидимому, не вполне очевидна и авторам первой редакции, так как для напряжений 150 и 400 кв в первой редакции этот диапазон был установлен в 10%. Во второй редакции это замечание завода не учтено и наибольшее рабочее напряжение повышено до 115% от номинального не только для 110 и 220 кв, но и для 150 кв. Подобное повышение наибольшего рабочего напряжения может повести к снижению надежности работы большого количества установленных высоковольтных аппаратов и поэтому его во всяком случае нельзя вводить без дополнительных оговорок о требованиях к существующему оборудованию и сроках введения этого повышения для вновь проектируемых аппаратов.

Завод «Электроаппарат» не возражает против добавления в стандарт напряжения 20 и 60 кв, хотя это и связано с проектированием и освоением новых типов электрооборудования. Отсутствие промежуточного номинального напряжения между 35 и 110 кв ведет к неразрешимым затруднениям при проектировании в тех случаях, когда напряжение 35 кв по тем или иным причинам является недостаточным. Однако, из проекта стандарта недостаточно четко следует, что между напряжениями 10 и

³ Все эти исполнения изготавливались в СССР в недавнее время, а существующая конструкция мелких понижающих трансформаторов с напряжением 10 кв на высшей стороне является модификацией трансформаторов на напряжение 20 кв соответствующих мощностей.

Она не должно быть промежуточной точки номинального напряжения, так как примечание 1 к табл. 3 разрешает применение генераторных напряжений 13,8 и 12,75, что в случае потребности в аппаратуре заставит завод проектировать какие-то нестандартные аппараты. Необходимо внести в примечание 1 к табл. 3 добавление: «с учетом применения требуемой аппаратуры, силовых кабелей и другого электрооборудования на номинальное напряжение 20 кВ».

Ввиду большого роста стоимости и трудностей изготовления аппаратуры в зависимости от напряжения при высоких напряжениях следовало бы, по мнению автора, более внимательно рассмотреть вопрос о целесообразности точки номинального напряжения между 400 и 20 кВ, учитывая, что интервал и отношение между этими напряжениями весьма значительно превосходит интервал и отношение между предшествующими точками шкалы.

В проекте недостаточно четко определяется основная, непосредственно нормируемая данным ГОСТ, характеристика аппаратуры и другого электрооборудования, — наибольшее рабочее напряжение электрооборудования, — данной редакции эта характеристика, по видимому, отождествляется с наивысшим напряжением сети (§ 6 проекта), определение которого дано, исходя из характеристик не самой сети (например, ее изоляции), а электрооборудования установки.

В связи с этим следует указать на недочеты редакции проекта ГОСТ. Как в первой, так и во второй редакции термину «сеть» придается значительно более общее значение, чем это обычно принято, что уменьшает четкость текста проекта. В то же время не используется общий термин, как «электрическая установка», включающий все элементы электрической цепи — генераторы, трансформаторы, аппаратуру, приемники и сети воздушные или кабельные). В результате, в проекте получается ряд редакционных и логических неточностей. Так, например, выражение «стационарная сеть» — мало удачно, так как не принято говорить о подвижных сетях. Это подтверждается и самим текстом проекта (§ 2, а и в), где говорится об «электрических сетях подвижных или стационарных установок». Наименование проекта не охватывает нормируемых объектов, так как включение трансформаторов и аппаратов в понятие «сеть» совсем не является общепринятым и мало целесообразно. Правильнее изменить наименование проекта на следующее: «Номинальные напряжения стационарных электрических установок, их сетей и электрооборудования» и ввести соответ-

ствующие редакционные изменения в текст проекта, заменив термин «сеть» словом «установка» там, где он применяется в этом значении (тем более, что термин «установка» уже применен, например, в примечании 5 к табл. 3).

Желательно указать наибольшие рабочие напряжения аппаратуры и другого электрооборудования и для номинальных напряжений до 1000 в (табл. 2), в частности, для номинального напряжения 1000 в, например, 1150 в.

Инж. А. И. Гершенгорн

ЦНИЭЛ Министерства электростанций СССР

Основным назначением стандарта должна являться координация номинальных напряжений всего оборудования, работающего в сети и непосредственно к ней приключенного. Определение номинального напряжения сети должно показывать, что номинальное напряжение есть некоторая постоянная величина, характеризующая эту сеть и определяющая и координирующая номинальные напряжения оборудования, работающего в этой сети и непосредственно к ней присоединенного. В проекте стандарта, принята следующая формулировка: «Номинальным напряжением стационарной электрической сети называется установленное для нее условное напряжение, которое определяет соответствующие ему номинальные напряжения трансформаторов, силовых кабелей и аппаратуры, работающих в этой сети, и присоединенных непосредственно к ней генераторов и приемников электрической энергии». Эта формулировка удовлетворяет вышеуказанным требованиям. Стандарт должен содержать также определение номинальных напряжений для оборудования. Определение, приведенное в ГОСТ 721-41, «Номинальным напряжением приемников электрической энергии, генераторов и трансформаторов называется напряжение, при котором они предназначены для нормальной работы», является принципиально правильным, но понятие «нормальная работа» нуждается в уточнении, так как возможны колебания напряжения в сети, например, 210, 220 и 230 в. Поэтому лучше дать такую формулировку — «Номинальным напряжением генераторов, трансформаторов и приемников электрической энергии называется напряжение, для работы при котором они предназначены в оптимальном режиме».



КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Для обсуждения предложений и замечаний, выявленных на читательских конференциях в Москве, Киеве, Ленинграде и Свердловске в отношении статей, опубликованных в журнале „Электричество“,

В ЧЕТВЕРГ, 18 МАЯ 1950 г.

будет проведена в Москве, в помещении МОНИТОЭ, однодневная конференция авторов журнала „Электричество“.

Редакция журнала и Правление МОНИТОЭ приглашают всех авторов журнала „Электричество“ принять активное участие в работе конференции, открытие которой состоится в 7 час. вечера (проезд Владимирова, д. 6, подъезд 1, этаж 4-й).

Научно-техническая сессия по ремонту электрооборудования

В декабре 1949 г. в Москве состоялась научно-техническая сессия по ремонту электрооборудования. Сессия была организована МОНИТОЭ совместно с министерствами электростанций и электропромышленности. В работе сессии приняло участие свыше 200 специалистов, в том числе более 100 делегатов, командированных из других городов, а также работники районных электростанций Мосэнерго, электромашиностроительных заводов, проектных институтов и др.

Сессия заслушала 16 докладов и сообщений.

Инж. М. Я. Шейко (Главэлектромашпром МЭП) выступил с докладом «Внедрение новой техники в электромашиностроение». Инж. Н. В. Борин (завод им. Владимира Ильича) представил доклад «Новые типы электрических машин, изготавливаемые заводом им. Владимира Ильича». Инж. А. А. Рабинович (завод «Динамо» им. Кирова) выступил с докладом «Новые типы электрических машин, выпускаемых заводом «Динамо» им. Кирова». Инж. С. М. Лившиц (Центроэлектромонтаж МСПТИ) в докладе «Стандартизация электрических машин и трансформаторов» отметил, что стандартизация монтажных размеров корпусов электродвигателей и трансформаторов является одним из основных требований эксплуатации. Стандартизация номинальных мощностей электродвигателей является основой для стандартизации монтажных размеров. В новых стандартах на электрические машины и трансформаторы необходимо добиться единых технических и экономических принципов построения машин и трансформаторов и возможно полного единства редакции стандартов. По мнению докладчика, предложения МТЗ в части установления в качестве номинальных условий среднегодовой температуры среды $+10^{\circ}\text{C}$ неприемлемы и потребует перемаркировок фабричных данных нормальных трансформаторов в эксплуатации.

В докладе «Анализ аварий электрических машин и трансформаторов» инж. А. А. Тайц (Энергометаллургпром) отметил, что основными причинами аварий электродвигателей и трансформаторов являются дефекты монтажа, ремонта и несвоевременное выполнение планово-предупредительных ремонтов. Наибольший процент повреждений электрических машин составляют повреждения обмотки статора (30—40%), повреждения ротора (18—25%) и повреждение возбуждателей (30—35%); остальные повреждения падают на подшипники, цепи возбуждения и пр. Из аварий с трансформаторами наибольшее количество падает на электропечные трансформаторы и дроссели. Количество аварий с трансформаторами нормальных серий незначительно и не превышает 0,5—1%. Наибольший процент повреждений составляют обмотки трансформаторов (50—60%), переключатели (10%), отводы (10%), вводы (10—15%). Необходимо шире внедрять новые методы профилактических испытаний изоляции: емкостные методы и методы частичных разрядов, пригодные для обнаружения местных дефектов изоляции. Повышение надежности работы электрических машин в различных условиях эксплуатации может быть осуществлено при применении новых, более совершенных, электроизолирующих материалов (стекловолокнистые, винилфлексовые, нагревостойкие синтетические пленки, электроизолирующие лаки на основе кремнийорганических соединений).

Доклад «Ремонт турбогенераторов» сделал инж. Л. А. Миренбург (Союзэнергоремонт). Он отметил, что на ряде электростанций была произведена реконструкция дефектных узлов турбогенераторов: изменена кон-

струкция изоляции лобовых частей обмотки статора турбогенераторов фирмы Сименс-Шуккерт, Броун-Бовери и др.; изменена конструкция витковой и корпусной изоляции обмотки ротора старых машин завода «Электросила» и разнотипных фирм; выполнена реконструкция ротора АЕГ с заменой проволочных бандажей массивными капками. Сокращение сроков ремонтов возможно за счет применения новых технологических приемов: укладки обмотки без кантов статора, применение более совершенных приспособлений инструмента и малой механизации, совмещения отдельных процессов, тщательной подготовки рабочих мест, инструмента и приспособлений, новых методов сушки и нагрева.

В докладе «Опыт организации скоростных ремонтов генераторов» инж. В. И. Ручкин (Мосэнергоремонт) осветил опыт проведения скоростного ремонта крупного турбогенератора на электростанции МЭС. В основу организации ремонта был положен поточный пооперационный метод работы, суточные графики и организация ремонтных площадок. Были отмечены преимущества скоростных ремонтов перед обычными. В 1950 г. Мосэнергоремонт наметил более широкое использование метода скоростных ремонтов на электростанциях МЭС.

Доклад «Ремонты крупных электромашин переменного тока и принципы расчетов при ремонтах» сделал инж. А. И. Аскинази (Бюро ремонта крупных машин МЭП). В докладе были рассмотрены вопросы: дефектировки машин, предназначенных к ремонту; наиболее часто встречающиеся ошибки при дефектировке; подготовки ремонта крупной электрической машины и технологии ремонта. Отмечены возможности сокращения срока простоя оборудования в ремонте путем организации подбора основных обмоточных данных и чертежей обмоток, хранения всех ремонтных приспособлений, которые были изготовлены при ранее выполненных ремонтах, заблаговременной подготовки всей ремонтной документации по наиболее крупным, ответственным машинам предприятия. Изготовление новых обмоток к машинам, предназначенным к ремонту, до остановки машины на ремонт. По вопросу поверочных расчетов асинхронных двигателей при ремонте были указаны рекомендуемые формулы, пределы изменений электромагнитных нагрузок в двигателях союзных серий, допускаемые отклонения в них и возможные изменения заводских обмоточных данных двигателей. Было указано, что при пересчете двигателя с одного напряжения на другое необходимо сохранение неизменными электромагнитных нагрузок. В докладе были приведены основные положения при замене фазовой обмотки беличьей клеткой и при замене обмотки из высоких узких стержней (по принципу па-кого паза).

В докладе «Ремонт крупных электрических машин постоянного тока» инж. В. П. Рогов (Бюро ремонта крупных машин МЭП) обобщил опыт ремонта и восстановления генераторов и электродвигателей постоянного тока мощностью от 1 250 до 5 000 в в одной единице напряжением до 500 в с числом оборотов до 750 в минуту. Приведены примеры устранения механических деформаций отдельных частей машин, а также изготовления новых узлов машин (трудоемких и сложных в производстве), подробно рассмотрены технологии изготовления двойных коллекторов арочного типа диаметром 700—1 050 мм длиной до 850 мм с окружной скоростью до 28 м/сек. Рекомендованы методы нагрева коллекторов при съеме с вала и при посадке на вал и рассмотрены конструкции необходимых приспособлений для изготовления коллекторов. Освещен вопрос наладки коммутаци-

машин после ремонта. Машины с так называемой замедленной коммутацией, удовлетворительно работающие при нагрузках, совершенно неудовлетворительно (с точки зрения искрения) работают при повышенных и резкопеременных нагрузках. Рекомендованы пути улучшения коммутации таких машин.

Доклад «Ремонт нормальных электродвигателей» сделал инж. Н. М. Слоним (Энергоремтрест (ЭРТ), который рассмотрел основные принципы организации ремонтных предприятий и цехов, вопросы дефектации и поверочного расчета машин, разделения операций и учета трудоемкости и расхода материалов. В докладе были рассмотрены перспективы применения для ремонта нормальных электродвигателей новых типов изоляционных материалов на основе триацетатной пленки и новых видов полированных проводов.

В докладе «Опыт ремонта силовых трансформаторов» инж. А. И. Синица (МТЗ им. Куйбышева) отметил, что испытание током короткого замыкания вынуждено из бака керне производится для обнаружения плохого контакта, а испытание холостого хода вольмом напряжения с нуля дает возможность обнаружить неполное витковое замыкание и дефекты в магнитопроводе. Докладчик отметил характерные случаи повреждений частей трансформатора и наметил в качестве нерешенных задач — разработку методики объективного определения степени износа витковой изоляции обмоток и изоляционных деталей и доработку микроскопического метода определения старения изоляции.

В докладе «Повышение качества изоляции при ремонте электрических машин» канд. техн. наук В. И. Калитвянский (ВЭИ) отметил основные причины преждевременного выхода из строя изоляции электрической машины: несоответствие изоляции условиям эксплуатации, низкое качество примененных для изоляции электрической машины материалов, неудачная конструкция изоляции, неправильная эксплуатация машины. Докладчик указал, что при ремонтах электрических машин в первую очередь должны применяться для низковольтных машин с изоляцией класса А, работающих в нормальных условиях эксплуатации: провод марки ПЭЛБО или ПБД, черная хлопчатая для вспяных обмоток в сочетании с высококачественным электрокартоном (ЭВП или ЭВТ). Изоляция обмоток должна подвергаться двукратной пропитке в битумно-масляном лаке типа 458 или 447. Лобовые части обмоток должны покрываться пигментированной электроизоляционной эмалью воздушной сушки (СВД или КВД). Для машин, работающих в помещениях с повышенной влажностью, следует применять: провод марки ПЭЛБО или ПБД, слюдяные или стеклослюдяные материалы на битумно-масляных лаках (типа 441 или 462-к); для вспяных обмоток — в сочетании с электрокартоном (ЭВП или ЭВТ). Изоляция обмоток должна подвергаться трехкратной, а для особо влажных помещений пятикратной пропитке в битумно-масляном лаке типа 447. Статорные шаблонные обмотки следует изолировать микалентой и компаундировать. Лобовые части обмоток следует покрывать также пигментированной электроизоляционной эмалью (СВД, СПД или КВД). Для высоковольтных машин напряжением 3000 в и выше необходимо применять непрерывную микалентную компаундированную изоляцию. Для низковольтных машин с изоляцией класса В — провод марки ПДА или ПСД, слюдяные или стеклослюдяные материалы на нагревостойких лаках (глифталевых, меламиноалкидных); двукратная или трехкратная пропитка обмотки в битумно-масляных (типа 447) лаках. Лакировка лобовых частей обмотки — пигментированной электроизоляционной эмалью (СВД, СПД или КВД). Для низковольтных машин, работающих в особо тяжелых условиях работы (крановые, металлургические, врубовые и тому подобные электродвигатели), — провод марки ПДА (на глифталевом лаке) или ПСД микалента или стекломикалента для витковой изоляции. Стеклослюдяная изоляция на нагревостойких лаках (глифталевых, меламиноалкидных и т. п.); трехкратная пропитка обмоток в глифталевых или меламиноалкидных лаках; лакировка лобовых частей пигментированной эмалью печной сушки (СПД). Применение

обмоточных проводов с винилфлексовой эмалевой изоляцией вместо проводов марки ПЭЛБО и ПБД позволяет повысить коэффициент заполнения паза, а значит мощность машины. Триацетатцеллюлозные синтетические электроизоляционные пленки в сочетании с электрокартоном, бумагой или тканью могут быть с большим успехом использованы для изоляции низковольтных машин. Эти пленки изготавливаются в системе Министерства кинематографии. Кремнийорганические материалы, разработанные в СССР К. А. Андриановым, обладают высокой нагревостойкостью, и их применение позволяет значительно повысить рабочие температуры обмоток и надежность изоляции. Кремнийорганические смолы и лаки изготавливаются в системе химической промышленности СССР.

Канд. техн. наук И. А. Сыромятников (Министерство электростанций) представил доклад «Сушка и профилактические испытания генераторов и трансформаторов». Из профилактических испытаний основными являются испытания повышенным напряжением переменного тока обмотки статора от корпуса и двух других фаз. Ряд проведенных испытаний свидетельствует о безопасности испытаний повышенным напряжением в течение 1 мин, причем верхним пределом испытательного напряжения следует считать 1,5 от линейного номинального напряжения. Степень увлажненности удобно определять при помощи отношения сопротивлений изоляции, измеренных при двух значениях времени, например, при 60 и 15 сек при измерении меггером или при 10 и 1 мин при измерении тока утечки при приложении выпрямленного напряжения. Для сухой изоляции это отношение доходит до 3—4, для сырой — около единицы. Для трансформаторов определение степени увлажненности изоляции заключается в измерении емкости обмоток в холодном состоянии при двух значениях частоты 2 и 50 гц прибором ЦНИЭЛ МЭС. Для сухой изоляции отношение емкости, измеренной при частоте 2 гц, и емкости при 50 гц не превышает 1,2—1,3. Возможно применение метода контрольного нагрева трансформатора до 70°С и сравнение характеристик и изоляции с данными, полученными на заводе-изготовителе, после сушки при этой температуре. Московский трансформаторный завод рекомендует измерять емкость при различных температурах: для сухой изоляции отношение емкости при 70°С и емкости при 20°С не превышает 1,2—1,3.

Сообщение об «Опыте ремонта электрооборудования на автомобильном заводе им. Сталина» сделал инж. А. Н. Невский (ЗИС), который отметил, что в основных цехах завода организованы самостоятельные ремонтные базы со станочным оборудованием и сушильно-пропиточными установками. При работе электрических машин в условиях сырости и при наличии на заводе чугунной пыли производится обмазка лобовых частей обмоток. Для улучшения эксплуатации электрооборудования и снижения аварийности эмulsionные электродвигатели были переведены с 380 на 110 в с питанием от основного электродвигателя, имеющего специальный вывод на 110 в, была внедрена индивидуальная защита эмульсионных электродвигателей, что резко снизило их выход из строя.

Сообщение об «Организации ремонта электрооборудования на заводе «Серп и молот» сделал инж. Г. Ф. Никулин (завод «Серп и молот»).

В докладе «Опыт ремонта электродвигателей на автозаводе им. Молотова» инж. А. О. Шмидт осветил вопросы организации капитального ремонта электродвигателей, щитов, пультов, пусковой аппаратуры. Докладчик указал, что при испытаниях отремонтированных двигателей, кроме опытов холостого хода и короткого замыкания, производится также испытание изоляции витков повышенным на 30% напряжением и определение времени самоторможения. Стенды для нагрузочных испытаний оборудованы нагрузочными балансирными машинами, причем соединение вала балансирной машины с валом испытуемого двигателя достигается с помощью гибкой муфты.

По результатам обсуждения докладов сессией была принята резолюция.

Инж. А. А. ТАЙЦ



Инженер-изобретатель Л. Г. Рашковский

К 40-летию производственно-технической деятельности

Недавно исполнилось 40 лет производственно-технической и изобретательской деятельности Лавра Григорьевича Рашковского. Родился Л. Г. Рашковский в 1884 г. в Кишиневе. После окончания Высшего технического училища он начал в 1909 г. свою производственную деятельность конструктором завода «Динамо». Проработав на заводе более 10 лет, Л. Г. Рашковский затем был начальником электрической части тяги Донецких железных дорог в Харькове, а с 1923 г. он является старшим инженером Проектного управления ВЭО (затем «Электропром»), ныне «Центроэлектромонтаж». В настоящее время Лавр Григорьевич работает в лаборатории ЦНИЛЭПС треста «Центроэлектромонтаж» Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии.

Начиная с первых шагов своей инженерной деятельности, Л. Г. Рашковский проявил себя, как изобретатель, с необычайной энергией проводящий в жизнь реализацию своих изобретений. Он является автором первого в мире *электромашинного усилителя*, примененного им для питания освещения поездов. Эта машина с поперечным полем и дифференциальным возбуждением известна, как машина Рашковского и описана во многих советских и иностранных монографиях по электрическим машинам. Им же построен первый *быстродействующий автомат постоянного тока*, установленный 25 лет назад на трамвайной тяговой подстанции в Баку. Конструкция этого



автомата послужила основанием для разработки заводом «Электроснаб» первой серии советских быстродействующих автоматов.

Под руководством Л. Г. Рашковского разработана и построена первая в СССР *система автотелеуправления* электроснабжением московского метрополитена. Все элементы этой системы изготовлены на заводах Советского Союза. Многолетняя безупречная эксплуатация системы автотелеуправления на московском метро является лучшим подтверждением плодотворности творческой деятельности инж. Рашковского. Более 10 других его изобретений также реализовано на предприятиях Советского Союза.

Перу Л. Г. Рашковского принадлежит ряд статей, опубликованных в журналах «Электричество», «Вестник электропромышленности» и др. В своих статьях Лавр Григорьевич, как правило, ставит новые актуальные вопросы и указывает оригинальные пути их разрешения.

Отмечая 40 лет инженерной деятельности Л. Г. Рашковского, электротехническая общественность выражает уверенность в дальнейшей столь же плодотворной работе юбиляра в области развития передовой советской электротехники.

Д. П. ЧУПРОВ, Б. А. ГОЛЬДБЛАТ,
С. М. МЕССЕРМАН, А. В. НЕТУШИЛ, К. В. УРНОВ



Заметки и письма

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ 400 кВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В журнале «Электричество» (№ 11, 1948) помещена статья А. Б. Крикунчика «Некоторые вопросы электропередачи трехфазного тока на напряжение 400 кВ». В этой статье (стр. 16) сказано: «Следует считать совершенно правильными выводы, которые сделаны А. А. Вульфом относительно мощности, которая может быть передана по длинным линиям передач (А. А. Вульф. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям, Госэнергоиздат, 1940). Утверждение, имеющееся в этой работе, о том, что все соображения как экономические, так и технические говорят за то, что нагрузка очень дальних линий, порядка 500 км и выше, будет значительно меньше натуральной, нельзя ни в коем случае признать правильным».

К сожалению, А. Б. Крикунчик не подкрепляет своей критики никакими фактическими данными. Кроме того, самые соображения А. А. Вульфа переданы не совсем точно. На стр. 16 книги А. А. Вульфа сказано: «Таким образом, все соображения как экономические, так и технические говорят за то, что дальние линии будут иметь меньшую удельную нагрузку, чем короткие. Поскольку для последних, как указывалось выше, оптимальные нагрузки близки по величине к натуральной, то можно высказать общее соображение о том, что нагрузка очень длинных линий, порядка 500 км и выше, будет значительно меньше нату-

ральной». Несколько выше сказано: «Увеличение дальности для сохранения одинаковой степени коэффициента перегружаемости должно быть компенсировано уменьшением удельной нагрузки линий». Последняя формулировка является совершенно четкой и бесспорной, так как она соответствует физической сущности явления.

Об этом же свидетельствует помещенная в том же номере журнала статья П. С. Жданова, В. А. Веникова и Г. М. Розанова, в которой указано, что расчеты устойчивости при передаче натуральной мощности свидетельствуют о том, что при нормальных параметрах машина возникает существенные затруднения для расстояний передачи порядка 400 км и выше. Далее, авторы указывают, что для линий длиной свыше 600 км «придется либо уменьшить удельную нагрузку цепей линии передачи, либо применить серьезную компенсацию с помощью статических конденсаторов».

Из расчетов, произведенных еще перед войной для электропередачи 800 мвт, 900 км следовало, что удельная нагрузка блочной линии такой длины, без применения серьезной компенсации, составляла приблизительно 0,65 натуральной.

В моей работе [Л. 1, стр. 25] приведена кривая дальности передачи, составленная по данным наиболее длинных и мощных электропередач, фактически находящихся в

работе (18 электропередач), и на основании ее дана ниже следующая таблица дальности передачи:

Дальность передачи, км . . .	100	200	300	400	500
P_n , в долях натуральной мощности	2,0	1,5	1,25	1,0	0,8

Из всего вышесказанного с полной очевидностью вытекает, что А. Б. Крикунчик недооценивает трудности, возникающие при передаче натуральной мощности по линиям длиннее 400 км, и возможность передачи натуральной мощности на расстояние, близкое к 1000 км, пока еще нельзя считать доказанной как с технической, так и с экономической точки зрения.

Имеющееся в той же статье А. Б. Крикунчика утверждение, что при передаче большой мощности ($600 \div 1000$ мвт) на сравнительно небольшие расстояния ($200 \div 300$ км) нет необходимости переходить на напряжение 400 кв, представляется весьма спорным. В статье указано, что передача при напряжении 400 кв требует более высоких капитальных затрат, чем при 220 км. Для проверки этого, пользуясь данными и единичными стоимостями, приведенными в статье А. Б. Крикунчика, был произведен элементарный подсчет затрат по передаче 900 мвт и 300 км. Для напряжения 400 кв требуется 2 цепи с обычными полыми проводами диаметром 45—50 мм, а для 220 кв, допуская 150 мвт на цепь, — 6 блочных цепей. Сравнение произведено для блочной схемы по соотношениям большой простоты и наглядности сравнения, дающего существо блочная передача здесь наиболее целесообразна.

В результате подсчетов получены следующие стоимости:

Вариант 400 кв — 256,2 млн. руб. (286 руб. на 1 квт)

Вариант 220 кв — 293,4 млн. руб. (326 руб. за 1 квт).

Разница в пользу варианта 400 кв — кругло 37 млн. руб. (13%), что при отчислениях в 10% дает ежегодную экономию 3,7 млн. руб.

Годовые потери энергии при числе часов потерь, равном 3000:

$$\Delta P_{220} = 189 \text{ млн. квтч,}$$

$$\Delta P_{400} = 115 \text{ млн. квтч.}$$



БОЛЬШЕ ВНИМАНИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩИХСЯ РУССКИХ ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ

1. Академия наук СССР установила ряд премий, посвященных выдающимся русским ученым. Однако, в этом почетном ряду недостаточно отражены русские электротехники, сыгравшие в развитии этой отрасли техники большую и плодотворную роль. Особенно следует отметить в этом смысле значение работ нашего выдающегося соотечественника — Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, давшего мировой электротехнике систему трехфазного тока, без которой трудно себе представить современную промышленную жизнь.

Этот пробел следовало бы восполнить. Академии наук СССР необходимо учредить две премии имени М. О. Доливо-Добровольского. Одну — за выдающиеся работы в части передачи энергии, а другую — за разработку и осуществление новых конструкций электрических машин, паров и измерительных приборов. Это соответствовало бы тем двум основным направлениям, которые можно было различить в научной и инженерной деятельности О. Доливо-Добровольского.



С учетом потерь на корону, для варианта 400 кв, равных 10 млн. квтч, разница в потерях в пользу варианта 400 кв составит 64 млн. квтч (34%), что при цене энергии в 1 коп./квтч дает ежегодную экономию 6,4 млн. руб. Общая годовая экономия составит $3,7 + 6,4 \approx 10$ млн. руб.

Из этих данных следует, что применение напряжения 400 кв для передачи больших мощностей на расстояния порядка 300 км экономически вполне оправдывается.

В заключение коснемся рассмотренного в конце статьи вопроса о передаче 1 млн. квт на 900 км при 400 кв.

Принята двухцепная линия с расщепленными проводами ($4 \times \text{АСУ} - 300$) с промежуточными подстанциями и отбором на них мощности. Пропускная способность такой линии определена в $635 \times 2 = 1270$ мвт, следовательно,

$$\text{ее удельная нагрузка равна } \frac{1000}{1270} = 0,79 \text{ натуральной}$$

мощности, несмотря на наличие промежуточного отбора мощности. Если же учесть отбор, то удельная нагрузка будет, вероятно, не выше 0,6—0,7 натуральной мощности.

Вызывает сомнение чрезвычайно большая мощность синхронных компенсаторов, равная 1,5 млн. квт, что составляет 150% от передаваемой мощности вместо обычных 75%.

Поражает также огромное число (34) ячеек распределительных устройств 400 кв, что в связи с весьма большой требуемой разрывной мощностью и быстродействием выключателей возлагает на электропромышленность чрезвычайно тяжелые обязанности и ставит под очень большое сомнение самую реальность такой электропередачи.

При подсчете экономичности передачи принято очень высокое число часов использования — 8000 (передача 8 млрд. квтч), на что едва ли можно рассчитывать. В силу изложенного принятая связанная схема передачи электрической энергии является технически недостаточно обоснованной и трудно осуществимой.

Литература

1. Н. Н. Крачковский. К вопросу о построении рациональных электрических систем. Энергетический сборник ЛОНИТОЭ, выпуск VII—VIII, 1948.

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ

2. С сожалением приходится отметить пренебрежение, проявляемое некоторыми издательствами к выпуску доброкачественных портретов русских ученых, в частности электротехников. Наши электротехнические учебные заведения часто испытывают затруднения при попытке украсить стены своих помещений портретами отечественных ученых физиков и электротехников.

Старейшему руководящему электротехническому журналу «Электричество», на страницах которого в свое время печатались труды почти всех выдающихся русских электротехников, следовало бы давать художественно исполненные вклейки — портреты русских электротехников, размером в полную страницу, по одному в каждом номере.

Кандидат техн. наук, доц. Н. Ф. РАКУШЕВ

Куйбышевский индустриальный институт
им. Куйбышева

Л. Р. НЕЙМАН И П. Л. КАЛАНТАРОВ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Часть I. Физические основы электротехники. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. 335 стр., ц. 14 руб. 60 коп. Госэнергониздат, 1948.

Курс Теоретических основ электротехники Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова делится на три части: I — Физические основы электротехники, II — Теория переменных токов и III — Теория электромагнитного поля.

В первой части курса излагаются следующие вопросы: электрическое поле, электрический ток, цепи постоянного тока, электрические свойства вещества, магнитное поле, магнитные цепи, магнитные свойства вещества и системы единиц измерения.

Несомненным достоинством книги является простота и ясность изложения. Особенно удачно изложены вопросы, посвященные выражениям для сил, возникающих в электрическом и магнитном поле, определяющих эти силы в виде производной от энергии поля по координате. Не менее удачны некоторые примеры, иллюстрирующие использование выражений для этих сил при решении практических задач электротехники. Хорошо разобраны вопросы, посвященные определению емкостей и индуктивностей в различных частных случаях и расчету цепей постоянного тока. Достаточно полно и наглядно изложен вопрос о тождественности различных формулировок закона электромагнитной индукции.

К числу положительных качеств книги следует отнести также хорошее оформление чертежей и незначительное количество опечаток.

Однако, наряду с отмеченными существенными положительными качествами в книге имеется ряд недостатков. Ничего не сказано о пионерах передачи электрической энергии на расстояние Д. А. Лачинове, М. Депре, Ф. А. Пирецком, М. О. Доливо-Добровольском. Совсем не уделено внимание вопросу развития электротехники в нашем социалистическом хозяйстве. Ничего не сказано о Ленинско-Сталинском плане электрификации и индустриализации нашей страны.

Несмотря на большой объем книги, некоторые важные вопросы курса теоретических основ электротехники в ней не освещены или освещены недостаточно полно. Наряду с этим дается много сведений, уже хорошо известных студентам из курса физики.

Так, не рассматриваются цепи постоянного тока с нелинейными параметрами. Не излагается метод узловых потенциалов в расчете электрических цепей. Недостаточно освещен расчет неразветвленных и разветвленных магнитных цепей со сталью.

Содержание главы XXI книги почти совпадает со статьей П. Л. Калантарова «О системах единиц измерения электрических и магнитных величин», опубликованной в журнале «Электричество» (№ 1, 1948). Эта статья имеет спорные положения, которые уже вызвали оживленную дискуссию на страницах журнала. Поэтому в настоящей рецензии содержание этой главы не рассматривается.

Любой теоретический курс должен строго последовательно развивать основные положения, отвечающие современному уровню знаний. В нем должны быть приведены четкие определения и разъяснения сущности всех новых вводимых понятий и величин. Этим требованиям, как видно из дальнейшего, рецензируемая книга удовлетворяет не полностью.

Изложение курса начинается с определения электрического поля (стр. 18): «Электрическим полем мы называем пространство, в котором совершается особый физический процесс, проявляющийся, в частности, в возникновении механической силы, приложенной к пробному электрическому заряду, вносимому в это пространство». Сходная формулировка дается во введении (стр. 13), а также на стр. 144, где вместо «особого физического процесса» говорится об «особом физическом состоянии». Магнитное поле определяется, аналогично электрическому, как простран-

ство, в котором совершается особый физический процесс (стр. 13). Непонятно, почему электрическим или магнитным полем называется пространство, в котором совершается особый физический процесс или наблюдается особое физическое состояние, а не сам процесс или состояние, которые, казалось бы, и должны представлять интерес.

Нам представляется нежелательным с точки зрения последовательного развития теории, а также с методической точки зрения проводимое в книге с самого начала рассмотрение электрического поля при наличии идеального изолирующего вещества. Роль вещества вначале остается невыясненной. Его присутствие учитывается для электрической проницаемости, которая вводится формально без теоретического обоснования.

Нигде не отмечается, что величиной, полностью характеризующей интенсивность, собственно, электрического поля, является его напряженность. Наоборот, в главе III развываются как раз противоположные представления. На стр. 51 мы читаем: «...Таким образом, поскольку электрическое поле существует в пустоте, возникает необходимость охарактеризовать физический процесс, совершающийся в пустоте при установлении электрического поля». При этом не приводится никаких оснований, почему для этой цели непригодна уже ранее введенная величина — напряженность электрического поля. Далее читаем: «Максвелл, развивая идеи Фарадея о физической реальности электрического поля, ввел понятие об электрическом смещении в диэлектрике, распространив это понятие на пустую среду, в частности, и на пустоту».

По Максвеллу и в пустоте происходит под действием электрического поля смещение электричества

В качестве меры электрической деформации среды в электрическом поле, Максвелл ввел вектор электрического смещения, по величине равный отношению количества электричества, сместившегося при установлении поля сквозь элемент поверхности ds , нормальный к направлению смещения, к величине этого элемента

$$D = \frac{dQ}{ds}$$

и имеющий направление, совпадающее с направлением смещения положительного электричества».

Все это дается не в качестве исторической справки, а как определение электрического смещения, предлагаемое в курсе. Вышеуказанные рассуждения о процессе смещения электричества в пустоте не могут внести ясности в определение важнейших понятий.

Для описания явлений, связанных с электрическим полем в диэлектрике, достаточно иметь две векторные величины — напряженность электрического поля и вектор поляризации, характеризующих соответственно состояние физического пространства (пустоты) и состояние вещества. Никаких принципиальных соображений за введение вектора электрического смещения указать нельзя, и эта величина нашла широкое применение только благодаря упрощению записи различных соотношений (возможность не учитывать в явной форме связанные заряды).

Вектор электрического смещения $\vec{D}$ является суммой вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и вектора поляризации $\vec{P}$, из которых каждый умножается на свой коэффициент, зависящий от выбранной системы единиц. В абсолютной практической системе единиц при ратифицированной форме записи уравнений

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P},$$

что и следует рассматривать как определение вектора $\vec{D}$.

Неясно, почему соотношение $\oint_s \vec{D} d\vec{S} = q$, вытекающее из теоремы Гаусса, вводится как особый постулат Максвелла, которому посвящается целиком § 15.

Ток смещения (глава X) вводится, исходя из максвелловского представления о смещении электричества в пустоте при установлении электрического поля. В конце § 57 авторы указывают на различие между тем, что происходит в веществе диэлектрика и что происходит в пустоте, однако выполнено это очень нечетко. В пояснение выражения

$$\vec{D} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \frac{d\vec{D}_0}{dt} + \frac{d\vec{P}}{dt}$$

на стр. 146 написано: «В отношении первой составляющей явная интерпретация при современном состоянии науки может быть дана. Однако, введение понятия о токе смещения для характеристики того материального процесса, который совершается в электромагнитном поле в среде, называемой нами пустотой, мы должны признать отвечающим действительности, так как при этом мы всегда приходим к правильным результатам». Действительно, мы приходим к правильным результатам, но это вовсе не означает, что мы должны представлять себе тот материальный процесс, который совершается в пустоте, в виде смещения электричества. Нужно было ясно указать, что составляющая

$$\frac{d\vec{D}_0}{dt} = \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$$

характеризует скорость изменения интенсивности электрического поля и что название «плотность тока смещения в пустоте» носит чисто условный характер.

Очевидно, что не имеет смысла говорить о токе смещения в пустоте, не указывая, в каких явлениях он проявляется. Между тем, во всей главе X ни одного слова не сказано о том, что изменение электрического поля вызывает появление магнитного поля и что образование магнитного поля есть единственное проявление тока смещения в пустоте.

Основной характеристикой магнитного поля авторы считают магнитный поток (стр. 170), хотя магнитный поток зависит не только от интенсивности магнитного поля, и также и от размера и положения контура, ограничивающего поверхность, сквозь которую поток определяется.

Авторами внесена неясность в представление о магнитных явлениях в связи с определением понятия напряженности поля и намагниченности (интенсивности намагничивания). В книге неоднократно подчеркивается, что магнитных масс не существует. Понятие о магнитной индукции и понятие магнитного потока дается без привлечения магнитных масс. Однако, переходя к определению напряженности магнитного поля и затем к интенсивности намагничивания, авторы считают невозможным это выполнить в представлении о магнитных массах (стр. 194, 204—205).

Ввиду проявленной двойственности в трактовке магнитных явлений появились две величины, каждую из которых можно рассматривать как характеристику интенсивности магнитного поля. Если исходить из магнитных масс, таковой характеристикой является напряженность магнитного поля $\vec{H}$, если же не прибегать к понятию о магнитных массах, как это и делали авторы до стр. 193, то — магнитная индукция $\vec{B}$. Никаких разъяснений по этому поводу не приводится.

В § 79 проводится сравнение между процессом поляризации диэлектрика и намагничиванием среды, для объяснения которого, опять-таки привлекаются магнитные массы. В результате появляется неправильная аналогия между векторами $\vec{E}$ и $\vec{H}$, $\vec{B}$ и $\vec{D}$. Между тем, если говорить о роли, которую играют эти векторы в описании электрических и магнитных явлений, то аналогия получается совсем иная: $\vec{B}$ и $\vec{E}$, $\vec{J}$ и $\vec{P}$, $\vec{H}$ и $\vec{D}$.

В § 87 приведены объяснения, основанные либо на понятии о магнитной массе, либо на понятии о магнитном противлении. Оба объяснения авторы считают формальными и указывают, что фактически магнитное поле создается не только макроскопическими, но и элементарными частицами. Однако, объяснения, основанные на использовании представления об элементарных (молекулярных) токах,

которое надо было бы дать в первую очередь, не приводится вовсе.

Нельзя согласиться с приводимым в книге определением таких важных понятий, как напряжение и электродвижущая сила. На стр. 34 говорится: «...электродвижущая сила, действующая вдоль какого-либо пути, равна линейному интегралу вектора напряженности электрического поля вдоль этого пути». Отсюда следует, что под э. д. с. понимается та величина, которая в электротехнике называется напряжением. Что же касается напряжения, то на стр. 34 написано:

«Нередко, говоря об э. д. с., действующей на некотором участке цепи от точки А до точки В, употребляют термин напряжение или падение напряжения. Все эти термины, по существу, относятся к одному и тому же понятию».

Различие между терминами «электродвижущая сила» и «напряжение» заключается только в том, что первый применяется как для замкнутых цепей, так и для отдельных участков, второй же применяется только к участкам цепей.

В отличие от обычной трактовки, согласно которой наиболее общим понятием является напряжение, а э. д. с. вводится лишь для характеристики удельной работы, совершаемой сторонними силами, авторы считают понятия э. д. с. и напряжение равноправными. Поэтому, когда все же возникает необходимость ввести для характеристики источников электрической энергии понятие, которое обычно называют электродвижущей силой, то авторы, поскольку термин «электродвижущая сила» уже использован для обозначения величины, обычно называемой напряжением, вводят малоупотребительный термин «внутренняя э. д. с.» (стр. 40).

Наименование § 28 «О природе механических сил в электрическом поле» и § 97 «О природе электромагнитной силы» не соответствуют содержанию этих параграфов. В них излагается интересная только с исторической точки зрения идея Фарадея о том, что силы возникают, как следствие особых механических свойств трубок магнитного и электрического полей. Нельзя признать полезным приводимый вывод формул для определения сил механических тяжений и распоров силовых трубок. Не следует без соответствующих оговорок давать «объяснение» направления действия силы на проводник, которое приведено в конце стр. 261: «Такое направление силы объясняется (разрядка наша.— Г. З. и П. И.) боковым распором магнитных линий».

Нельзя считать удовлетворительным приводимое на стр. 41 объяснение причины, вследствие которой электроны проводимости не выходят за пределы поверхности проводника при низких температурах.

В заключение отметим некоторые мелкие недостатки.

В ряде мест текста недостаточно ясно оговорено или совсем не оговорено, что следует понимать под положительным или отрицательным значением той или иной величины. На стр. 167 написано: «Условимся считать величину Φ в начальном положении витка положительной, если при удалении витка за пределы магнитного поля количество электричества q , протекающего по цепи, будет положительным». Здесь не указано, что означает «протекающее положительное количество электричества», поэтому для читателя остается неясным, в каком же случае Φ будет положительно. Только значительно позже, на стр. 170, даются надлежащие разъяснения.

На стр. 241 написана формула:

$$e_{2M} = - \frac{M_{21} di_1}{dt}$$

Здесь нет объяснения, почему взят знак минус. Как известно, знак минус в этой формуле зависит от выбора положительного направления e_{2M} .

На стр. 242 помещен рис. 173, на котором стрелками указаны направления токов i_1 и i_2 . Что означают эти стрелки — неясно. Если они, как это обычно принято, указывают произвольные положительные направления токов и э. д. с., то в выражениях на стр. 242 знаки членов, содержащих M , должны быть изменены на обратные.

На стр. 245 читаем: «Считая $M > 0$, получаем токи i_1 и i_2 разных знаков». Здесь неясно, что означают «разные знаки токов», так как не было принято никаких условий в отношении их положительных направлений.

Неудачен с методической точки зрения вывод соотношения между токами в обмотках трансформатора на стр. 241. Переход от выражения

$$-M_{21} \frac{di_1}{dt} = r_2 i_1 + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

к выражению

$$-M_{21} \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$$



обосновывается тем, что «при высокой частоте амплитуда э. д. с. самоиндукции во вторичной цепи может во много раз превышать амплитуду падения напряжения $r_2 i_2$; что такое амплитуда э. д. с., читатель еще не знает.

Надо надеяться, что ценность рецензируемой книги в последующем издании, после необходимой переработки, безусловно повысится.

Кандидат техн. наук, доц. Г. В. ЗЕВЕКЕ

Кандидат техн. наук, доц. П. А. ИОНКИН

П. Л. КАЛАНТАРОВ И Л. Р. НЕЙМАН. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Часть II. Теория переменных токов. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. 411 стр., ц. 17 руб. Госэнергоиздат, 1948.

Рецензируемая книга, выходящая в третьем издании, охватывает все основные вопросы, входящие в программу курса теории переменных токов в электротехнических и энергетических вузах. Наряду с изложением расчетных методов в книге уделено достаточно внимания физической характеристике явлений. Язык книги легкий и доступный; в основном текст составлен из коротких фраз, что весьма облегчает чтение. В целом материал книги изложен четко и ясно. Это же относится и к формулировке основных положений. Так, кратко и четко изложены: зависимость наибольших действующих значений напряжения и тока, допустимых для машин и трансформаторов, от их конструкции (стр. 41); колебания энергии в цепи переменного тока и, в частности, уравнение элементарных работ (§ 20), взаимная индукция при последовательном и параллельном соединении (§ 30—32); колебания энергии при резонансе (§ 37). Авторы поступают правильно, проводя аналогию между резонансами в последовательной цепи R, L, C и в параллельной цепи, состоящей из трех ветвей, содержащих каждая только R, L и C . При таком подходе в обоих случаях резонанс будет иметь место, если угловая частота внешнего напряжения равна собственной угловой частоте идеального контура. Авторы умело и методично показывают, что в обоих случаях резонанс характеризуется постоянством суммы энергий магнитного и электрического полей.

Лаконично и ясно изложены частотные электрические фильтры (§ 65), а также свойства их зон прозрачности и затухания. Хорошо дано применение цепей со сталью для умножения частоты, стабилизации напряжения и усиления мощности.

При рассмотрении переходных процессов в цепях r, L и r, C весьма облегчают усвоение энергетической стороны процесса приводимые авторами кривые мощности, скорости превращения электромагнитной энергии в тепло и скорости возрастания значений энергии магнитного и электрического поля (§ 175 и 183).

Весьма хорошо по стилю, четкости и легкости написана вся глава XII, посвященная однородным линиям при установившемся режиме.

Как существенное достоинство книги нужно отметить, что опечаток в ней весьма мало.

Книга в известной мере, имеет как бы «низкочастотный» и «силноточный» уклон. В ней даже не упомянуто, что машинный генератор — не единственный источник получения переменного тока (стр. 161); несомненно, что после рассмотрения процессов в колебательном контуре следовало бы рассказать и о ламповом генераторе.

В главе о вихревых токах авторы освещают только вредное действие вихревых токов, не упоминая о высокочастотном индукционном нагреве. При изложении принципа статического преобразования частоты (стр. 255) имеются в виду только низкочастотные инвертеры и выпрямители.

Принципы модуляции и получения незатухающих биеений, так же как и нелинейной генерации колебаний, не освещены вовсе.

В главе XVIII, посвященной рассмотрению переходных режимов в однородных линиях, авторы не рассматривают возможности изменения напряжения генератора за время движения волны вдоль линии, что существенно как для высокочастотных линий связи, так и для схем обнаружения повреждения повреждения линий.

Нам представляются не оправданными некоторые термины, употребляемые в книге. К числу их относятся — э. д. с. на участке цепи, под которой понимается падение напряжения на этом участке; вместо общепринятого термина «опережает» употребляется слово «упреждает»; вместо термина «свободные» токи и напряжения введено слово «преходящие»; вместо обозначения среднеполупериодных значений русским индексом $ср$ — $E_{ср}$, $U_{ср}$, $I_{ср}$ принят индекс med , т. е. E_{med} , U_{med} , I_{med} .

Объем книги для учебника чрезмерно велик. Никан нельзя признать, что 70—80 лекционным часам, которые отводятся обычно для изложения материала, рассматриваемого в книге, соответствует объем почти в 33 авторских листа. Так, круговым диаграммам уделено в книге слишком много внимания (в то же время амплитудно-фазовые характеристики, являющиеся вторым примером геометрических мест в электротехнике и играющие важную роль в теории автоматического регулирования, не освещены вовсе). Можно опустить § 17 — диаграммы в отрезках на осях, § 43 — синхронный двигатель как элемент цепи переменного тока, § 70—72 о резонансе в связанных цепях и в цепных схемах. Не следует рассматривать в учебнике повторное сопротивление и коэффициент распространения симметричного четырехполосника (§ 56 и 57). Изданные подробно даны способы разложения периодических кривых на гармоники (§ 107—112), относящиеся к курсу математики. Опытное определение параметров трансформаторов, Г-образные схемы их замещения и круговая диаграмма трансформатора (§ 136, часть § 134, § 138 и 139) относятся к специальному курсу трансформаторов. Вполне можно опустить § 169 об умножении систем.

В то же время в книге не рассмотрен ряд существенных вопросов: доказательство баланса активных и реактивных мощностей в произвольной цепи переменного тока со многими э. д. с., качественное (принципиальное) построение векторных диаграмм для разветвленных цепей с 2—3 контурами и э. д. с. в них, или хотя бы только для смешанных цепей с одной э. д. с. Не дается ни одного примера построения векторных диаграмм для разветвленной цепи с взаимной индукцией; не дана методика расчета переходных процессов в разветвленных цепях классическим методом; не рассмотрено применение формул Хевисайда для ненулевых начальных условий; не дается даже представления об обратных связях и усилителях мощности. В главе XVII — «Однородные линии при установившемся режиме» отсутствуют формулы, позволяющие представлять полные токи и напряжения в любой точке линии как сумму токов и напряжений падающей и отраженной волны. Не приведены формулы закона Ома для падающей и отраженной волн

$$i_{пад} = \frac{\dot{U}_{пад}}{z_c}, \quad i_{отр} = -\frac{\dot{U}_{отр}}{z_c}.$$

Вводя впервые (на стр. 56) понятие «оложительного» направления напряжения, авторы даже его не определяют. То же относится и к введенным на стр. 50 и 53 величинам z и y . Только из неравенств, где они впервые появляются, можно установить, что речь идет о модулях векторов полных сопротивлений и проводимостей.

Введение термина «волновое сопротивление» в главу резонансе (стр. 68) явно преждевременно и не будет понято студентами.

Слишком поздно (только на стр. 85) вводится символический метод — основной метод расчета любых цепей переменного тока; благодаря этому авторы вынуждены рассматривать расчет цепей со взаимной индуктивностью в главе II без применения символического метода. Это нечет за собой далее то, что символическому методу при применении к расчету цепей со взаимной индуктивностью (стр. 99) отводится всего 11 строк, причем ничего не говорится о двусмысленности выражений $\pm \dot{E}_m$ или $\pm j\omega M \dot{I}$, т. е. о согласном и встречном включении.

При рассмотрении метода контурных токов и доказательства теоремы взаимности не дано определения собственных и взаимных проводимостей контуров и ветвей, равно как не подчеркнута разница между этими понятиями (стр. 99—100). В итоге величина $Y_{кт}$, которая на последней строчке стр. 99 фигурирует как взаимная проводимость контуров k и m , уже на стр. 100 преподносится как взаимная проводимость двух ветвей k и m . § 115 о расчете тока цепи с несинусоидальным напряжением следовало бы начать с принципа наложения; ссылка на такую возможность имеется только в конце параграфа.

Электрические фильтры изложены в двух параграфах (66 и 118), причем сначала дается расчет фильтров (§ 66), потом принципы их устройства (§ 118). Естественнее было бы иметь обратный порядок.

Высшие гармоники в многофазных цепях рассмотрены слишком обобщенно. Следовало бы рассматривать их не для многофазной системы вообще, а для трехфазной, что представляет наибольший интерес с практической точки зрения.

На стр. 222 говорится, что B неодинаково по сечению стержня, а на стр. 223 и 224 B выносится из-под интеграла сечению без всяких оговорок. Более того, на стр. 224 прямо говорится, что максимальная индукция одинакова на всех точках поперечного сечения стержня.

При составлении эквивалентной схемы трансформатора необходимо указать, что величины Y_0 , G_0 и b_0 зависят от того, какая из обмоток является первичной.

В главе XIII «Электрические цепи с переменными параметрами» следовало бы не ограничиваться только катушками со стальными сердечниками и выпрямителями, а хотя бы кратко рассмотреть и другие нелинейные элементы электрической дуга, электронная лампа, газоразрядный прибор, нелинейные емкости — например, конденсатор с пьезоэлектриком. Тогда у студента не создавалось бы впечатление, что неоднородность вольтамперных характеристик есть специфическая особенность цепей со сталью, что аналогичные явления не наблюдаются в цепях с

электрической дугой, с неоновой лампой, электронными лампами и т. д.

При определении установившегося режима (тока или напряжения) как частного решения неоднородного дифференциального уравнения (стр. 25, 91 и 310) необходимо подчеркнуть, что этот режим определяется не всяким частным решением неоднородного дифференциального уравнения, а таким его частным решением, которое не содержит членов, подобных имеющимся в общем решении однородного дифференциального уравнения (т. е. уравнения без правой части).

Недостаточно отнесены преимущества кривых синусоидальной формы (стр. 15); мало сказано о переходе от вращения вилка в однородном поле к вращению его в радиальном поле и не отмечена необходимость такого перехода (стр. 19); не дано доказательств того, что угол отклонения стрелки прибора тепловой и хотя бы электродинамической систем пропорционален эффективному значению переменной величины, без чего неубедительно введение

$$\text{выражения } \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Может дезориентировать утверждение «при построении векторных диаграмм за исходный вектор обычно принимают вектор напряжения, приложенного к зажимам цепи» (стр. 47). Наоборот, при качественном (принципиальном) построении векторной диаграммы, например смешанной цепи, идут от нагрузки к генератору, начинают с какого-нибудь разветвления цепи и в качестве последнего вектора строят напряжение, приложенное к зажимам цепи. Не дана физическая трактовка удвоения напряжения на конце разомкнутой линии и удвоения тока на конце короткозамкнутой линии. Правило составления эквивалентной схемы дается только для конца линии. Его следовало бы дать для любого узла линии. Не указано, как следует находить распределение тока и напряжения вдоль по линии. А между тем, последовательное рассмотрение методики определения функций $u(x,t)$ и $i(x,t)$ для любых примеров, в том числе и самых простых, позволило бы студентам глубже проникнуть в физическую сущность получаемых явлений. Одновременно следовало бы дать графики зависимости от времени тока и напряжения в конце линии для всех рассмотренных примеров.

Хотелось бы пожелать, чтобы высказанные замечания были учтены авторами в следующем издании книги. В заключение следует отметить, что, несмотря на все сделанные замечания, книга является одним из лучших учебников по теории переменных токов.

Кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХОВ
Кандидат техн. наук, доц. А. В. НЕТУШИЛ



А. Р. НЕЙМАН И П. Л. КАЛАНТАРОВ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Часть III. Теория электромагнитного поля. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. 343 стр., ц. 13 руб. Госэнергоиздат, 1948.

Книгой об электромагнитном поле завершается трехтомный курс Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова. Если предыдущие тома имеют продолжительную историю, являются по сути дела переизданиями, то третий том издан заново и в свет выходит впервые.

С точки зрения тех общих требований, которые должны предъявляться к любому советскому учебнику, книга заслуживает положительной оценки. Ясное и простое изложение, достаточная, а местами чрезмерная даже строгость выводов, вполне современный характер книги, органически связанное с текстом изложение русских работ (в частности, самих авторов) — таков итог ознакомления с книгой. Почти безупречен и ее внешний вид.

Переходя к разбору содержания рецензируемой книги, хочется в первую очередь остановиться на выборе материала. Единобразная точка зрения здесь еще не установилась. Общепризнано, что в учебнике по электромагнитному полю должны быть изложены основные законы и по возможности их на сравнительно простых примерах. Выбор этих примеров, разумеется, произволен. Надо познакомить учащегося с некоторыми техническими резуль-

татами (емкости и индуктивности простейших конфигураций, глубина проникновения волны и т. п.). Кроме того, — и это, пожалуй главное, — надо приучить учащегося к новым и к тому же трудно воспринимаемым понятиям, воспитать его мышление, привить расчетные навыки.

Основные понятия и уравнения электромагнитного поля установлены еще в первом томе учебника, и здесь сохраняют силу все те возражения, которые были сделаны в рецензии на этот том (см. выше). Мы ограничимся разбором лишь того материала, который появляется в этом томе впервые в курсе.

Вот краткий перечень решенных в книге задач: электростатические поля нитевидных и призматических проводников, магнитные поля линейных контуров, излучающий диполь, волноводы, распределение плотности тока в круглых проводах и пластинах. Учебная ценность этих примеров проверена педагогической практикой, и здесь авторов книги нельзя упрекнуть ни в чем. Ряд задач является новым в том смысле, что до сих пор не появлялся в учебниках. Удачны параграфы, посвященные понятию среднегеометрического расстояния (§ 71) и расчету индуктивно-

сти торонда (§ 83). Сомнительна польза § 46, содержащая весьма приближенный расчет потенциальных коэффициентов пары прямолинейных отрезков; достаточно указать, что развернутая формула для вычисления этого коэффициента занимает всего 12 строк. Явно не на месте чисто цепная задача о расчете емкости и индуктивности одной фазы транспонированной трехфазной системы (§ 43 и 91), которая по своему содержанию относится ко второму тому учебника.

Впервые в учебник электротехники вводятся простейшие эллиптические функции, что дало возможность рассмотреть задачу о взаимной индуктивности двух соосных круговых контуров и уже упомянутую задачу о индуктивности тороида. Более важными для приложений являются шаровые функции, которых в книге нет. Между тем, в § 35 рассматривается задача об искажении однородного поля внесенным в него диэлектрическим шаром, и авторам приходится строить решение по схеме «предположим, что шар поляризуется однородно», т. е. давать почти готовый результат.

Мало внимания уделено графическим методам расчета потенциальных полей; хотя этому вопросу посвящены в общей сложности четыре параграфа (§ 28, 30, 31, 76), но, даже усвоив их, учащийся вряд ли сумеет самостоятельно построить картину поля. Ничего не сказано о методе сеток.

Чисто педагогическая задача доведения материала книги до сознания учащегося решена, за малыми исключениями, вполне успешно. Книга читается легко, и в этом ее большое достоинство. Многочисленные выкладки, без которых не может обойтись курс электромагнитного поля, даны в меру подробно. Авторы можно упрекнуть лишь в том, что в ряде случаев они не решаются заменить доказательство показом. Приведу два примера.

§§ 17 и 64 посвящены доказательству теорем единственности в электрическом и магнитном полях. Познавательная ценность этих теорем невелика, но, не будь их, авторы могли бы получить упрек в нестрогости изложения. Между тем, студент, усвоивший содержание книги, и без этих теорем придет к мысли о том, что заданному распределению зарядов или токов соответствует вполне определенное электрическое или магнитное поле.

Рецензии на три части книги Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова «Теоретические основы электротехники» были доложены и обсуждены на объединенных заседаниях Секции теоретической электротехники НТО МЭИ и Кафедры теоретических основ электротехники МЭИ. Ниже помещаются ответные замечания авторов книги, в которых поднимается ряд вопросов, представляющих интерес для читателей журнала «Электричество».

Отзыв о написанном нами курсе «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), составленный членами кафедры ТОЭ МЭИ, представляет собой совокупность трех различных отзывов о каждом из трех томов курса в отдельности.

Рецензенты дали в общем положительную оценку нашему курсу и вместе с тем указали на ряд недочетов, имеющих, по их мнению, в этом курсе.

Некоторые из критических замечаний и пожеланий рецензентов не встречают с нашей стороны возражений и будут учтены при переиздании курса. Так, считая неприемлемым ограничиваться чисто формальным рассмотрением основных векторных величин, характеризующих электрическое и магнитное поля, мы вместе с тем согласны с пожеланием, совпадающим с высказываниями представителей других высших школ, об изменении порядка введения этих величин. В частности, мы согласны с пожеланием об определении величин, характеризующих магнитное поле, без использования понятия о магнитных массах. Необходимо признать желательность расширения сведений о нелинейных электрических цепях. Возможно, как указывают рецензенты, ограничиться при рассмотрении высших гармоник в многофазных цепях только трехфазными цепями, сократить сведения по теории круговых диаграмм, опустить способы разложения периодических кривых. Следует привести примеры технического использования вихревых токов, несколько расширить изложение графических методов расчета потенциальных полей, по возможности, упростить некоторые сложные доказательства в теории электромагнитного поля. Необходимо также принять во внимание ряд заме-

§ 11 занят длинным доказательством того, что объемному и поверхностному распределению заряда соответствует конечное значение потенциала, а линейному или точечному — бесконечное. Значительно более впечатляющей является ссылка на известные соотношения в плоском, цилиндрическом и сферическом конденсаторах.

Серьезное возражение может быть сделано по поводу объема книги, составляющего 24 печатных листа. Сопоставив эту цифру с программами и учебными планами наших вузов, где на теорию электромагнитного поля отводится около 40 лекционных часов, надо сделать вывод о возможности усвоения книги студентом. Поневолье придется (и приходится) или делать в книге большие пропуски, или отказываться от следования в преподавании плану книги.

Нельзя не отметить ряда погрешностей в изложении.

В § 7 пустота определяется как часть пространства, где отсутствуют электроны, протоны и т. п., и тут же несколькими строками ниже выписываются уравнения поля в пустоте «с учетом движущихся в нем зарядов».

Конец § 14 можно понять таким образом, что операторы Δ и Δ^2 ничем не отличаются друг от друга, что справедливо лишь в применении к скалярам.

Неудачны рис. 48 и 102, посвященные задаче о зеркальном изображении линейного заряда и тока от внутренней двугранной угла. Поскольку в предыдущем изложении даны те же отражения от плоской границы и решена задача о конформном преобразовании внутренней двугранной угла на полуплоскость, естественно объединить результаты. Такой путь значительно проще тех многократных отражений, которыми пользуется автор.

Неправильно обозначать обратные гиперболические функции символами arcsch или arcsch .

В заключение нельзя не отметить, что рецензируемая книга является первым русским учебником по электромагнитному полю, предназначенным для технических вузов. Нелегкая задача создания такого учебника вполне успешно решена его авторами.

Доктор техн. наук, проф. В. Ю. ЛОМОНОСОВ

чений, относящихся к уточнениям отдельных положений и формулировок.

Ряд замечаний рецензентов следует признать спорными. К таким замечаниям мы относим, например, замечание об определении понятий об электродвижущей силе и напряжении, о желательности особого рассмотрения амплитудно-фазных характеристик, о желательности рассмотрения возможности изменения напряжения генератора при движении волны вдоль линии, о целесообразности перенесения во II том задачи о расчете емкости и индуктивности транспонированной трехфазной линии, строгое решение которой основано на выражениях для потенциальных коэффициентов и для индуктивностей отрезков проводов, получаемых в III томе.

Вместе с тем в отзывах имеются замечания, с которыми нельзя согласиться. Переходя к этим замечаниям, следует отметить, что все три отзыва существенно отличаются друг от друга по характеру. В частности, отзыв о I томе отличается односторонностью суждений и отсутствием у рецензентов стремления вникать в концепции иные, чем те, к которым они привыкли.

В этом отношении особенно характерно следующее замечание рецензентов: «Неясно, почему соотношение $\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q$, вытекающее из теоремы Гаусса, вводится как особый постулат Максвелла, которому посвящается целиком § 15». В книге (§ 15, стр. 53) ясно сказано: «Принимают, что это соотношение справедливо во всех без исключения случаях, т. е. и для среды неоднородной и анизотропной, а также и в переменном электрическом поле. При таком широком обобщении это соотношение следует рассматри-

ить как основной постулат теории электромагнитного поля. Действительно, теорема Гаусса, на которую сослались рецензенты, доказывается на основе закона Кулона только для статических полей. В связи с этим существенно отметить, что один из рецензентов II тома — С. В. Страхов, рецензируя перевод книги Скиллинга «Введение в теорию электромагнитных волн» (Электричество, № 2, 1949) пишет: «В главе IX, излагая уравнение Максвелла, автор подчеркивает, что равенства $\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi$ и $\operatorname{div} \vec{B} = 0$, доказанные опытным путем лишь для статических электрического и магнитного полей, предполагаются справедливыми для тех же полей динамического характера. Лишь немногие авторы считают необходимым отметить этот имеющий существенное значение момент». Таким образом, из сопоставления мнения С. В. Страхова к вышеприведенному замечанию рецензентов I тома следует, что кафедра ТОЭ МЭИ, обсуждавшая отзывы о всех трех томах нашего курса, признала у нас недостатком то, что иностранному автору было поставлено в заслугу.

Односторонность подхода рецензентов I тома наложила соответствующий отпечаток и на разбор ими принятого курса физического истолкования основных величин, характеризующих электрическое и магнитное поля.

Замечание о том, что знак «минус» в формуле $\epsilon_{2m} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$ (стр. 241, т. I) требует пояснения, вызвано,

повидимому, тем, что рецензенты привыкли рассматривать коэффициент взаимной индукции M как величину положительную и не обратили внимания на то, что в нашем курсе избежание двойных знаков в формулах M рассматривается как величина, могущая принимать и положительные и отрицательные значения, о чем с соответствующими пояснениями сказано на стр. 238, т. I и в конце § 31, т. II. Если бы рецензенты обратили внимание на это существенное обстоятельство, то отпало бы и их замечание к стр. 245, т. I, а также замечание о двужначности выражений $\pm j\omega M \vec{I}$ и $\pm \vec{E}_M$ к стр. 99, т. II.

Мы не можем согласиться также с некоторыми замечаниями, явившимися результатом недосмотров рецензентов.

Замечание к фразе «Условимся считать величину Φ в начальном положении витка положительной, если при удалении витка за пределы магнитного поля количество электричества q , протекшего по цепи, будет положительным» (стр. 167, т. I), а именно: «Здесь не указано, что означает протекшее положительное количество электричества, поэтому для читателя остается неясным, в каком случае Φ будет положительно, неверно, так как на той же странице (строки 12—21) с исчерпывающей точностью сказано, когда количество электричества, протекшего по цепи, считается положительным. Неосновательно замечание

к стр. 241, т. I относительно незнакомства читателей с понятием об амплитуде, так как на стр. 154, т. I понятие об амплитуде дано, а кроме того, оно известно и из курса физики. Замечание к стр. 242, т. I, вызвано, очевидно, тем, что рецензенты не учли, что на рис. 173 дан эскиз контуров, а не схема, и что, следовательно, стрелки на этом рисунке, так же, как и на рис. 113, 120, 127, 129, 142, 148, 153, 156 и т. д., не упоминаемых рецензентами, указывают действительное направление токов, а не условное их направление, указываемое на схемах.

В замечании к § 30 и 31, т. II рецензенты не обратили внимания на то, что приведенное в этих параграфах рассмотрение цепей при наличии взаимной индукции без применения символического метода приводит к совершенно общим результатам. При использовании символического метода, что рекомендуется рецензентами, справедливость этих результатов была ограничена синусоидальными режимами. Применению символического метода к расчету цепей при наличии взаимной индукции уделено не только 11 строк на стр. 97, но и половина стр. 98 (т. II), где и сказано о согласном и встречном включении. В главе XVII (об однородных линиях при установившемся режиме) вопреки утверждению рецензентов в конце стр. 359 приведены формулы, дающие ток и напряжение в любой точке линии как суммы падающих и отраженных волн, а в § 204, т. II эти формулы подробно истолкованы с приведением соответствующих рисунков (рис. 385 и 386). О том, что любой режим работы линии можно получить наложением режимов холостого хода и короткого замыкания, указано дважды — в § 202 (стр. 361) и в § 207 (стр. 369). Связи, существующие между амплитудами напряжения и тока падающих и отраженных волн, вопреки утверждению рецензентов, указаны в § 204 в начале стр. 364. Упрек в том, что на стр. 223—224, т. II нет оговорки о пренебрежении непостоянством индукции, неправилен, так как в начале § 125 имеется соответствующая оговорка. Физическая трактовка удвоения напряжения или тока в конце линии имеется на стр. 381, т. II.

Возражений по отдельным частным замечаниям, относящимся к III тому, мы не имеем.

В заключение заметим, что при трех отдельных отзывах не был затронут вопрос о построении и характере всего курса в целом.

Мы считаем своим долгом выразить рецензентам признательность за их труд по рассмотрению нашего курса. Ряд критических замечаний рецензентов, несомненно, будет способствовать улучшению нашего курса при его переиздании.

Доктор техн. наук, проф. П. Л. КАЛАНТАРОВ

Доктор техн. наук, проф. Л. Р. НЕЙМАН



И. С. СТЕКОЛЬНИКОВ. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ. Издание второе, совершенно переработанное. 416 стр., ц. 20 руб. Госэнергоиздат, 1949.

При изучении явлений, протекающих в течение времени порядка одной сотысячной секунды и меньше, электронный осциллограф пока не имеет равных себе других приборов. Этот прибор, позволяющий записать со скоростью сотен тысяч километров в секунду изменение какой-либо величины, дает возможность изучать огромный диапазон явлений в природе, различных процессов в технике и пр.

В связи с этим исключительно велика потребность в хорошей книге по современному электронному осциллографу.

Лауреат Сталинской премии, доктор техн. наук, проф. И. С. Стекольников много и успешно работал по разработке конструкций осциллографов и схем осциллографирования. Им был опубликован ряд работ по этим вопросам. Говоря о рецензируемой книге, следует отметить, что ее автор справился со своей задачей и дал нужную и полезную книгу, в которой в общем удачно изложены современные научные и технические сведения об электронном осциллографе и способах его применения.

В главе первой излагаются физические основы устройства и действия электронного осциллографа. Не приведены исходные данные для расчета эмиссии катода из различных материалов, например, ток на единицу мощности, затрачиваемой на нагрев катода.

На стр. 25—64 излагаются основные представления геометрической электронной оптики. Описание волновых и корпускулярных свойств электрона дается «резкими штрихами». На стр. 25 приводится «сверхволновое» толкование «размазанного» электрона, а на стр. 27 приводится «сверхкорпускулярное» описание электрона; о нем говорится «брошен», «отскакивает» и пр. При таком изложении противоречие между волновым и корпускулярным свойствами электронов читатель видит, а единства их не чувствует. После разбора явления прохождения электрона через однородное электрическое поле не дается ясного указания на отсутствие фокусирующего действия такого поля. Хорошо дан материал по выбору электронно-оптических систем, позволяющий решать три

основные проблемы осциллографа — яркость пятна, чувствительность и качество записи.

На стр. 56 приведено неполное физическое объяснение фокусирующего действия иммерсионной линзы. Справедливо указано, что в иммерсионной электрической линзе, оптической аналогией которой является собирающая линза, стоящая при входе луча и рассеивающая при выходе, фокусирующее действие преобладает над рассеивающим. Это происходит вследствие того, что электроны входят в линзу с меньшей скоростью, чем выходят из нее. Поэтому электронный луч сильнее преломляется и приближается к оптической оси при входе, чем отходит от нее, проходя вторую половину линзы. Однако, в приведенном объяснении фокусирующего действия линзы опущен второй важный момент, а именно то, что входящий пучок электронов идет ближе к краям электродов, а выходящий за счет уже описанного фокусирующего действия — ближе к оси линзы. Электрическое поле у краев электродов за счет явления краевого эффекта сильнее, чем в средней части между электродами, где поле однороднее. Поэтому действие поля на входящий пучок (фокусирование) будет сильнее, чем на выходящий (дефокусирование).

На стр. 39, разбирая действие равномерно ускоряющего поля на расходящийся электронный пучок, автор вместо слова «конвергирующий» применил слово «дивергирующий», что исказило смысл фразы.

Вопрос о концентрирующем действии магнитных сил и рассеивающем — электрических (стр. 85) изложен недостаточно ясно. Уместно было бы учесть достигнутые результаты по изучению и объяснению фокусирования электронного пучка в бетатроне, синхротроне и других ускорителях.

На стр. 91—101 хорошо разобраны качественно и количественно явления, искажающие осциллографическую запись.

Фотографическое действие катодного луча и способы осциллографирования изложены на стр. 107—132. Подробно разбираются физико-химические основы фотографического действия электронного луча, численные характеристики применяемых при этом материалов и способы осциллографирования как в вакууме, так и с помощью внешних устройств. Глубину проникновения электронов в слой вещества автор книги определяет по формуле Томсона. Эта формула выведена для определения потери скорости электронами при сквозном прохождении вещества. В данном случае следовало бы пользоваться формулами для подсчета предельной глубины проникновения электронов больших скоростей.

В главе второй «Конструкции электронного осциллографа с холодным катодом» автор систематизировал и классифицировал обширный материал по этому вопросу. Здесь разобраны некоторые основные типы осциллографов, их отдельные узлы и элементы, имеющие принципиальное значение. Описываются наиболее удачные конструкции и приемы, примененные при решении различных задач.

Сомнительно утверждение (стр. 155), что управление фотокатодом с помощью электромагнита извне менее надежно и более сложно, чем с помощью шлифов.

При довольно подробном описании конструкций осциллографов с холодным катодом на стр. 161—180 и их классификации недостаточно выявлены и описаны общие принципы их конструкции.

В главе третьей описываются осциллографы с горячим катодом. Значительное место уделяется описанию электронных пушек. В книге описываются электрические поля различных электронно-оптических систем, которые поражают читателя своей сложностью. Следовало бы подробнее рассказать о том, что электрические поля обычно изучают на моделях, например, с помощью метода электролитической ванны. Существенно было бы также указать на отмеченные Сталинской премией теоретические работы проф. Г. А. Гринберга, который разработал теоретические методы расчета, позволяющие выбирать форму электродов для получения поля требуемой конфигурации.

В главе четвертой¹ «Элементы осциллографических схем» рассмотрены осо-

бенности работы отдельных элементов электрических схем осциллографов (катодная лампа, тиратрон, шаровые промежутки и т. д.), а также работа узлов схемы (электронные коммутаторы, реле, схемы разверток по времени, делители напряжения, усилители напряжения и т. д.).

Действие этих элементов описано достаточно подробно. Большое место уделено рассмотрению работы шаровых разрядников, трехэлектродных реле и шаровых реле, а также схем, включающих эти элементы; это оправдывается тем, что во многих случаях шаровые разрядники резко упрощают схемы осциллографирования импульсных явлений на высоком напряжении. Все, что относится к этим схемам, изложено весьма подробно и обстоятельно, ясным, четким языком, с приведением значительного количества экспериментальных данных.

Большое место отведено также схемам с электронными и ионными приборами, без которых построить современные электрические схемы осциллографирования часто не представляется возможным. В изложении этого материала встречаются погрешности. Так, в параграфе «Катодная лампа» этот электронный прибор называется попеременно либо «лампа», либо «трубка». Последний термин обычно относится к электронно-лучевой трубке и употреблять его в отношении электронной лампы нельзя, тем более, что существуют электронно-лучевые лампы (6ЛБ). На стр. 224 употребляется термин «зажимы тиратрона». Известно, что зажимов у тиратронов нет, а имеются электроды.

На стр. 249 есть выражение «приложением отрицательного потенциала в 200 в к управляющей сетке». Здесь надо добавить «относительно земли», так как обычно потенциал сетки измеряется относительно катода. Кстати, заметим, что на фиг. 22,3 вместо —200 в стоит +200 в.

На стр. 269 имеется выражение «схема независимого от частоты усилителя, работающего с некоторыми видоизменениями». Во-первых, не ясно, как понимать выражение «независимого от частоты», во-вторых, что значит «работать с видоизменениями», и, в-третьих, мультивибратор, о схеме которого идет в этом месте речь, не является усилителем.

На стр. 277 автор говорит о «разряде в триодах», а «погасании» их и т. д. Очевидно, речь здесь идет не о триодах, а о тиратронах, тем более, что с триодами приведенная схема работать не будет. Немного ниже, объясняя действие схемы фиг. 23,4, автор пишет, что «сопротивления R_4 выполняют «полупериодный» контроль, меняя длительность последующих волн мультивибратора». Роль сопротивлений R_4 после этой фразы остается все-таки непонятной.

На стр. 223 говорится, что у пентодов внутреннее сопротивление меньше, чем у экранированных ламп и триодов; это ошибочно.

Описание схемы фиг. 22,6 дано весьма неясно. В частности, непонятна роль сопротивления R_3 и конденсатора C_1 . Нам кажется, что при таком включении он будет приближать погасание тиратрона Th_1 , а не задерживать его. Кроме того, падение напряжения на тиратроне почти постоянно, а не меняется, как пишет автор, так же, как и потенциал на катоде пентода L . Здесь же сказано, что источник напряжения имеет «землю при каких-либо изменениях потенциалов». Что это значит — непонятно. Общее замечание к схемам фиг. 22,6 и 22,8 — излишнее применение тиратронов. Постоянство потенциала на сетках пентода во время разряда через него конденсаторов временной цепи можно получить проще — с использованием диодов.

На стр. 260 (фраза внизу страницы) сказано, что на фиг. 22,12 представлена вольтамперная характеристика разрядного сопротивления. На самом деле на фиг. 22,12 приведена вольтамперная характеристика пентода.

На стр. 269 утверждается, что динаatronный генератор является разновидностью схемы мультивибратора. Это не совсем правильно, так как в основе их лежат различные принципы.

В схеме фиг. 22,28 перепутано включение сеток пентода III. Надо отметить также, что плавная регулировка частоты развертки путем изменения катодного сопротивления R_k невыгодна, так как при уменьшении R_k ухудшится линейность развертывающего напряжения за счет уменьшения действующего внутреннего сопротивления

¹ Часть рецензии, рассматривающая эту главу, составлена при участии инж. В. С. Мелихова.

ны, равного $R_1 + \mu R_k$. В данной схеме для получения 500 кГц не обязательно применять лампы EL-12 и в некоторых советских осциллографах получают частоту развертки до $200 \div 500$ кГц на лампах отечественного производства.

На стр. 276 сказано: „Ток зависит здесь от трех параметров и характеристики лампы, и поэтому он должен быть для правильного воспроизведения, например пропорционален $U_{m1} = f_u(U_a; U_{st})$ “. Это непонятно. Если из предыдущей фразы, надо было бы написать, $I_a = U_{m1} f_u(U_a, U_{st})$. Кстати, неясно, почему знак функции f имеет индекс u .

На стр. 279 указано, что на схеме фиг. 23,5 не показана подводка постоянных потенциалов к экранным сеткам ламп V_3 и V_4 . На самом деле постоянных потенциалов на экранных сетках здесь не должно быть, иначе обе лампы будут работать одновременно.

Приведенные на стр. 326—328 схемы усилителей постоянного тока чересчур сложны и собраны на дефицитных лампах; при двух каскадах усиления приведенная схема содержит семь ламп, не считая кенотронов. Для усиления необходимой стабильности при этом числе каскадов усиления достаточно трех-четырех ламп и газоразрядного стабилизатора напряжения.

В главе пятой разбираются электрические схемы включения осциллографов. Этот весьма большой материал хорошо классифицирован автором книги. Здесь приводятся схемы для вклю-

чения осциллографов с холодным и горячим катодом. Описываются длительно действующие схемы и схемы импульсного действия. Большей частью описываются экспериментально проведенные оригинальные схемы. Особое внимание уделено описанию импульсных схем. При современном развитии импульсной техники такое разделение материала следует одобрить.

В главе шестой приводятся некоторые конкретные примеры из области применения электронного осциллографа в технике. Приведенные примеры помимо разобранных в главе пятой достаточно удачно показывают широкие возможности применения этого прибора.

В целом книга читается легко. Автор ясно излагает свои мысли, пользуясь богатым словарем русского языка. Тем более бросаются в глаза на этом хорошем фоне отдельные неудачные фразы, например, на стр. 191, 197, 205, 211, 220.

Имеются невыправленные опечатки.

В заключение еще раз отметим в общем хорошее качество этой полезной книги. Учитывая накопившийся огромный материал по применению осциллографа, следует высказать предложение разделить материал в последующем издании на две книги: первую посвятить применению осциллографа для изучения стационарных и периодических явлений, другую — применению его в импульсной технике.

Доктор техн. наук, проф. А. А. ВОРОБЬЕВ
Томский политехнический институт



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издания 1949 г.)

АМАЛИЦКИЙ М. В., КУРБЕСОВ Н. С. МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО КУРСУ «ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ». (Всесоюзный институт техники связи). 72 стр., бесплатно. Связьиздат.

АНДРИАНОВ К. А., СОБОЛЕВСКИЙ М. В. ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ. 320 стр., бесплатно. Оборонгиз.

АНЧАРОВА М. С. ЗА ОБРАЗЦОВОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ПЕННИ. (Библиотека стажановца). 48 стр., ц. 85 коп. Связьиздат.

БЕРЕЗНИЦКИЙ В. С., ВДОВЕЦ Н. З. ГАБАРИТЫ И ЦОКОЛЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП. (Баро новой техники. Серия «В помощь конструктору»). 23 стр. текста + 354 листа чертежей, изда-ние заказное. Изд-во «Советское радио».

БИТТЕРНИХ Р. И., ТУГАРИНОВ Н. П. ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБОВОЗБУДИТЕЛЕЙ СЕРИИ ВТ. 25 стр., бесплатно. ЦЭТИ МЭП СССР.

БОРИСОГЛЕБСКИЙ Н. В. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПОДРОБНАЯ ПРОФИЛАКТИКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ. 100 стр., 10 руб. Госэнергоиздат.

ВРЕМЕННАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ИГНИТЕЛЬНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ. 27 стр., бесплатно. Главное управление электрификации железных дорог МПС СССР.

ГЕЛЬМАН А. С. КОНТАКТНАЯ ЭЛЕКТРОСВАРКА. Допущено в качестве учебного пособия для вузов. 499 стр., ц. 19 руб. Машгиз.

ГОРШКОВ А. С. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ. 288 стр., ц. 9 руб. Госэнергоиздат.

ДОПЕНКО В. Е. КОНТАКТНАЯ СВАРКА РЕЛЬСОВ. 313 стр., ц. 9 руб. Трансжелдориздат.

ДУТКИН Г. С., ЛИБЕРМАН А. Я. СООРУЖЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. Издание третье, переработанное. 418 стр., ц. 12 руб. Госэнергоиздат.

Книга предназначена для подготовки рабочих кадров, занятых строительством и эксплуатацией высоковольтных воздушных линий электропередачи, и для учащихся в школах 430 соответствующего профиля. В книге даны необходимые сведения как по сооружению, монтажу высоковольтных линий электропередачи, так и по их эксплуатации и ремонту. Книга разбита на две части. Первая часть — строительство и монтаж линий электропередачи — содержит: элементы линий электропередачи; классификация и технические условия на сооружение линий электропередачи; изыскания; монтаж линий электропередачи; подготовительные работы; основания фундаментов опор; опоры; предохранение опор от разрушения; ловка опор; монтаж проводов и тросов; вспомогательные сооружения; механизация производства работ. Вторая часть — эксплуатация высоковольтных линий электропередачи состоит из 14 глав: за-

дачи эксплуатации высоковольтных линий электропередачи; присоединение высоковольтных линий электропередачи в эксплуатацию; работа высоковольтных линий электропередачи в эксплуатации; повреждения опор; повреждения проводов и тросов; повреждения линейных изоляторов и арматуры; состояние трасс линий электропередачи; грозовые повреждения и защита от них; гололед на линиях электропередачи и борьба с ним; организация эксплуатации высоковольтных линий электропередачи; осмотры линий электропередачи, контрольные замеры и испытания; ремонт высоковольтных линий электропередачи; техника безопасности при эксплуатации высоковольтных линий электропередачи.

ЖДАНОВ Г. С. РЕНТГЕНОВЫЕ ЛУЧИ. (Научно-популярная библиотека). 32 стр., ц. 50 коп. Гостехиздат.

ЗУБКОВ Ю. Д. АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ. 112 стр., ц. 7 руб. Изд-во Академии наук Казахской ССР.

ИЩОКИ Я. С. ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА. 296 стр., ц. 11 руб. Изд-во «Советское радио».

КАБАНОВ И. Г. Электропромышленность и ее роль в развитии народного хозяйства СССР. (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). Стенограмма публичной лекции, прочитанной в Центральном лектории Общества в Москве. 30 стр., ц. 60 коп. Изд-во «Правда».

КАПЦОВ Н. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ. Стенограмма публичной лекции для инженеров и техников. (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). 24 стр., ц. 60 коп. Изд-во «Правда».

КОЛОБКОВ Н. В. ГРОЗЫ И БУРИ. (Научно-популярная библиотека). 64 стр., ц. 1 руб. 35 коп. Гостехиздат.

КОНТРИКАДЗЕ К. И. ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ. 280 стр., ц. 9 руб. Изд-во «Техника да Шрома» (на грузинском языке).

КОРЕЛЬСКИЙ ТАРАСОВ-АГАЛАКОВ. ПРОСТЕЙШИЕ СПОСОБЫ ГРОЗОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ. 8 стр., бесплатно. Пожарная охрана УМВД Запорожской области.

КУБАРКИН Л., ЕПЮТИН В. КАК ПОСТРОИТЬ ДЕТЕКТОРНЫЙ ПРИЕМНИК. 40 стр., ц. 1 руб. Латвийское государственное изд-во (на латышском языке).

КУЛАЕВ А. М. ВАГОННЫЕ ЭЛЕКТРОДОМКРАТЫ 12,5 — 25 ТОННОВЫЕ. Инструкция по обслуживанию и уходу. 39 стр., цена не указана. Главное управление заводами железнодорожного машиностроения МПС СССР.

КАЛАНШИКОВ А. Г. ФЛЮКСМЕТР. Теория, опыты исследования и применения прибора для измерения магнитного потока. (Академия наук СССР. Геофизический институт). 160 стр., ц. 9 руб. Изд-во Академии наук СССР.

ЛЕВИТИН Б. А. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОПРИЕМНИКОВ. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга). 90 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ЛОБАСТОВ В. Л. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕЛЕГРАФНОЙ АППАРАТУРЫ. Допущено в качестве учебника для техникумов. 199 стр., ц. 7 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается писать рецензии.

ЛОГИНОВ В. И. СПРАВОЧНИК ПО РАДИОДЕТАЛЯМ. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 41). 82 стр., ц. 3 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

ЛАТЫШЕВ А. А. ТИПОВАЯ ДИЗЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ МАСТЕРСКИХ ПРИ МТС. 29 стр. текста и 4 стр. чертежей, ц. 4 руб. Сельхозиздат МХС СССР.

ЛЕРНЕР А. Я. РАСЧЛЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ (ВНТО приборостроения). Лекция на семинаре по теории автоматического регулирования. 36 стр., бесплатно. Машгиз.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ. Составлено по материалам книги К. Н. Müller, R. L. Garman и М. Е. D. Gos. Experimental Electronics. 427 стр., ц. 22 руб. Изд-во иностранной литературы.

МЕЕРСОН И. Г., ПОЛОТОВСКИЙ Л. С. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Учебное пособие по спецоборудованию самолетов для технического состава ВВС вооруженных сил СССР. 240 стр., ц. 7 руб. 30 коп. Военное изд-во.

МЕТРЕВЕЛИ В. И. ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. 71 стр., ц. 3 руб. 50 коп. Изд-во «Техника да Шрома» (на грузинском языке).

МОСКОВСКИЙ Ф. А. БУХГАЛТЕРСКИЙ БАЛАНС И КАЛКУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. 152 стр., ц. 7 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

НАДЕЛЪ А. Н. ИСПЫТАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ЗАПУЛЕНИЙ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ (Энергометаллургпром. Информационное письмо № 44). 14 стр., бесплатно. Металлургиздат.

Научно-техническая сессия по ремонту электрооборудования. Тезисы докладов (Секция промэлектротехники МОНИТОЭ). 38 стр., цена не указана. Изд. МОНИТОЭ.

Научно-техническая сессия по экономии электроэнергетики. Тезисы докладов (Секция промэлектротехники МОНИТОЭ и Энергосбыт Мосэнерго). 37 стр., цена не указана. Изд. МОНИТОЭ.

НИКИТИН С. И. МЕТОДИКА ВОДОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ. 239 стр., ц. 12 руб. Госэнергоиздат.

НОДИЯ М. З. РАДИОЛОКАЦИЯ. 40 стр., ц. 1 руб. Госиздат Грузинской ССР (на грузинском языке).

ПАВЛОВ П. Г. ВЕЛИКИЙ РУССКИЙ УЧЕНЫЙ ИЗОБРЕТАТЕЛЬ РАДИО А. С. ПОПОВ. Рекоменд. список литературы к лекции. 6 стр., бесплатно. Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний. Центральная политехническая библиотека.

ПЕТРОВ Г. А., КРОНКАЛН Л. А. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МОТОРВАГОННОЙ СЕКЦИИ 1650/3300 В ПОСТОЯННОГО ТОКА (Труды ВНИИЖДТ. Выпуск 35). 80 стр., ц. 4 руб. Трансжелдориздат.

*** ПИОТРОВСКИЙ Л. М. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.** Допущено в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. 528 стр., ц. 32 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

*** ПИОТРОВСКИЙ Л. М., ПАЛЬ Е. А. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.** Часть I. Общая часть и испытание машин постоянного тока. Допущено в качестве учебного пособия для энергетических и электротехнических вузов. 390 стр., ц. 14 руб. Госэнергоиздат.

ПЛАШИНСКИЙ Н. К. КУРС ЭЛЕКТРОНАВИГАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫСШИХ ВОЕННО-МОРСКИХ УЧИЛИЩ. (Управление военно-морских учебных заведений). 220 стр., ц. 7 руб. 50 коп. Военное изд-во.

РАБИНОВИЧ А. Я. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ И ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ РЕЛЬСОВ. 68 стр., бесплатно. Трансжелдориздат.

РАШКОВСКИЙ В. Г. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЕМЛЕНИЯ ПЕРЕНОСНЫМИ ПРИБОРАМИ (Энергометаллургпром. Информационное письмо № 47). 8 стр., бесплатно. Металлургиздат.

СЛАВНИН М. И. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ И ПЕРВИЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. 240 стр., ц. 13 руб. Госэнергоиздат.

Книга является пособием по вопросам электроснабжения промышленных предприятий. Рассматриваются электрические нагрузки, суточные и годовые графики, тарифы на электроэнергию, выбор напряжений и основные требования к электроснабжению промышленных предприятий. Подробно изложены вопросы надежности питания электрических нагрузок и выбор числа и мощности подстанций и их трансформаторов. Освещен вопрос повышения коэффициента мощности в промышленных установках. Содержание книги разбито на 6 глав: основные характеристики электрических нагрузок предприятия; определение основных параметров системы электроснабжения; источники электроснабжения; схемы питания и схемы коммутации промышленных подстанций 6—10 кВ; схемы питания и схемы коммутации промышленных подстанций 35 кВ; повышение коэффициента мощности промышленных предприятий. В книге разобрано значительное число примеров, поясняющих текст.

СНИЧЕРОВ Г. А. ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОРОТКОВОЛНОВОЙ КАТУШКИ. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 43). 26 стр. + вклейка, ц. 75 коп. Госэнергоиздат.

ТАРАСОВ Ф. И. ПРАКТИКА РАДИОМОНТАЖА. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 48 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Госэнергоиздат).

ТАРЕЕВ Б. М. ЛЕКЦИИ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ». Выпуск III. Электроизоляционные стекла. (Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт). 24 стр., бесплатно. Редакционно-издательский отдел ВЭИ.

ТЕМЕР И. Ю., ОШЕРОВ В. Е. СПРАВОЧНИК РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ. Под общей редакцией В. В. Ошерева. 371 стр. + вклейка, ц. 23 руб. Гостехиздат Украины.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭНЕРГЕТИКИ. Выпуск 3. (Академия наук Узбекской ССР. Институт энергетики). 149 стр., ц. 8 руб. Изд-во Академии наук УзССР.

Выпуск содержит статьи: Г. Р. Рахимов — «Символический метод расчета электрических цепей с несинусоидальными величинами»; М. Е. Сыркин — «Некоторые вопросы теории резонанса в многофазных цепях»; Х. Ф. Фазылов — «Методика расчета самостанавливающихся последовательных режимов в электроэнергетических системах»; А. В. Грехов — «Табличный метод решения систем дифференциальных уравнений и его применение к расчету электрических цепей»; М. Е. Сыркин и Э. Г. Фриштейн — «О выборе электрических машин по нагреву»; Г. А. Гриневич — «Расчет основных характеристик для ветроэнергетического кластера»; Г. А. Гриневич — «Свойства о типичных режимах повторяемости скоростей ветра по основным ландшафтным зонам Узбекистана».

УЛЬМИШЕК Л. Г. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ. Издание третье, заново переработанное. 444 стр., ц. 16 руб. Госэнергоиздат.

УЧЕБНО-НАГЛЯДНЫЕ ПОСОБИЯ. (Экспонаты 7-й всесоюзной заочной радиовыставки). (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 45). 50 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

ФИНК Д. ТЕХНИКА РАДИОЛОКАЦИИ. Часть I. Физические основы радиолокации. Перевод Н. Е. Сиротини под общей редакцией В. И. Шамшурова. 279 стр., ц. 9 руб. 40 коп. Военное изд-во.

ФРАНЦЕВИЧ И. Н., ХРУЩОВА Е. В., ФРАНК-ЗАБЛУДОВСКАЯ Т. Ф. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ПРОВОДОВ. (Академия наук УССР. Институт черной металлургии). 80 стр. + вклейка, ц. 5 руб. Изд-во Академии наук УССР.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ КАБЕЛЕЙ И КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ. Сборник статей под редакцией И. А. Сыромияникова. 384 стр., ц. 19 руб. Госэнергоиздат.

Сборник составлен по материалам научно-технической сессии по обобщению опыта эксплуатации кабелей и кабельных сетей проведенной Техническим отделом МЭС СССР совместно с МОНИТОЭ. Доклады на сессии С. М. Брагина «Перспективы развития высоковольтных электрических кабелей» и В. И. Погарского «Аварийность высоковольтных кабельных линий и методы борьбы с ней» уже были опубликованы в журнале «Электричество» (№ 1 1949 и № 10, 1948) и в настоящей сборник не вошли.

В сборник включены: резолюция сессии; доклады И. А. Сыромияникова «Задачи эксплуатации кабельных сетей и требования к Министерству электропромышленности», Б. М. Баранова «Опыт эксплуатации компенсированных кабельных сетей МКС Мосэнерго», Р. Я. Минкова «Опыт эксплуатации кабелей 35 кВ в сети Мосэнерго», Д. С. Пономарева «Эксплуатация кабельной сети 20—35 кВ Азэнерго», Д. И. Малиничева «Опыт эксплуатации высоковольтного 110 кВ кабеля в МКС Мосэнерго», Н. М. Жигулева «Технико-экономические показатели Московской кабельной сети и ее эксплуатационные характеристики», А. А. Колесникова «Опыт эксплуатации и блочных прокладок кабелей металлургического комбината», Е. И. Горина «Опыт эксплуатации туннельных прокладок кабелей», С. И. Домбровский «Опыт эксплуатации концевых заделок кабелей тяговой сети 825 В», В. И. Погарского «Старение и порча кабелей в условиях эксплуатации и меры для их предупреждения», С. С. Городецкое «Методы испытания и оценки качества высоковольтных кабелей с пропитанной бумажной изоляцией», Л. К. Ленского «Анализ методов отыскания повреждений в кабеле», С. Ф. Богомазова «Ремонтные работы и профилактические испытания кабелей в МКС Мосэнерго», А. А. Косовского «Анализ профилактических испытаний кабелей 35—6 кВ Ленинградской кабельной сети», А. С. Якунина «Методы определения мест повреждений в кабелях Московской кабельной сети», Л. И. Акифиева «Методы установления коррозионных зон городских территорий», В. С. Калмана «Защита силовых кабелей от коррозии электрическими средствами», Л. Б. Кротова «Опыт профилактических испытаний кабельной сети 825 В», В. И. Погарского «Исследование одной из причин импортированных кабелей», В. М. Блок «Выбор оптимальных сечений кабелей с учетом экономических показателей», С. С. Городецкое «Конструкции высоковольтных кабелей и перспективы их развития», А. И. Грачева «Заводские дефекты кабелей», Л. И. Мичерет «Борьба с браком и улучшение качества силовых кабелей», П. А. Умова «Прокладка кабелей 6—10 кВ с бумажной пропиткой изоляцией при низких температурах», Б. З. Рыскина «Прокладка кабельных линий в условиях крупного города с развитым подземным хозяйством», Н. С. Туманова «Прокладка и ремонт подводных силовых кабелей 35—6 кВ», И. А. Фридриха «Применение в эксплуатации МКС Мосэнерго конструкций кабельных муфт, их преимущества и недостатки», С. Т. Сохранского «О производстве кабельной арматуры», Е. А. Прошина «Новые виды сухих концевых заделок кабелей напряжением до 10 кВ», Д. В. Смирнова «Применение битумных составов и компаундов холодной заливки для кабельных муфт», а также сокращенные стенограммы выступлений делегатов сессии.



$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+3\left(\frac{P_1-P_2}{P_1+P_2}\right)^2}}$$

Примеры

1. Дано: $P_1 = 800$,
 $P_2 = 300$,
находим $\cos \varphi = 0,786$
2. Дано: $P_1 = 800$,
 $P_2 = -300$,
находим $\cos \varphi = 0,253$

