

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

на ежемесячный
научно-технический журнал

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Орган Академии наук СССР,
Министерства электростанций СССР и Министерства
электропромышленности СССР

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

Журнал широко освещает основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и электрификации народного хозяйства СССР.

Журнал „Электричество“ уделяет особое внимание вопросам внедрения новой передовой электротехники во всех отраслях народного хозяйства СССР.

В журнале освещаются новые научно-технические проблемы, связанные с величайшими сооружениями Сталинской эпохи — Куйбышевской и Сталинградской гэс, Главным Туркменским каналом и другими энергетическими строениями.

Журнал систематически освещает вопросы истории русской электротехники.

В журнале принимают участие виднейшие ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

Подписка на журнал „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ принимается во всех отделениях Союзпечати и во всех почтовых отделениях

12 номеров в год

(144 печатных листа)

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА:

12	месяцев	96	руб.
6	"	48	"
3	"	24	"

Годовым подписчикам на журнал будет выслан в качестве приложения карманный календарь-справочник на 1951 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1951

2

МИНИСТЕРСТВО ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Москва, Шлюзовая набережная, 10

ОТКРЫТА ПОДПИСКА

на **1951** год

НА МАССОВЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЖУРНАЛ

„РАБОЧИЙ ЭНЕРГЕТИК“

ОРГАН МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Журнал рассчитан на широкие круги рабочих-энергетиков: кочегаров, машинистов, механиков, электромонтеров, мастеров и техников, работающих на электростанциях, электрических и тепловых сетях, в промышленных предприятиях, строительстве и монтаже энергетических установок.

ЗАДАЧИ ЖУРНАЛА

Пропаганда новой энергетической техники. Освещение передового опыта работы стахановцев, бригад и смен. Обмен опытом (рационализация и изобретательство). Повышение квалификации рабочих-энергетиков.

Журнал будет иметь четыре основных раздела:

1. Стахановская практика и обмен опытом.
2. Повышение квалификации рабочих.
3. Техническая консультация.
4. Библиография.

ПОДПИСНАЯ ЦЕНА ЗА 9 НОМЕРОВ

(с апреля м-ца до конца 1951 г.) **18 руб.**

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ

городскими и районными отделениями Союзпечати, во всех конторах, отделениях и агентствах связи и общественными уполномоченными по подписке на предприятиях, в организациях и учреждениях.

Просьба вывесить на видном месте

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

СОДЕРЖАНИЕ

В. В. Гусев — К расчету переходных процессов в сетях при пофазном АПВ	3
Б. Л. Айзенберг — О рациональном построении городских электрических сетей	9
Д. Д. Зарин — Причины автоматического затухания ионизации в газонаполненных кабелях	13
М. М. Четверикова — Колебания в газоразрядных приборах	16
Л. А. Гельбух — Анализ работы индукционного реле направления мощности с цилиндрическим ротором при переходных процессах	21
В. Б. Кулаковский — Контроль влажности изоляции по методу „емкость — частота“	25
И. Д. Урусов и Г. И. Шур — Об экономичной конструкции вертикального гидрогенератора малой мощности	33
Е. Я. Казовский — Переходные процессы в электрических системах, содержащих вращающиеся машины переменного тока	33
Н. И. Штейн — Решение некоторых краевых задач электромагнитного поля на двумерных электрических моделях	50
С. Я. Дунаевский — Влияние вихревых токов на процесс установления потока	55
Л. А. Цейтлин — Расчет индуктивностей проводов способом численного интегрирования	63
М. Е. Сыркин — К исследованию фильтров последовательности	68
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
С. С. Иосифов — Короткозамкнутый асинхронный двигатель с вставными пусковыми стержнями	71
Л. М. Вильчур и Н. С. Казарян — О применении системы два провода — земля в горных условиях	76
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
М. О. Каменецкий — Н. М. Алексеев — пионер использования земли в качестве провода при передаче электроэнергии	79
СТАНДАРТЫ И НОРМЫ	
Б. А. Ягунов — Об основных принципах стандартизации графических условных обозначений в электрических схемах	80
ДИСКУССИИ	
К статьям К. Б. Карандеева „О классификации методов электрических измерений“ и Е. Г. Шрамкова „О классификации электроизмерительных приборов“ А. Д. Нестеренко, А. П. Козлова, А. П. Катенская	81
К статье Д. С. Лившица „Расчетные нагрузки электросетей“ Г. М. Каялов, Б. Н. Авилов-Карнаухов	84
К статье Л. И. Двоскина „Новая схема соединений для мощных электрических станций“ М. И. Славнин, Н. Н. Крачковский	86
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Исследование начальной стадии разряда при очень малых межэлектродных промежутках. Принципы построения промышленных приборов автоматического контроля и регулирования. Регулируемый электропривод ротационных печатных машин	87
ХРОНИКА	
Михаил Андреевич Шателен. К 85-летию со дня рождения и 60-летию научной, педагогической и общественной деятельности	90
БИБЛИОГРАФИЯ	
Книга А. Н. Мазнина, А. В. Нетушила и Е. П. Парини „Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников“	92
Э. Ф. Укстин, К. А. Любимов и Н. И. Венчугов — Книга И. И. Гроднева и Б. Ф. Миллера „Кабели связи“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	95



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, 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

К расчету переходных процессов в сетях при пофазном АПВ

Кандидат техн. наук, доц. В. В. ГУСЕВ

Харьковский политехнический институт им. Ленина

Для расчета большой переходных явлений в трехфазной сети вызванных включением и выключением однополюсного выключателя также возникновения и ликвидацией по-

вреждений, можно использовать метод симметричных составляющих. В 1940 г. был использован этот метод для аналитического определения восстанавливающегося напряжения свободной частоты на контактах выключателя 400 кВ при отключении [Л. 1]. В целях упрощения анализа, мы введем кроме тех ограничений, которые обычно принимаются в расчете токов короткого замыкания, еще следующие: 1) предварительные заряды на конденсаторах отключаются; 2) постоянная составляющая тока короткого замыкания и затухание периодической составляющей отсутствуют.

Рассмотрим схемы только с сосредоточенными и постоянными. Известно, что линии передачи без искажения могут быть заменены идеальным активным сопротивлением, равным волновому сопротивлению соответствующей последовательности, если переходные процессы анализируются за период, меньший времени двойного беге волны до ближайшего узла. Для промежутков времени линию передачи можно заменить П-образной схемой с параметрами, деленными из условий совпадения характеристики «полное сопротивление — частота» для этой и схем замещения на определенной полосе

Даны выражения операторного сопротивления для определения тока и напряжения при включении и выключении однополюсного выключателя в какой-либо точке трехфазной сети с шунтовыми и серийными повреждениями. В связи с применяемыми в энергосистемах однофазными отключениями приведенные соотношения могут быть использованы для расчетов коммутационных процессов, вызванных пофазным АПВ в трехфазных сетях.

частот [Л. 1]. Для упрощения задачи без внесения значительных ошибок можно принять, что переходные (операторные) проводимости прямой и обратной последовательности равны между собой.

Определим переходное (операторное) сопротивление между A и B провода фазы a при включенных однополюсных выключателях в фазах b и c и при наличии шунтовых и серийных повреждений в точке k (рис. 1).

Введем обозначения:

Y_1^k, Y_2^k, Y_0^k — комбинированные проводимости цепей последовательности при коротком замыкании в точке k , отнесенные к точке k ;

Y_1^m, Y_2^m, Y_0^m — такие же проводимости, отнесенные к точке m ;

$Y_{AB1}^m, Y_{AB2}^m, Y_{AB0}^m$ — отнесенные к точке m комбинированные последовательные проводимости цепей последовательностей для продольных э. д. с., действующих в точке m ;

$Y_{AB1}^k, Y_{AB2}^k, Y_{AB0}^k$ — такие же проводимости, отнесенные к точке k для продольных э. д. с., действующих в точке m .

Токи участка m могут быть выражены [Л. 2]:

$$\left. \begin{aligned} i_{a1}^m &= Y_{AB1}^m \dot{E}_{ABa1} - Y_1^m \dot{U}_{a1}^k, \\ i_{a2}^m &= Y_{AB2}^m \dot{E}_{ABa2} - Y_2^m \dot{U}_{a2}^k, \\ i_{a0}^m &= Y_{AB0}^m \dot{E}_{ABa0} - Y_0^m \dot{U}_{a0}^k. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Токи в точке короткого замыкания:

$$\left. \begin{aligned} i_{a1}^k &= Y_{AB1}^k \dot{E}_{ABa1} - Y_1^k \dot{U}_{a1}^k, \\ i_{a2}^k &= Y_{AB2}^k \dot{E}_{ABa2} - Y_2^k \dot{U}_{a2}^k, \\ i_{a0}^k &= Y_{AB0}^k \dot{E}_{ABa0} - Y_0^k \dot{U}_{a0}^k. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

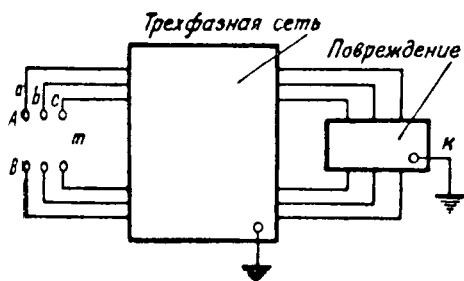


Рис. 1.

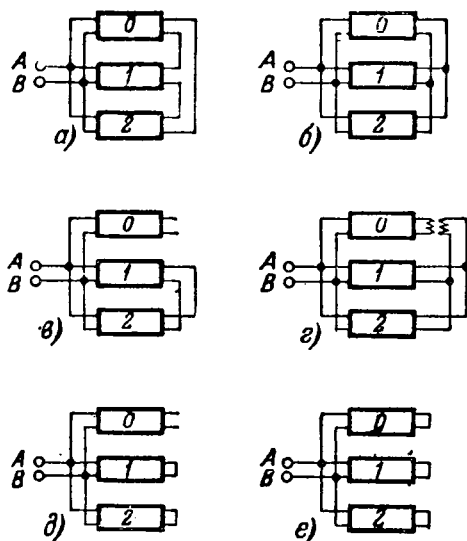


Рис. 2.

К этим шести уравнениям добавим: 1) уравнения, характеризующие повреждение; 2) уравнение разрыва одного провода в точке m , т. е.

$$E_{ABa1} = \dot{E}_{ABa2} = E_{ABa0} = \frac{1}{3} E_{ABa}.$$

Совместное решение всех этих уравнений дает зависимость

$$I_a^m = E_{ABa} \cdot Y_{ABa} = E_{ABa} \cdot \frac{1}{Z_{ABa}},$$

где Y_{ABa} выражается комбинацией проводимостей разных последовательностей. Заменяя в выражениях Y_{ABa} и Z_{ABa} $j\omega$ на оператор p , можно найти $Y_{ABa}(p)$ и $Z_{ABa}(p)$.

Ток переходного процесса при включении однополюсного выключателя в точке m определится из выражения

$$i_a^m(p) = Y_{ABa}(p) \cdot E_{ABa}(p). \quad (3)$$

Восстанавливающееся напряжение при отключении однополюсного выключателя найдем из

$$U_{ABa}^m(p) = Z_{ABa}(p) i_a^m(p). \quad (4)$$

На рис. 2 приведены эквивалентные схемы с четырехполюсниками цепей последовательно для определения переходной проводимости в наиболее простых случаях.

Для всех этих схем, составленных для случая установки выключателя в проводе фазы a в точке m , переходная проводимость может быть выражена:

$$Y_{ABa} = \frac{1}{3} [Y_{AB0}^m + 2Y_{AB1}^m - Y_\Delta]. \quad (4a)$$

Схема a соответствует случаю замыкания провода фазы a на землю в точке k или разрыва проводов фазы b и c в той же точке:

$$Y_\Delta = \frac{2(Y_0^m - Y_1^m)}{2Y_0^k + Y_1^k} (Y_{AB0}^k - Y_{AB1}^k).$$

Схема b — для случая замыкания проводов b на землю в точке k или разрыва провода фазы a в той же точке:

$$Y_\Delta = \frac{Y_0^m + 2Y_1^m}{Y_0^k + 2Y_1^k} (Y_{AB0}^k + 2Y_{AB1}^k).$$

Схема c — для случая замыкания проводов b и c в точке k :

$$Y_\Delta = \frac{2Y_1^m}{Y_1^k} \cdot Y_{AB1}^k.$$

Схема d — для случая замыкания проводов фаз b и c между собой и провода фазы a на землю в точке k .

Выражение для Y_Δ такое же, как и для случая a .

Схема e — для случая замыкания проводов фазы a , b и c в точке k :

$$Y_\Delta = 0.$$

Схема f — для случая замыкания проводов фазы a , b и c на землю в точке k :

$$Y_\Delta = 0.$$

Для случая установки выключателя в проводе фазы b в точке m переходная проводимость Y_{ABb} может быть выражена в общем виде же формулой (4a).

Ниже приводим значение Y_Δ для других типов повреждений:

1. Выключатель в проводе фазы b в точке m — однополюсное замыкание провода фазы a на землю в точке k или выключатель в проводе фазы a в точке m — разрыв проводов фаз b и c в точке k :

$$Y_\Delta = \frac{(2Y_{AB1}^k + Y_{AB0}^k) Y_1^m}{Y_1^k} - \frac{Y_{AB1}^k + 2Y_{AB0}^k}{Y_1^k + 2Y_0^k} \times \left(\frac{Y_0^k \cdot Y_1^m}{Y_1^k} - Y_0^m \right).$$

2. Выключатель в проводе фазы b в точке m — замыкание между проводами фазы b и c в точке k :

$$Y_\Delta = \frac{1}{2} Y_1^m \frac{Y_{AB1}^k}{Y_1^k}.$$

3. Выключатель в проводе фазы b в точке m — замыкание на землю проводов фаз b и c в точке k или выключатель в проводе фазы b в точке m — разрыв провода фазы b в точке k :

$$Y_\Delta = (Y_0^m - Y_1^m) \frac{Y_{AB0}^k - Y_{AB1}^k}{2Y_1^k + Y_0^k}.$$

4. Выключатель в проводе фазы b в точке m — замыкание проводов фаз b и c между собой и провода фазы a на землю в точке k :

$$Y_\Delta = \left(Y_0^m + \frac{1}{2} Y_1^m \right) \frac{(2Y_{AB0}^k + Y_{AB1}^k)}{Y_1^k + 2Y_0^k}.$$

Рассмотрим переходный процесс, вызванный отключением э. д. с. в провод одной фазы, когда одна фаза разомкнута и третья замкнута (при этом в точке k имеется шунтовое повреждение). В этом случае предварительный режим является шунтовым повреждением в точке k и серьезными повреждениями соответственно в точках m и n (рис. 3).

На предварительный режим налагается режим отключения E_{AB} в одном проводе в точке m . Для решения переходного сопротивления используются нижеприведенные системы уравнений.

Токи на участке m :

$$\left. \begin{aligned} i_{a1}^m &= Y_{AB1}^m (\dot{E}_{ABa1} - \dot{U}_{a1}^n) - Y_1^m \dot{U}_{a1}^k, \\ i_{a2}^m &= Y_{AB2}^m (\dot{E}_{ABa2} - \dot{U}_{a2}^n) - Y_2^m \dot{U}_{a2}^k, \\ i_{a0}^m &= Y_{AB0}^m (\dot{E}_{ABa0} - \dot{U}_{a0}^n) - Y_0^m \dot{U}_{a0}^k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

на участке k :

$$\left. \begin{aligned} i_{a1}^k &= Y_{AB1}^k (\dot{E}_{ABa1} - \dot{U}_{a1}^n) - Y_1^k \dot{U}_{a1}^k, \\ i_{a2}^k &= Y_{AB2}^k (\dot{E}_{ABa2} - \dot{U}_{a2}^n) - Y_2^k \dot{U}_{a2}^k, \\ i_{a0}^k &= Y_{AB0}^k (\dot{E}_{ABa0} - \dot{U}_{a0}^n) - Y_0^k \dot{U}_{a0}^k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Эти уравнения решаются совместно с уравнениями: 1) шунтового повреждения в точке k ; 2) серьезного повреждения в точке n ; 3) разрыва провода в точке m .

Совместное решение этих уравнений дает возможность найти зависимость $i^m = E_{AB} \cdot Y_{AB}$, где Y_{AB} выражается комбинацией проводимостей разных последовательностей. Заменив в выражении проводимости $j\omega$ на p , можно найти $Y(p)$ и $Z_{AB}(p)$.

Рассмотрим случай выключения однополюсного выключателя при разрыве одного провода шунтовым повреждением. Переходная проводимость или переходное сопротивление определяется, как и в предыдущем случае. Предварительный режим в данном случае будет режимом серьезного повреждения в точке n и шунтом в точке k . Из этого режима определяется значение установившегося тока i_{AB}^m . Налагаемый режим определяется разрывом одного провода в точке m .

Определим проводимость при замыкании провода на землю в точке k и разрыве провода в точке a в точке n .

Для случая включения и выключения однополюсного выключателя в фазе c комбинированная проводимость может быть определена в результате решений следующей системы уравнений: уравнений (5) и (6); 2) уравнений короткого замыкания в точке k :

$$i_{a0}^k = i_{a1}^k = i_{a2}^k \text{ и } \dot{U}_{a0}^k + \dot{U}_{a1}^k + \dot{U}_{a2}^k = 0;$$

3) уравнений последовательного повреждения фазы a в точке n :

$$\dot{U}_{a0}^n = \dot{U}_{a1}^n = \dot{U}_{a2}^n = \frac{1}{3} \dot{U}_a^n \text{ и } i_{a1}^n + i_{a2}^n + i_{a0}^n = 0.$$

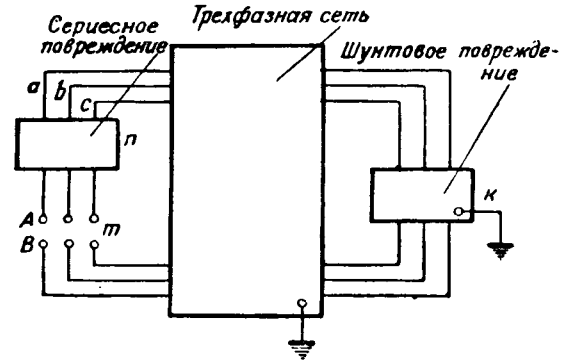


Рис. 3.

4) Уравнений для выключения (включения) выключателя в фазе c в точке m :

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ABa0} &= \frac{1}{3} \dot{E}_{ABC}; \quad \dot{E}_{ABa1} = \frac{1}{3} a^2 \dot{E}_{ABC}; \quad \dot{E}_{ABa2} = \\ &= \frac{1}{3} a \dot{E}_{ABC}. \end{aligned}$$

Проводимость для этого случая будет

$$\begin{aligned} Y_{ABC} &= \frac{1}{3} \left\{ Y_{AB0}^m + 2Y_{AB1}^m - \frac{Y_1^m}{Y_1^k} (2Y_{AB1}^k + Y_{AB0}^k) + \right. \\ &+ A \left[Y_{AB1}^m - Y_{AB0}^m - \frac{Y_1^m}{Y_1^k} (Y_{AB1}^k - Y_{AB0}^k) \right] + \\ &\left. + B \left(\frac{Y_1^m}{Y_1^k} Y_0^k - Y_0^m \right) \right\}; \end{aligned}$$

A и B определяются из соотношений:

$$\dot{U}_{a0}^n = \frac{1}{3} \dot{E}_{ABC} \cdot A \text{ и } \dot{U}_{a0}^k = \frac{1}{3} \dot{E}_{ABC} \cdot B,$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{(Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m)(2Y_0^k + Y_1^k) - (Y_{AB1}^k + 2Y_{AB0}^k)(Y_1^m - Y_0^m)}{2(Y_{AB1}^k - Y_{AB0}^k)(Y_1^m - Y_0^m) - (2Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m)(2Y_0^k + Y_1^k)}, \\ B &= \frac{2(Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m)(Y_{AB1}^k - Y_{AB0}^k) - (Y_{AB1}^k + 2Y_{AB0}^k)(2Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m)}{2(Y_1^m - Y_0^m)(Y_{AB1}^k - Y_{AB0}^k) - (2Y_0^k + Y_1^k)(2Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m)}. \end{aligned}$$

При совпадении точек m , n и k

$$Y_{ABC} = 0.$$

Для расчета переходного процесса при включении или выключении однополюсного выключателя (если в сети имеются два повреждения — два шунтовых, два серьезных или одно шунтовое и одно серьезное) необходимо предварительно определить E_{AB} и I_a из установившегося режима. Для определения этих величин используются обычными приемами метода симметричных составляющих.

Переходная проводимость при двух повреждениях может быть определена на основании решения нижеприведенных систем уравнений, аналогичных тем, которые составлялись для случая одного повреждения, совместно с уравнениями, определяющими два повреждения и разрыв цепи однополюсным выключателем.

Пусть короткое замыкание произошло в точках r и k . Однополюсный выключатель установлен в точке m . Тогда токи на участке m :

$$\left. \begin{aligned} i_{a1}^m &= Y_{AB1}^m \dot{E}_{AB1} - Y_{r1}^m \dot{U}_{a1}^r - Y_{k1}^m \dot{U}_{a1}^k, \\ i_{a2}^m &= Y_{AB2}^m \dot{E}_{AB2} - Y_{r2}^m \dot{U}_{a2}^r - Y_{k2}^m \dot{U}_{a2}^k, \\ i_{a0}^m &= Y_{AB0}^m \dot{E}_{AB0} - Y_{r0}^m \dot{U}_{a0}^r - Y_{k0}^m \dot{U}_{a0}^k. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Токи на участке r и k имеют такое же выражение, необходимо лишь в (7) индекс m заменить на r для токов на участке r и на k для токов на участке k . В случае, если в какой-либо точке или в двух точках произошли серийные повреждения, то проводимости и напряжения для этих точек являются продольными. В этом — отличие серийного повреждения от шунтового в указанных уравнениях.

Разумеется, приведенные уравнения справедливы и для частного случая, когда между точками r и k отсутствует электрическое расстояние.

Покажем на одном частном случае, как используются указанные системы уравнений для определения переходной проводимости. Рассмотрим замыкание провода фазы a на землю в точке k и разрыв провода фазы a в точке r .

Для случая включения и выключения однополюсного выключателя в фазе a комбинированная проводимость может быть найдена из решений следующей системы уравнений: 1) уравнений (7); 2) уравнений короткого замыкания в точке k :

$$i_{a1}^k = i_{a2}^k = i_{a0}^k \text{ и } \dot{U}_{a1}^k + \dot{U}_{a2}^k + \dot{U}_{a0}^k = 0;$$

3) уравнений серийного повреждения провода фазы a в точке r :

$$i_{a1}^r + i_{a2}^r + i_{a0}^r = 0 \text{ и } \dot{U}_{a1}^r = \dot{U}_{a2}^r = \dot{U}_{a0}^r;$$

4) уравнений для разрыва провода фазы a однополюсным выключателем в точке m :

$$\dot{E}_{ABa1} = \dot{E}_{ABa2} = \dot{E}_{ABa0} = \frac{1}{3} \dot{E}_{ABa}.$$

Комбинированная проводимость для этого случая будет

$$Y_{ABa} = \frac{1}{3} \left[2Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m - (2Y_{r1}^m + Y_{r0}^m) \frac{Y_{AB0}^k - Y_{AB1}^k}{Y_{r0}^k - Y_{r1}^k} - (2Y_{r1}^m + Y_{r0}^m) \frac{\frac{1}{2} Y_{k1}^k - Y_{k0}^k}{Y_{r0}^k - Y_{r1}^k} \cdot A + (2Y_{k1}^m - Y_{k0}^m) \cdot A \right],$$

где A определится из соотношения $\dot{U}_{a0}^k = A \cdot \frac{1}{3} \dot{E}_{ABa}$:

$$A = \frac{(2Y_{r1}^r + Y_{r0}^r)(Y_{r0}^k - Y_{r1}^k) - (2Y_{r1}^r + Y_{r0}^r)(Y_{AB0}^k - Y_{AB1}^k)}{(2Y_{r1}^r + Y_{r0}^r) \left(\frac{1}{2} Y_{k1}^k + Y_{k0}^k \right) - (Y_{k1}^r - Y_{k0}^r)(Y_{r0}^k - Y_{r1}^k)}.$$

Для некоторых случаев двойных шунтовых повреждений на рис. 4 приведены эквивалентные схемы, состоящие из цепей разных последовательностей. Этими схемами предусматривается

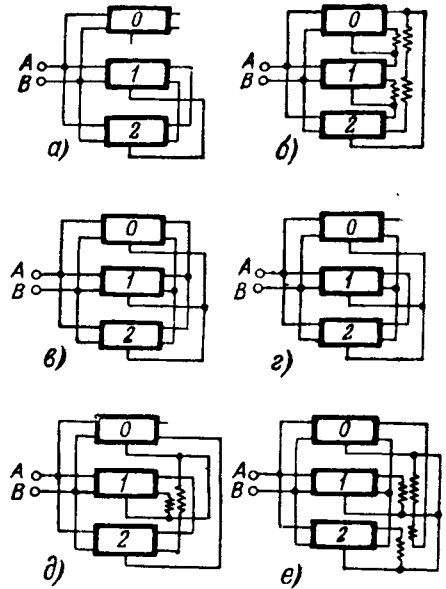


Рис. 4.

разрыв однополюсным выключателем про фазы a в точке m . Схемы соответствуют следующим случаям: а) замыкание проводов b и c в точках r и k ; б) замыкание про фазы a на землю в точках r и k ; в) замыкание проводов фаз b и c на землю в точках r и k ; г) замыкание проводов фаз b и c на землю в точке r и замыкание проводов фаз b и c на землю в точке k ; д) замыкание проводов фаз b и c в точке r и замыкание провода фазы a на землю в точке k ; е) замыкание провода фазы a на землю в точке r и замыкание на землю проводов фаз b и c в точке k [Л. 4].

1-й пример. Определим восстанавливающееся напряжение свободной частоты на замах A и B однополюсного выключателя, установленного в точке m фазы a , как показано на рис. 5.

Пользуясь приведенными схемами, находим

$$Z_{AB0}^k = Z_{AB0}^m = \frac{1}{Y_{AB0}^k} = \frac{1}{Y_{AB0}^m} = \frac{pL_0}{1 + p^2 L_0 c_1},$$

$$Z_1^m = \frac{1}{Y_1^m} = \frac{pL_1}{1 + p^2 L_1 c_1},$$

$$Z_0^m = \frac{1}{Y_0^m} = \frac{pL_0}{1 + p^2 L_0 c_1}.$$

Подставляем значение найденных проводимостей в выражение для Y_{ABa} , выведенное ранее,

$$Y_{ABa} = \frac{1}{3} \left[2Y_{AB1}^m + Y_{AB0}^m + 2 \frac{Y_{AB1}^k - Y_{AB0}^k}{Y_1^k + 2Y_0^k} (Y_0^m - Y_1^m) \right]$$

и после преобразований получим переходное сопротивление между точками A и B :

$$Z_{ABa}(p) = \frac{1}{Y_{ABa}(p)} = \frac{p^3 L_1 L_0 (c_1 + c_2) + \frac{1}{3} p (L_0 + 2L_1)}{p^4 L_0 L_0 c_1 (c_1 + c_2) + \frac{1}{3} p^2 (c_1 + c_2) (L_1 + 2L_0) + \frac{1}{3} p^2 c_1 (L_0 + 2L_1)}$$

Далее, пользуясь обычной схемой соединения цепей последовательностей для данного типа короткого замыкания, определим эффективное значение установившегося тока замыкания на шину, протекающего через участок m в фазе a , учетом включенных шунтом емкостей

$$i_{a(I)}^m = i_{a1(I)}^m + i_{a2(I)}^m + i_{a0(I)}^m.$$

Мгновенное значение этого установившегося тока может быть определено из соотношения

$$i_{a(I)}^m = I_{a(I)\text{макс}}^m \sin \omega t,$$

куда

$$i_{a(I)}^m(p) = I_{a(I)\text{макс}}^m \cdot \frac{p}{p - j\omega}.$$

Следовательно, операторное выражение восстанавливающегося напряжения на контактах $A-B$ будет иметь вид:

$$U_{ABa}(p) = Z_{ABa}(p) \cdot i_{a(I)}(p).$$

В случае, если бы для приведенной схемы было необходимо определить переходный ток при включении того же выключателя, он может быть найден из соотношения

$$i_a^m(p) = \frac{1}{Z_{ABa}(p)} \cdot E_{ABa}(p),$$

где $Z_{ABa}(p)$ будет иметь такое же значение, как для процесса выключения. Для определения $i_a^m(p)$ надо найти эффективное значение напряжения установившегося режима на зажимах $A-B$ $E_{ABa(I)}$ при наличии замыкания на землю провода фазы a в точке k (шунтовое повреждение) и разрыва провода фазы a в точке m (серийное повреждение), пользуясь методом симметричных составляющих. Мгновенное значение той э. д. с. может быть определено из соотношения

$$e_{ABa(I)} = E_{ABa(I)\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi),$$

куда

$$E_{ABa}(p) = E_{ABa(I)\text{макс}} \cdot \frac{p}{p - j\omega} e^{j\varphi}.$$

где φ определяет момент включения напряжения на $A-B$.

На схеме рассмотренного примера показана обмотка трансформатора, нулевая точка которой заземлена через дугогасящую катушку с индуктивностью L_{00} . Междувитковой емкостью трансформаторов при расчете большой группы коммутационных процессов пренебрегают. Предположено, что выключатель, показанный на схеме, установлен между трансформатором и сборными шинами подстанции и линии высокого напряжения отключены. Индуктивностью проводов и емкостью между проводами мы пренебрегли. Трансформаторы присоединены на шины бесконечной мощности генераторного напряжения.

Если линии будут включены, их можно учесть образными схемами замещения, если для анализа переходных процессов нельзя пренебречь

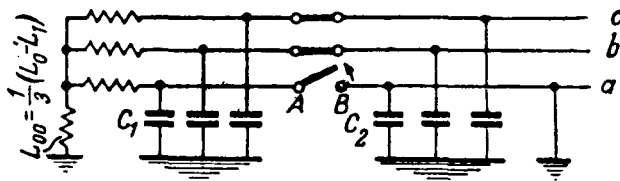


Рис. 5.

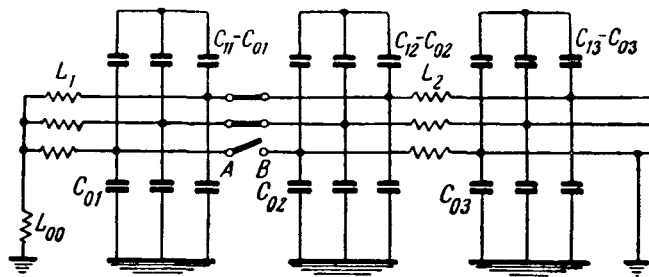


Рис. 6.

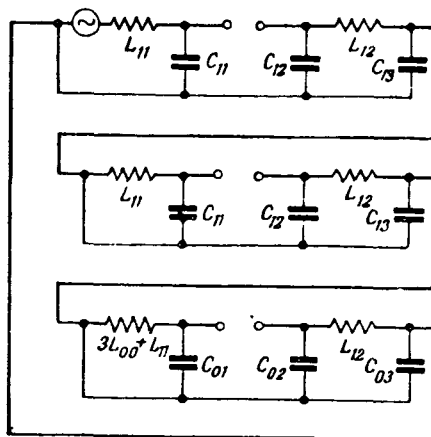


Рис. 7.

отражением волн от узлов. Тогда расчетная схема будет иметь вид, изображенный на рис. 6. В ней учитываются емкости между проводами.

Схема соединения цепей последовательности для этого случая приведена на рис. 7. Эту последнюю схему можно представить в виде соединенных между собой трех четырехполюсников: прямой, обратной и нулевой последовательности.

2-й пример. Рассмотрим случай, когда линия передачи может быть замещена волновым сопротивлением (рис. 8). На шины неограниченной мощности генераторного напряжения присоединены трансформаторы общее индуктивное сопротивление которых $L_1 = 0,0319$ гн. К шинам 110 кВ присоединена линия передачи с волновым сопротивлением $Z = 500$ ом. Емкость шин втулок и обмоток 110 кВ $c_1 = 0,02 \cdot 10^{-6}$ ф. Определим напряжение на контактах $A-B$ выключателя при отключении однополюсного замыкания на землю. Нулевая точка обмотки трансформатора глухо заземлена. В этом случае цепи прямой, обратной и нулевой последовательности будут иметь одинаковую схему (рис. 9).

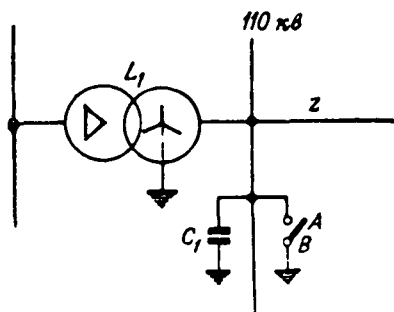


Рис. 8.

Полное переходное сопротивление между контактами $A-B$ определяем непосредственно по схеме:

$$Z(p) = \frac{3pL_1}{p^2L_1C_1 + p\frac{L_1}{Z} + 1}.$$

Ток, протекающий через $A-B$,

$$i(t) = \frac{1}{3} \cdot \frac{E_m}{\omega L} \sin \omega t.$$

Для определения восстанавливающегося напряжения за отрезок времени 100—200 мксек можно принять:

$$i(t) = \frac{1}{3} \cdot \frac{E_m}{\omega L} \omega t \div \frac{1}{3} \frac{E_m}{pL}.$$

Тогда

$$v(p) = Z(p) \cdot i(p) = E_m \frac{1}{L_1C_1 \left(p^2 + \frac{p}{ZC_1} + \frac{1}{L_1C_1} \right)}.$$

Решением этого дифференциального уравнения будет:

$$v = E_m (1 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}),$$

где p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения,

$$A_1 = \frac{1}{L_1C_1 \left(2p_1^2 + \frac{p_1}{ZC_1} \right)} \text{ и } A_2 = \frac{1}{L_1C_1 \left(2p_2^2 + \frac{p_2}{ZC_1} \right)}.$$

После подстановки числовых значений величин получим:

$$v = E_m (1 + 0,32e^{-80500t} - 1,32e^{-19500t}).$$

Можно принять:

$$E_m = \frac{\sqrt{2} \cdot 110000}{\sqrt{3}} = 90000 \text{ в.}$$

Для более точных расчетов целесообразно в цепях прямой и обратной последовательности предусматривать волновое сопротивление, отличное от волнового сопротивления в цепи нулевой последовательности, т. е. принять:

$$Z_1 = Z_2 = \sqrt{\frac{L_{11}}{C_{11}}} \text{ и } Z_0 = \sqrt{\frac{L_{01}}{C_{01}}}.$$

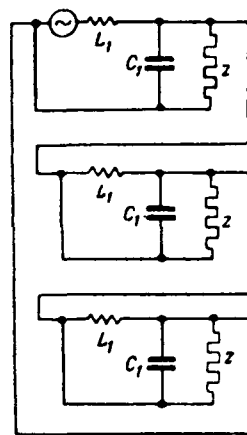


Рис. 9.

Следует отметить, что при расчете переходных процессов при включении и выключении цепей генераторного напряжения, содержащих синхронные генераторы, необходимо более точно учитывать электромагнитные процессы, происходящие в машинах, и распределенный характер параметров обмоток машин. Весьма сложный вопрос о применении метода симметричных составляющих для точных расчетов переходных процессов в таких цепях должен быть рассмотрен в отдельной работе.

Рассмотренные формулы переходных сопротивлений, расчетные схемы соединений цепей разных последовательностей, обобщенные схемы с многополюсниками, приведенные системы уравнений дают возможность с помощью метода симметричных составляющих решать задачи переходных процессов при включении и выключении однополюсного выключателя при любом коммутационном состоянии выключателей в двух других фазах и при наличии повреждений в одной или двух точках сети. Таким образом, пользуясь рассмотренной методикой, можно сделать расчет основной группы коммутационных переходных процессов, которые могут иметь место при пофазном автоматическом повторном включении линий электропередачи.

Литература

1. В. В. Гусев. Расчет восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя 400 кВ. Отчет. ХЭТИ, 1940.
2. Н. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания соковольных систем. ОНТИ, 1935.
3. В. В. Гусев. Методика расчетов коммутационных переходных процессов в трехфазных сетях. О. ХЭТИ, 1947.
4. W. L. Lyon. Applications of the Method of Symmetrical Components. Mc Gray Hill Book, 1937.

[2.10]



О рациональном построении городских электрических сетей

Кандидат техн. наук Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ

Ленинградский инженерно-экономический институт им. Молотова

Вопросами, определяющими технико-экономические показатели и эксплуатационные качества проектируемой электрической сети, являются: 1) определение расчетных нагрузок; 2) выбор расчетной потери напряжения; 3) выбор напряжения; 4) определение наиболее выгоднейшей потребляемой мощности и числа сетевых трансформаторных пунктов; 5) выбор схемы сети.

Методика определения электрических нагрузок рассмотрена автором в 1948 г. [Л. 1]. По данным обследования, проведенного в конце 1949 г., удельная нагрузка на 1954—1955 гг. может быть принята равной 10 вт на 1 м² оплачиваемой жилой площади при отсутствии бытовой газификации, 7 вт на 1 м² оплачиваемой жилой площади при наличии газификации и 10 вт на 1 м² оплачиваемой нежилой площади.

При проектировании городских электрических сетей, работающих по разомкнутой схеме, выбор расчетной потери напряжения имеет решающее значение, так как именно расчетом по допустимой потере напряжения определяется сечение токоведущих жил кабелей и проводов воздушной линии. Однако современные электрические сети проектируются с расчетом на двустороннее питание каждой магистрали. При таком наиболее рациональном построении сети сечение проводов, определенное по допустимой плотности рабочего тока при аварийном режиме, может оказаться больше сечения, определенного по допустимой потере напряжения.

Для сравнения сечений кабеля или провода магистрали, определяемых разными методами, будем исходить из выражения, которым пользуются для определения сечения по допустимой потере напряжения,

$$S_1 = \frac{P_{\text{ж}} \cdot l}{\gamma \cdot U^2 \cdot \Delta U\%}, \quad (1)$$

Приводится анализ различных методов расчета сечений проводов городской электрической сети низкого напряжения и признается необходимым рассчитывать современные электросети низкого напряжения с двусторонним питанием магистралей по допустимой плотности тока при аварийном режиме работы сети. Приводится новая упрощенная формула для определения оптимальной нагрузки сетевого трансформаторного пункта. В качестве наиболее приемлемой для городских электросетей низкого напряжения предлагается схема замкнутой сети без сетевых автоматов.

Статья печатается в порядке обсуждения.

а также из эмпирической формулы для определения сечения по допустимой плотности тока при аварийном режиме

$$S_2 = 0,00082 \cdot l^2 = \frac{0,00082 \cdot P_{\text{ж}}^2 \cdot 10^6}{3U^2}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)

$P_{\text{ж}}$ — нагрузка магистрали, а l — ее длина. Распределение нагрузки по длине магистрали принято равномерным.

При совпадении значений сечения кабелей и проводов, полученных в результате обоих методов расчета, должно иметь место равенство $S_1 = S_2$. Таким образом, для медных проводов

$$\frac{P_{\text{ж}} \cdot l \cdot 10^5}{8 \cdot 57 \cdot U^2 \cdot \Delta U\%} = \frac{0,00082 \cdot 10^6}{3} \cdot \frac{P_{\text{ж}}^2}{U^2},$$

откуда

$$\frac{P_{\text{ж}} \cdot \Delta U\%}{l} = D \cdot \Delta U\% = 0,8, \quad (3)$$

где D — удельная погонная плотность нагрузки (квт/м).

Подставляя в выражение (3) разные значения погонной плотности нагрузки получим табл. 1.

Данные табл. 1 показывают, что в городских сетях напряжением 220/127 в при двустороннем питании каждой магистрали, при погонных плотностях нагрузки от 0,250 до 0,500 квт/м сечения проводов и кабелей должны определяться по допустимой плотности рабочего тока при аварийном режиме, при погонных плотностях нагрузки от 0,050 до 0,150 квт/м — по допустимой потере напряжения, при погонных плотностях нагрузки, равной 0,200 и 0,025 квт/м, оба метода расчета дают совпадающие результаты. В городских сетях напряжением 380/220 в диапазон погонных плотностей, при которых сечение должно определяться по допустимой потере напряжения, еще более ограничен и лежит в пределах 0,075 ÷ 0,150 квт/м.

Таблица 1

Удельная погонная плотность нагрузки, кВт/м	Значение $\Delta U, \%$		Способ выполнения сети	Результаты сопоставления сечений	
	отвечающее равенству $s_1 = s_2$	отвечающее практике проектирования		при 380/220 в	при 220/127 в
0,500	1,6	3	Кабельная	$s_1 < s_2$	$s_1 < s_2$
0,400	2,0	3	Кабельная	$s_1 < s_2$	$s_1 < s_2$
0,300	2,7	3,5	Кабельная	$s_1 < s_2$	$s_1 < s_2$
0,200	4,0	4,0	Кабельная	$s_1 = s_2$	$s_1 = s_2$
0,100	8,0	4,0	Кабельная	$s_1 > s_2$	$s_1 > s_2$
0,050	16,0	4,5	Кабельная	$s_1 > s_2$	$s_1 > s_2$
0,050	16,0	4,5	Воздушная	$s_1 \approx s_2$	$s_1 > s_2$
0,025	32,0	5,0	Воздушная	$s_1 = s_2$	$s_1 = s_2$

Следовательно, вопрос о регламентировании допустимой величины расчетной потери напряжения при проектировании городских сетей низкого напряжения перестает играть решающее значение. В тех отдельных случаях, когда выбор сечения все же должен определяться по допустимой потере напряжения, следует пользоваться данными табл. 3 «Руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока».

Интересно выяснить, в какой мере сечения кабелей и проводов, получаемые по допустимой плотности тока при аварийном режиме, отвечают условиям выбора сечения по экономической плотности тока, рекомендуемой Министерством электростанций.

Экономическая плотность тока при равномерно распределенной нагрузке должна быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при нагрузке, сосредоточенной на конце линии. Если экономическая плотность тока при нагрузке, сосредоточенной на конце линии, при $T < 3000$ час для медных проводов равна $2,5 \text{ а/мм}^2$ [Л. 2], то при распределенной нагрузке она составит $4,3 \text{ а/мм}^2$.

В табл. 2 приведены допустимые плотности тока для разных сечений кабелей и проводов при нормальном режиме работы сети. Они в два раза меньше расчетных плотностей рабочего тока при аварийном режиме сети.

Таблица 2

Сечение $s, \text{мм}^2$	Четырехжильный подземный кабель сечением, мм^2 :					Воздушная сеть сечением, мм^2 :			
	25	35	50	70	95	10	16	25	35
Допустимая плотность тока при нормальном режиме работы сети, а/мм^2	3	2,5	2,15	1,9	1,63	5,4	4,7	4,1	3,85

Как видно из табл. 2, допустимая плотность тока в кабельных и воздушных магистралях го-

родской сети низкого напряжения почти всегда ниже экономической плотности тока, рекомендуемой МЭС. Таким образом, выбор сечения проводов по экономической плотности тока, рекомендуемой в настоящее время, не может быть принят в качестве метода расчета сети.

Более 10 лет назад, после длительной дискуссии, для городской электросети было принято напряжение 380/220 в. Затем А. А. Глазун выдвинул предложение [Л. 3], восстанавливающее аргументацию В. М. Хрущева в пользу напряжения 220/127 в. Как известно, все доводы В. М. Хрущева основывались на том, что лампы накаливания 220 в по сравнению с лампами 127 в имеют больший удельный расход электроэнергии на единицу светового потока. В. М. Хрущев принимал эту разницу в 15%, А. А. Глазун принимает ее в 20%, а некоторые авторы всего в 5—10%.

В жилых квартирах мощность ламп не определяется свето-техническими расчетами, а осветительная арматура является нестандартной большей частью нерационально установленной. При таком положении разница в освещенности на 15% вряд ли может быть обнаружена. В то же время в существующих сильно перегруженных электросетях переход на более высокое напряжение снижает потери напряжения и улучшает качество электроэнергии.

Отмеченное увеличение расхода электроэнергии на 15% можно не принимать в расчет и при проектировании новых электросетей. Электропотребление жилых квартир при отсутствии бытовой газификации обусловлено главным образом (на 40—60%) нагревательными приборами, а не освещением. Внедрение же люминесцентных ламп еще более снизит расход электроэнергии на освещение. Мощность, потребляемая учреждениями, учебными и лечебными заведениями, торговыми и зрелищными предприятиями, установками которых выполняются по проектам и светотехническим расчетам, сравнительно невелика и в момент максимума нагрузки составляет не более 15—20% мощности, потребляемой жилыми домами. Повышение ее на 15% соответствует повышению нагрузки сети не более чем на 3%, т. е. находится в пределах точности расчетов электрических нагрузок сети. Между тем, экономия меди при сооружении сети 380/220 в по сравнению с сетью 220/127 в в масштабе Союза ССР составляет значительную величину.

Таким образом, можно прийти к выводу, что регламентированный выбор напряжения в 380/220 в для всех новых городских электрических сетей является вполне правильным и не требует пересмотра.

Вопрос выбора наивыгоднейшей величины потребляемой мощности был предметом дискуссии на протяжении ряда лет. Детальный анализ формул Зенгеля, Хрущева и трех авторов [Л. 4] показал преимущество формулы последних, которая дает не только наивыгоднейшую мощность, но и оптимальную конфигурацию сети. Эта формула рекомендована «Руководящими указаниями по

проектированию городских электрических сетей трехфазного тока».

Необходимость производить расчет сечения проводов современных городских сетей, имеющих двухстороннее питание магистралей, не на допускаемую потерю напряжения, а на допускаемую плотность рабочего тока при аварийном режиме, привела к разработке новой формулы для определения оптимальной потребляемой мощности сетевого трансформаторного пункта. Такая формула была разработана автором [Л. 5] и имеет вид:

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{S_1 D U^2 n_2^2}{2 \cdot 200 \cdot S_2}}, \quad (4)$$

где P_m — наивыгоднейшая нагрузка трансформаторного пункта в kva ;

S_1 — часть стоимости трансформаторного пункта, не зависящая от мощности трансформатора, в рублях;

S_2 — часть стоимости кабеля или провода сети низкого напряжения, зависящая от сечения, в рублях на 1 м длины сети и на 1 мм^2 площади поперечного сечения;

U — линейное напряжение сети в в ;

D — удельная погонная плотность нагрузки в kвт на 1 м длины сети;

n_2 — число соседних трансформаторных пунктов, связанных с данным пунктом магистралями низкого напряжения.

Можно предложить дальнейшее упрощение

формулы. Действительно, отношение $S_1 \frac{n_2^2}{S_2}$ является почти постоянной величиной. Для трансформаторных пунктов больших городов $S_1 \approx 30\,000$ руб., $S_2 = 0,37$, n_2 может быть принято

равным 2, тогда $\frac{S_1 n_2^2}{S_2} = 325\,000$. Для малых городов и малооживленных районов больших городов S_1 составляет 8 000—10 000 руб. В этом случае сеть низкого напряжения выполняется воздушной, т. е. $S_2 = 0,23$, а n_2 может быть

принято равным 3; тогда $\frac{S_1 n_2^2}{S_2} = \frac{9\,000 \cdot 3^2}{0,23} = 352\,000$.

Как обе эти величины находятся под знаком куба третьей степени, разница в конечных результатах почти отсутствует. Таким образом, для определения наивыгоднейшей нагрузки сетевого трансформаторного пункта городской электрической сети напряжением 380/220 в можно пользоваться формулой

$$P_m = 285 \cdot \sqrt[3]{D}. \quad (5)$$

Для сети напряжением 220/127 в эта формула примет вид:

$$P_m = 200 \cdot \sqrt[3]{D}. \quad (6)$$

Результаты расчета по формуле (5) и по формуле трех авторов [Л. 4] приведены на рис. 1).

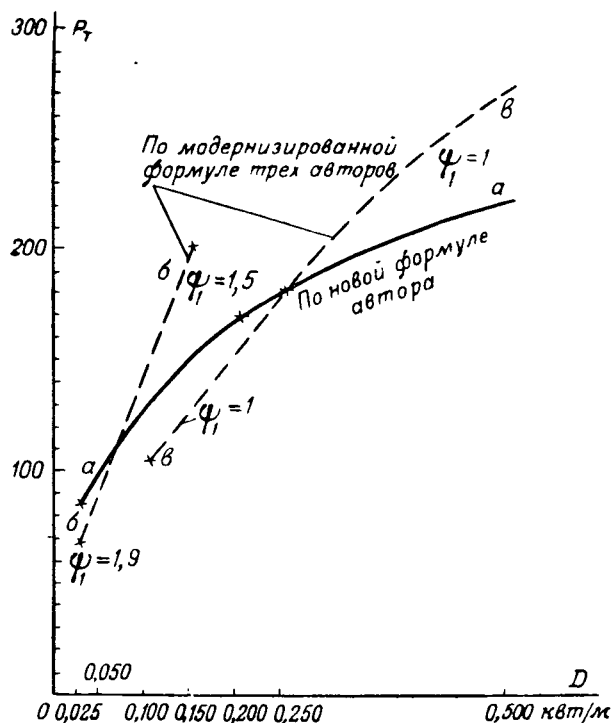


Рис. 1.

Как видно из сравнения результатов расчета, при погонных плотностях нагрузки от 0,200 kвт/м и более, при которых применение формулы (5) более правильно ($s_1 < s_2$), значения P_m , определенные по формуле трех авторов, выше значений, определенных по формуле (5), причем расхождение при $D \geq 0,500 \text{ квт/м}$ составляет порядка 20%, а при D от 0,200 до 0,250 kвт/м значения P_m , определенные по обеим формулам, почти совпадают. При погонной плотности нагрузки, меньшей 0,200 kвт/м , значения P_m , определенные по формуле (5), лежат между двумя значениями P_m , определенными по формуле трех авторов при $\psi = 1$ и при $\psi = 1,5$. Выбор того или иного из этих двух значений P_m , иначе говоря, выбор двухлучевой или четырехлучевой конфигурации сети, определяется не только значением плотности нагрузки, но и величиной кварталов города. Поэтому в промежутке от $D = 0,100$ до $D = 0,150$ значение P_m , определенное по формуле трех авторов, может лежать при одних условиях на кривой $бб$, а при других — на кривой $вв$. В этом диапазоне значений D наивыгоднейшую нагрузку трансформаторного пункта правильнее выбирать по формуле трех авторов. При значениях D , меньших 0,100 kвт/м , обе формулы неточны, так как сечение проводов выбирается по условиям механической прочности.

Вопрос о том, какими расчетными формулами необходимо пользоваться при определении P_m , можно решить, обратившись к кривым рис. 2. Как видно из этих кривых, при больших погонных плотностях нагрузки отступление от оптимального значения P_m приводит к гораздо

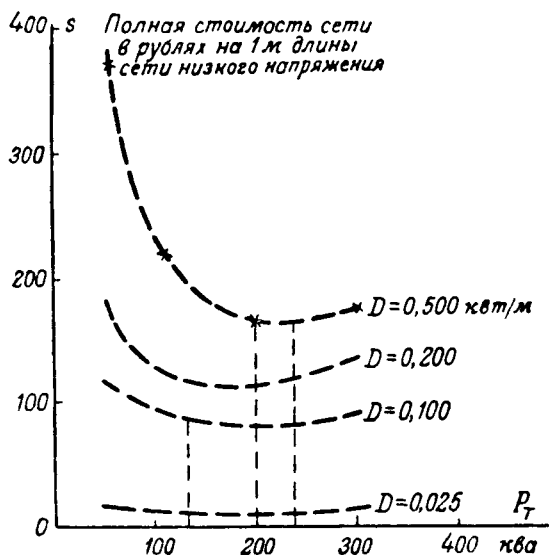


Рис. 2.

большому перерасходу средств на сооружение сети, чем при небольших плотностях. Следовательно, пользование формулой (5), дающей более точный результат при больших значениях D , несомненно, предпочтительнее. Кроме того, формула (5) наиболее удобна для практического применения.

Вопрос о выборе схемы городской сети низкого напряжения неоднократно рассматривался в печати. Несомненные преимущества замкнутых электрических сетей (меньшие потери электрической энергии, лучший режим напряжения, более высокая надежность и бесперебойность электроснабжения) никогда не оспаривались. В наших условиях может быть реально осуществлена замкнутая сеть без сетевых автоматов, защита которой выполнена предохранителями с плавкими вставками селективной системы [Л. 5]. Эта схема, осуществленная на одном из участков электросети в Ленинграде, при испытаниях и в условиях опытной эксплуатации показала себя вполне удовлетворительно. По этой схеме выполняются электросети всех новых жилых застроек Ленинграда.

Замкнутая сеть без сетевых автоматов в статье А. А. Глазунова [Л. 3] названа ограниченно замкнутой и область ее применения ограничена без какой-либо мотивировки малыми и средними городами.

Схема замкнутой сети без сетевых автоматов может быть осуществлена при любом числе параллельно включенных сетевых трансформаторов. На опытном участке сети в Ленинграде, бесперебойно проработавшем более года, были включены параллельно 10 трансформаторов, питаемых 7 кабелями 6 кв. Опыт эксплуатации этого участка показывает, что чем больше число кабелей 6 кв, питающих замкнутую сеть, тем больше связей низкого напряжения между сетевыми трансформаторами, тем надежнее работа селективной системы предохранителей.

Построение сети среднего напряжения (6 или 10 кв) при замкнутой сети низкого напряжения

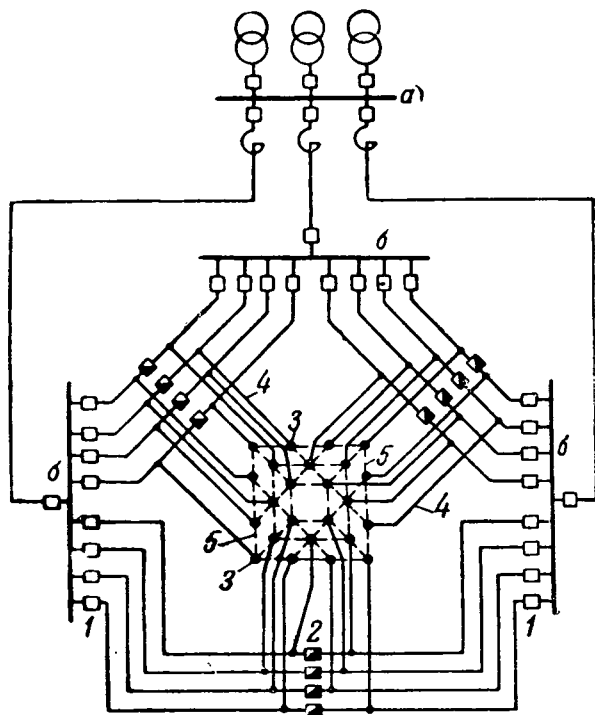


Рис. 3. Рациональная схема построения городской электрической сети.

(Заводка кабелей 6 или 10 кв в трансформаторные пункты условно врезана отпайкой)

а — шины 6 или 10 кв районной подстанции; б — распределительные пункты 6 или 10 кв.
1 — масляные выключатели; 2 — предохранители типа ПК; 3 — сетевые трансформаторные пункты; 4 — кабели 6 или 10 кв; 5 — замкнутая сеть низкого напряжения без сетевых автоматов.

показано на рис. 3. В условиях нормальной работы при загрузке каждой из питающих линий одна $2/3$, резервных линий не требуется. В случае повреждения какой-либо из питающих линий ее нагрузка переходит на две другие через распределительную сеть среднего напряжения и замкнутую сеть низкого напряжения. Величина тока короткого замыкания на шинах распределительных пунктов б ниже, чем при параллельной работе на эти шины двух питающих линий, так как предохранители ПК являются токоограничивающими. Потери электроэнергии в сети ниже, чем при обычной петлевой схеме распределительной сети среднего напряжения [Л. 6]. Такая схема имеет все основания для применения ее в центральных районах больших городов, в многоэтажных зданиях (вертикальная сетка), а также в сетях промышленных предприятий, производственный процесс которых требует высокой степени бесперебойности электроснабжения.

Высказанное А. А. Глазуновым мнение о необходимости внедрения замкнутых сетей правильно и своевременно. Для осуществления этой задачи необходимо включить в планы работ проектных организаций выполнение проектов городских сетей по замкнутой схеме без сетевых автоматов; приступить к массовому заводскому изготовлению плавких вставок для предохранителей открытого типа, применяемых в городских электрических сетях; разработать плавкие вставки для предохранителей закрытого типа (ПР-1, КП, НПН и НПР).

Выводы. 1. Современные городские электрические сети наиболее целесообразно строить по замкнутой схеме без сетевых автоматов, с защитой сетей низкого напряжения плавкими предохранителями, вставки которых должны создавать селективную систему.

2. Расчет сечения проводов современной сети низкого напряжения с двусторонним питанием магистралей следует производить по допускаемой плотности рабочего тока при аварийном режиме работы сети, с проверкой полученного таким образом результата по допустимой потере напряжения при нормальном режиме. Величина допустимой потери напряжения от шин низкого напряжения сетевого пункта до домового ввода может быть принята равной 3,5—4% при погонной плотности нагрузки более 0,250 квт/м, 4% при погонной плотности нагрузки 0,050÷0,250 квт/м и 5% при погонной плотности нагрузки, меньшей 0,050 квт/м.

3. Выбор наивыгоднейшей потребляемой мощности сетевого трансформаторного пункта следует производить по формуле (5) для любых сетей с двусторонним питанием магистралей.

4. Электрические сети следует проектировать на напряжении 380/220 в; на это же напряжение следует переводить существующие сети 220/127 в.

5. Министерству электростанций и министерствам коммунального хозяйства союзных республик следовало бы осуществить рекомендуемое Первой всесоюзной научно-технической сессией по городским электрическим сетям систематические исследования электрических нагрузок в городских сетях низкого напряжения с опубликованием результатов обследований.

Литература

1. Б. Л. Айзенберг. Электрические нагрузки городской сети общего пользования. Электрические станции, № 12, 1948.

2. Правила устройства электротехнических установок сильного тока. Указания по проектированию электрических систем. Госэнергоиздат, 1947.

3. А. А. Глазунов. Пути технического развития и реконструкции электрических сетей больших городов. Электричество, № 10, 1949.

4. Б. Л. Айзенберг и М. Н. Карасик. О методах определения мощности сетевых трансформаторов. Электричество, № 9, 1936.

5. Б. Л. Айзенберг. Замкнутая электрическая сеть без сетевых автоматов. Госэнергоиздат, 1948.

6. Б. Л. Айзенберг, Д. А. Герман и А. П. Щеглов. Замкнутая схема городской электрической сети высокого напряжения. Электрические станции, № 6, 1949.

31.5.1950



Причины автоматического затухания ионизации в газонаполненных кабелях

Кандидат техн. наук Д. Д. ЗАРИН

Московский энергетический институт им. Молотова

Во время исследования газонаполненных кабелей при градиентах ионизации было замечено, что после некоторого времени, в течение которого кабели подвергались воздействию высокого напряжения, ионизация в кабеле затухает, причем начальный градиент ионизации становится выше, чем был до опыта. Используя это явление, некоторые авторы предлагали строить газонаполненные кабели, рассчитывая их на более высокие начальные градиенты, чем начальные ионизационные, что позволяет значительно уменьшить толщину изоляции кабеля.

В 1939 г. строились различные предположения относительно причин этого явления. Некоторые участники дискуссии, имевшей место в то время [Л. 1], пытались объяснить его тем, что в процессе ионизации в кабеле, в пустотах, заполненных азотом, образуется воск, размеры пустот, следовательно, и толщина газовых пленок уменьшаются, и поэтому повышается градиент ионизации. Высказывалось также предположение,

Описаны опыты, показывающие причины затухания ионизации в газонаполненных кабелях. Установлена связь повышения градиента ионизации с увеличением проводимости поверхности, охватывающей газовую прослойку, расположенную внутри изоляции кабеля. Установлены количественные соотношения, управляющие явлением.

что затухание ионизации в газовой пленке происходит, возможно, вследствие шунтирующего действия поверхности пропитанной бумаги, охватывающей газовую пленку.

Однако ни в 1939 г., ни в последующее время причины этого явления не были вскрыты.

В 1939 г. Б. Н. Каноникиным [Л. 2] была опубликована работа, посвященная изучению условий перехода распределенного разряда в сосредоточенный в газовых прослойках, заключенных между стеклами. В этой работе показано, что под действием ионизации (распределенный разряд) поверхность стекол покрывается полупроводящим слоем, что обуславливает переход разряда из распределенного в сосредоточенный.

Факт самопроизвольного возникновения под действием ионизации полупроводящего слоя на поверхности, охватывающей газовую прослойку, утвердил автора в мысли о том, что главной причиной самозатухания ионизации в газонаполненных кабелях является шунтирующее действие поверхности пропитанной бумаги, охватывающей

газовые пленки. Учитывая большую практическую значимость этого явления, автор задался целью вскрыть действительные причины эффекта самозатухания ионизации в газонаполненных кабелях.

Опыт, поставленный автором, был абстрагирован от сложных процессов, происходящих в кабелях под действием тепловых, электрических и магнитных полей. В модели было выделено и прослежено действие одного электрического поля, так как по предположению только оно должно определять эффект самозатухания ионизации в газонаполненном кабеле.

В опыте моделировалась газовая пленка газонаполненного кабеля с сильным обеднением пропитанной бумаги и с умеренным обеднением. Модель пленки осуществлялась в виде пакета, состоящего из трех обедненных листов кабельной бумаги толщиной 0,12 мм (К-12). Верхняя бумажка пакета имела три отверстия диаметром 6 мм, расположенных по вершинам равнобедренного треугольника, две нижние бумажки отверстий не имели. Пакет бумажек закладывался между стеклом и латунным электродом так, чтобы бумажка с отверстиями плотно прилегала к стеклу. В приборе (рис. 1) верх стекла склеен с толстой текстолитовой пластиной. В вырез, находящийся в центре пластины, наливалась подсолненная вода.

Напряжение к электродам прибора подавалось от измерительного трансформатора 6 кв. Плавное регулирование напряжения осуществлялось потенциометром. Измерение напряжения производилось электродинамическим вольтметром, показания которого контролировались электростатическим вольтметром 5 кв.

Схема замещения всего устройства, заключенного между электродами, изображена на рис. 2. Напряжение на газовой пленке подсчитывалось по формуле, отвечающей схеме замещения:

$$U_z = U_{np} \frac{\sum C_z}{C_z} = U_{np} \frac{\epsilon_{cm} \epsilon_0 \Delta_z}{\epsilon_{cm} \Delta_0 + \epsilon_{cm} \epsilon_0 \Delta_z + \epsilon_0 \Delta_{cm}}. \quad (1)$$

Прибор помещался в затемненную камеру. Начальный градиент ионизации в газовых пленках определялся по моменту появления в них свечения. Этому моменту всегда соответствовало какое-то определенное напряжение (U_{np}), и тогда по формуле (1) подсчитывались напряжение (U_z) и соответствующий ему градиент в пленке газа E_z .

Начальный градиент ионизации всех образцов модели определялся перед постановкой их под напряжение. До обработки напряжением все 9 образцов имели начальный градиент ионизации 6,4—6,7 кв эфф /мм. Образцы подвергались воздействию электрического поля при градиенте, в 1,4 раза большем начального градиента ионизации, в течение 60—120 час, циклами: 8 час под напряжением, 16 час без напряжения. Через 60—120 час начальный градиент повысился до 8,5 ÷ 9,6 кв эфф /мм (данные, полученные на всех образцах, см. табл. 1). Таким образом, факт увеличения начального градиента под действием ионизации подтвердился.

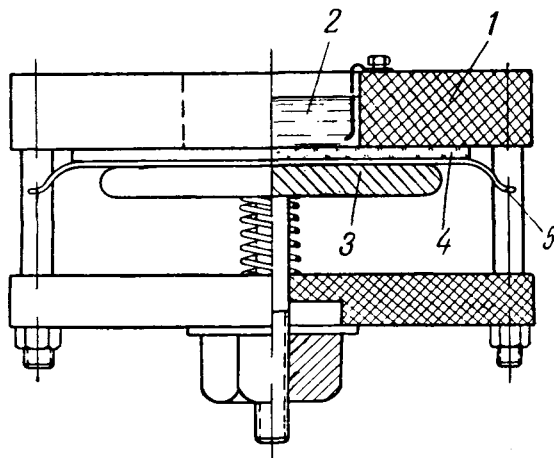


Рис. 1.

1 — текстолит; 2 — подсолненная вода; 3 — латунный электрод; 4 — стекло; 5 — три слоя пропитанной бумаги.

Осмотр образцов показал, что состояние поверхности бумажек, прилегающих к отверстиям верхней бумажки, осталось таким же, как и до опыта. На образцах, подвергавшихся воздействию ионизации в течение 100 и более часов, в месте их прилегания к отверстиям был обнаружен воск в очень малом количестве. Образование воска не вызвало заметного увеличения толщины бумаги. Следовательно, предположение об изменении начального градиента вследствие образования воска и связанного с ним уменьшения толщины газовой пленки оказалось несостоятельным.

Затем были выполнены исследования, имеющие целью выяснить, не является ли изменение градиента ионизации следствием увеличения проводимости поверхности, охватывающей газовую пленку. Для этого у всех образцов были измерены поверхностные сопротивления участков бумажек, прилегающих к отверстиям, а также сопротивления кромок самих отверстий. Кроме того, для проверки было измерено сопротивление изоляции поверхности бумажки, не обработанной ионизацией, т. е. расположенной около участка, прилегающего к отверстию.

Измерения выполнялись на схеме сравнения. Замеры производились до и после воздействия ионизации на поверхность пропитанной бумаги. Сопротивление изоляции поверхности бумажки без отверстий измерялось с помощью электродов,

Таблица 1

Номера образцов	Начальный градиент ионизации в пленке газа, кв эфф /мм		Напряжение начала ионизации на приборе, кв эфф /мм		Градиент в пленке газа, действующий в течение опыта, кв эфф /мм	Продолжительность действия градиента, час
	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта		
1	6,6	9,6	2,1	3,2	13,5	96
2	6,5	8,6	2,15	2,9	13,5	70
3	6,6	9,0	2,17	3,2	13,5	61
4	6,6	8,5	2,1	2,8	13,5	65
5	6,6	8,7	2,1	2,7	13,5	72
6	6,75	8,6	2,1	2,83	13,5	72
7	6,6	8,65	2,1	2,9	13,5	88
8	6,6	9,1	2,15	3,0	13,5	80
9	6,6	8,0	2,1	2,8	13,5	65

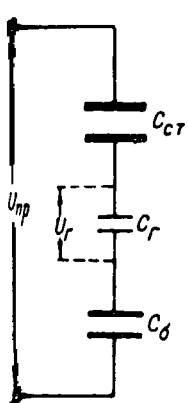


Рис. 2. Схема замещения устройства, заключенного между электродами.

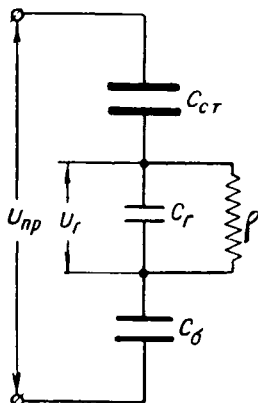


Рис. 3. Схема замещения шунтированной газовой пленки.

полненных в виде тонких ножей, укрепленных текстолитовых изоляторах. Сопротивление изоляции периметра отверстия в бумажке измерялось с помощью двух плоских электродов, прижатых к обеим сторонам отверстия. Поверхность плоских электродов была посеребрена и тщательно отполирована. Электроды в виде ножей были выполнены из латуни и тщательно зачищены.

Данные, полученные в результате измерения сопротивлений (табл. 2), свидетельствуют о закономерном уменьшении сопротивления изоляции поверхности, охватывающей газовый промежуток. Газовые пленки как бы шунтируются пониженным сопротивлением изоляции поверхностей. Это и является причиной увеличения градиента ионизации в газовых пленках.

Если сказанное о механизме шунтирования газовых пленок справедливо, то, очевидно, с увеличением периметра пленки должно соответственно уменьшаться сопротивление изоляции поверхности кромки отверстия. Для проверки были изготовлены образцы с отверстиями диаметром 26 мм и образцы с отверстиями диаметром 6 мм. По известной выше методике образцы подвергались воздействию напряжением в течение 50 час. Из-

мерения показали, что сопротивление периметра отверстия диаметром 6 мм составило 400 мгом, а диаметром 26 мм — 90 мгом.

Необходимо отметить, что утечки по поверхности бумажек не могли сказаться на результатах измерения сопротивлений, так как сопротивление изоляции поверхности, не прилегающей к отверстию, оказалось, как показали измерения, в сотни и тысячи раз больше, чем сопротивление участка, прилегающего к отверстию.

Шунтированную газовую пленку, ограниченную с одной стороны кабельной бумагой, пропитанной в брейдстоке, а с другой стороны стеклом прибора, можно представить в виде схемы замещения (рис. 3). Для такой схемы действительно соотношение

$$\bar{U}_z = U_{np} \frac{Z_z}{Z_{общ}} e^{i(\alpha_1 - \alpha_2)}, \quad (2)$$

где

$$|Z_z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\rho}\right)^2 + (\omega C_z)^2}}, \quad (3)$$

$$|Z_{общ}| = \sqrt{\left[\frac{1}{\frac{1}{\rho} + \omega^2 C_z^2}\right]^2 + \left[\frac{\omega C_z}{\frac{1}{\rho^2} + \omega^2 C_z^2} + \frac{C_6 + C_{ст}}{\omega C_6 C_{ст}}\right]^2}. \quad (4)$$

С некоторым приближением можно принять, что плоскости, ограничивающие газовую пленку, являются электродами газового конденсатора, а полупроводящий периметр отверстия является шунтирующим газовую пленку сопротивлением. В этом случае для образца № 4 (табл. 1, 2) после воздействия ионизацией имеем: $\rho = 3 \cdot 10^{-9}$ ом. Кроме того, $\epsilon_{ст}$ и ϵ_6 получены из опыта, $C_6 = 0,37 \cdot 10^{-11}$ ф, $C_{ст} = 0,19 \cdot 10^{-11}$ ф и $C_z = 0,2 \cdot 10^{-11}$ ф получены расчетным путем.

Произведя необходимые вычисления по формулам (2), (3) и (4), получаем градиент ионизации $E_z = 8,5$ кв.эфф./мм. Начальный градиент

Таблица 2

№ опыта	Сопротивление изоляции поверхности периметра отверстия						Сопротивление изоляции поверхности участка бумажки, прилегающего к отверстию						Напряжение начала ионизации на приборе, кв эфф	
	до опыта, мгом			после опыта, мгом			до опыта, мгом			после опыта, мгом				
	Номера отверстий									до опыта	после опыта			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			1		
	1·10 ⁵	2·10 ⁵	1·10 ⁵	1,3·10 ³	1,5·10 ³	0,9·10 ³	0,5·10 ⁵	0,2·10 ⁵	0,2·10 ⁵	0,8·10 ³	1·10 ³	0,6·10 ³	2,1	3,2
	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1,5·10 ³	1,5·10 ³	0,8·10 ³	—	—	—	—	—	—	2,15	2,9
	0,6·10 ⁵	0,6·10 ⁵	0,6·10 ⁵	4·10 ³	7·10 ³	5·10 ³	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1·10 ⁵	0,5·10 ³	1·10 ³	1·10 ³	2,17	3,2
	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1·10 ⁵	3,3·10 ³	2,4·10 ³	2,8·10 ³	1·10 ⁵	1·10 ⁵	4·10 ⁵	0,8·10 ³	0,6·10 ³	0,6·10 ³	2,1	2,8
	0,5·10 ⁵	1·10 ⁵	0,8·10 ⁵	1,3·10 ³	1,5·10 ³	1,0·10 ³	0,5·10 ⁵	1·10 ⁵	1,0·10 ⁵	0,6·10 ³	1·10 ³	0,6·10 ³	2,1	2,7
	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1,5·10 ³	1,6·10 ³	1,0·10 ³	0,5·10 ⁵	0,2·10 ⁵	0,2·10 ⁵	0,5·10 ³	1·10 ³	0,8·10 ³	2,1	2,83
	1,25·10 ⁵	1,25·10 ⁵	1,2·10 ⁵	1,75·10 ³	1,7·10 ³	1,65·10 ³	—	—	—	—	—	—	2,1	2,9
	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1,5·10 ⁵	1,6·10 ³	1,6·10 ³	1,2·10 ³	0,5·10 ⁵	0,5·10 ⁵	0,5·10 ⁵	2·10 ³	12·10 ³	10·10 ³	2,15	3,0
	1·10 ⁵	6·10 ⁵	1·10 ⁵	1,5·10 ³	1,5·10 ³	0,6·10 ³	0,5·10 ⁵	0,5·10 ⁵	1·10 ⁵	25·10 ³	30·10 ³	30·10 ³	2,1	2,8

пленки до обработки ионизацией равен $E_z = 6,6 \text{ кв. см./мм.}$ Таким образом, градиент ионизации газовой пленки после воздействия ионизацией вырос примерно на 30%. Градиент ионизации образцов возрастает в соответствии с уменьшением сопротивления изоляции, которое шунтирует газовую прослойку.

Во время опытов было замечено следующее явление. Если взять образец, у которого пленка газа уже шунтирована, и бумажку с отверстиями чуть переместить относительно прилегающей к ней бумажки, а затем возвратить в прежнее положение, то начальный градиент ионизации резко уменьшится. Если же этот образец поставить вновь под напряжение всего лишь на несколько часов, то градиент ионизации вновь возрастет до значения, имевшего место до перемещения бумажки.

Это явление можно представить так, что на поверхности пропитанной бумаги, получившей повышенную проводимость, под действием электрического поля, образуются пути электрических микротоков. При перемещении бумаг относительно друг друга пути токов нарушаются и шунтирующее действие резко уменьшается. Но достаточно сравнительно кратковременного воздействия электрического поля, чтобы пути токов восстановились, и шунтирующее действие поверхности будет вновь способствовать повышению начального градиента ионизации в газовой пленке.

Все сказанное справедливо для образцов пропитанной бумаги, обладающих такой степенью

обеднения, при которой не наблюдается заметного перемещения пропиточной массы вдоль слоёв бумаги. Но если взять аналогичные образцы с значительным обеднением, то природа процесса затухания ионизации будет другой. В этом случае под действием сил электрического поля пропиточная масса затягивается в газовые пленки вследствие чего значительно уменьшаются размеры газовой пленки и увеличивается начальный градиент ионизации.

Автор полагает, что описанные процессы приложимы к объяснению факта повышения градиента ионизации в газонаполненных кабелях.

Выводы. 1. В обедненной пропитанной бумагой изоляции автоматическое затухание ионизации получается вследствие увеличения проводимости поверхности пропитанной бумаги, охватывающей газовую пленку.

2. Градиент ионизации в газовой пленке увеличивается примерно на 30% в соответствии с уменьшением сопротивления изоляции поверхности, охватывающей газовую прослойку.

3. В образцах с незначительным обеднением пропиточная масса силами электрического поля затягивается в пространство газовой прослойки, размеры прослойки уменьшаются и градиент ионизации увеличивается.

Литература

1. Шанклин. El. Eng., V. 58, июль 1939.
2. Б. Н. Канонькин. ЖТФ, т. IX, вып. 10, 19

[13. 10. 1]



Колебания в газоразрядных приборах¹

Кандидат техн. наук М. М. ЧЕТВЕРИКОВА

Научно-исследовательский институт физики МГУ

Колебания в газоразрядных трубках с жидким или накаливаемым катодом, в разных газах, при разных давлениях, разрядных и накальных токах изучали многие авторы. Частота этих колебаний лежит в пределах от нескольких десятков герц до сантиметровых волн. Экспериментально установлено, что эти колебания нельзя объяснить только наличием колебаний в плазме. С помощью газоразрядных трубок можно возбудить колебания различных типов, в том числе, например, аналогичные колебаниям в тормозящем

Приведены основные результаты по изучению генерирования колебаний высокой частоты как специально разработанными для этой цели газоразрядными приборами, так и промышленными тиратронами и газотронами. Колебания изучались при наличии и отсутствии в схемах внешнего колебательного контура. Даны осциллограммы, иллюстрирующие колебания.

поле анода. Колебания могут быть локализованы как в анодной, так и катодной области разряда.

Большое число исследований советских ученых посвящено «стенотронам», в которых использовались

для возбуждения колебаний эффект сужения разряда. Работы велись в ВЭИ В. Л. Грановским совместно с Л. Н. Быховской и Г. Л. Суетиным². Большинство исследований колебаний в газовом разряде произведено с помощью сп

¹ Доложено на секции радиометодов ВНОР и Э им. Попова 20 марта 1950 г. и на Ученом совете НИИ физики и Физического факультета Московского государственного университета им. Ломоносова 14 июня 1950 г.

² Л. Н. Быховская и В. Л. Грановский. Доклады АН СССР, физика, т. XLIX, № 5, 348, 1949; Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 16, № 9, 1946; В. Л. Грановский и Г. Л. Суетин. Доклады АН СССР, Техническая физика, т. XLIX, № 420, 1945; Г. Л. Суетин, Журнал технической физики, т. XVII, вып. 7, 809, 1947.

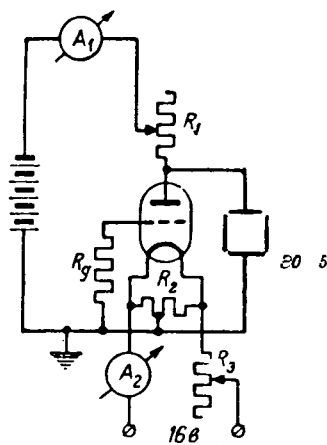


Рис. 1.

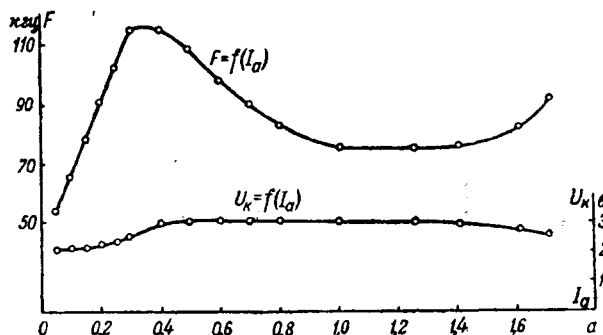


Рис. 2.

ных экспериментальных трубок, имеющих общего с газоразрядными приборами проленного типа (газотроны, игнитроны, тиратроны, мощные ртутные выпрямители). Вопрос об освещении в газоразрядных приборах освещен в литературе недостаточно.

Изучение колебаний в тиратронах и газотронах. Изучение колебаний в тиратронах и газотронах в отсутствие внешнего колебательного контура производилось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Для накала использовался постоянный ток. Переменный ток накала давал сильную модуляцию изучаемых колебаний. Питание анода осуществлялось от аккумуляторной батареи 114 в. При изучении колебаний в тиратронах сетка соединялась с землей через сопротивление $R_g = 10^4$ ом. Это необходимо было при зажигании тиратрона. После зажигания сетка может быть отсоединена. Изучение падения напряжения на тиратроне или газотроне производилось с помощью высокоомного вольтметра. Частоты и амплитуды колебаний измерялись электронным осциллографом, отградуированным при различных значениях усиления и синхронизации. Частоты колебаний F и амплитуды переменной составляющей колебаний U_k измерялись на аноде в зависимости от постоянной составляющей анодного тока I_a при токе накала $I_n = \text{const}$ или в зависимости от I_n при $I_a = \text{const}$. Результаты измерения частоты F и амплитуды колебаний U_k от накала I_n здесь не приведены.

В статье даны некоторые результаты изучения колебаний в тиратронах ТГ-8/3000 и КУ-635 и газотроне ВГ-237. Колебания эти в основном, по нашему, происходят в анодной области. Колебания у сетки тиратрона незначительны по амплитуде и хаотичны по форме.

Наблюдения колебаний в тиратронах и газотронах. Схемы без внешнего колебательного контура. В тиратроне ТГ-8/3000 колебания наблюдаются почти для всех допустимых для этого значений разрядного тока, от нескольких миллиампер, до 2 а (рис. 2). Начиная с $I_a = 1,7$ а, колебания принимают беспорядоч-

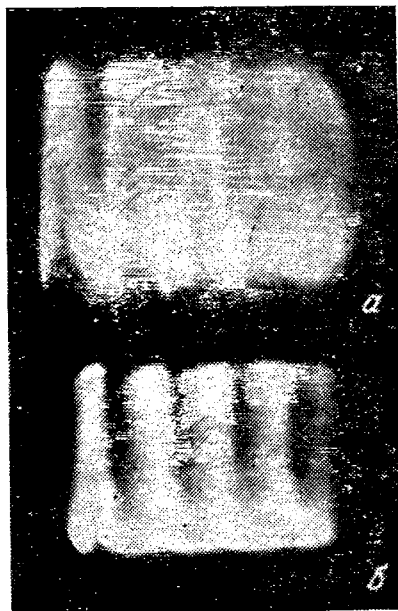


Рис. 3. (ТГ-8/3000; а — $I_a = 250$ ма, $F = 102$ кГц; б — $I_a = 1,2$ а, $F = 75$ кГц).

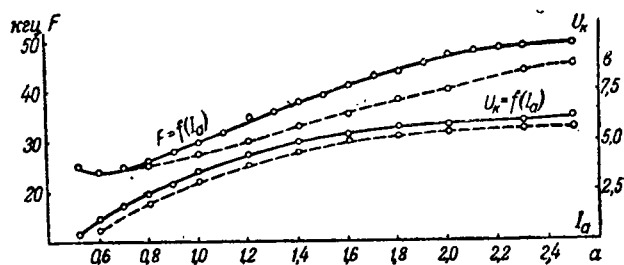


Рис. 4.

ный характер. Количественные измерения при $I_a > 1,7$ а не производились.

На рис. 3 показана форма колебаний для $I_a = 250$ ма, $F = 102$ кГц (рис. 3,а) и для $I_a = 1,2$ а, $F = 75$ кГц (рис. 3,б). Эти, как и другие приведенные снимки, сняты при различных усилениях и скоростях развертки осциллографа.

В отличие от тиратрона ТГ-8/3000, колебания в тиратроне КУ-635 возникают скачкообразно при $I_a = 0,3$ а (рис. 4). Частота колебаний в ин-

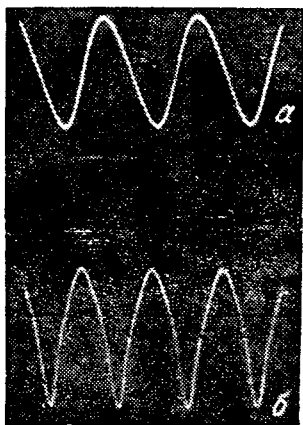


Рис. 5. (KU-635; а — $I_a = 520$ ма, $F = 25$ кГц; б — $I_a = 1,08$ а, $F = 30$ кГц).

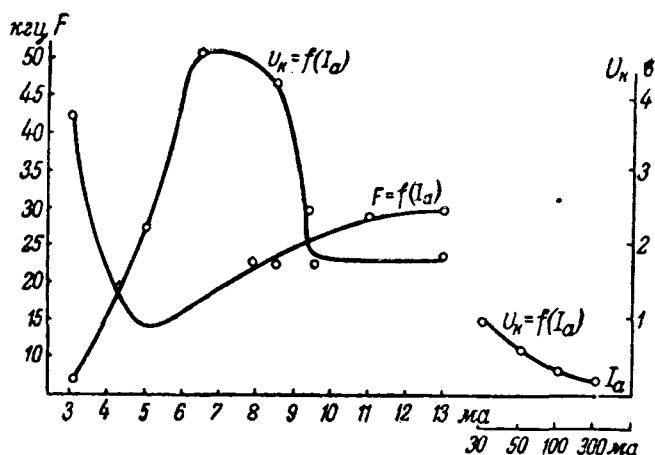


Рис. 6.

тервале изменения разрядного тока от 0,3 до 2,5 а меняется от 24 до 50 кГц. Амплитуда колебаний U_k значительно выше, чем у тиратрона ТГ-8/3000. Характеристики, показанные сплошной линией и пунктирной линией, относятся к двум различным экземплярам тиратрона KU-635. Незначительное различие в частоте колебаний объясняется неполной идентичностью внутренних параметров тиратронов (конфигурации электродов и давления).

Колебания носят устойчивый характер. Форма колебаний вначале близка к синусоиде (рис. 5, а), по мере увеличения разрядного тока она искажается (рис. 5, б).

В газотроне ВГ-237 колебания наблюдались на очень небольшом интервале изменения разрядного тока (от 2 до 450 ма). Начиная с 14 ма, колебания переходят в хаотические, и амплитуда их быстро убывает (рис. 6). При $I_a = 450$ ма колебания пропадают. Отчетливо наблюдаемые колебания имеют место в интервале 2—13 ма. Частота колебаний имеет резкий минимум при $I_a = 5$ ма, а амплитуда — резкий максимум при $I_a = 6—7$ ма. Форма колебаний значительно зависит от величины разрядного тока.

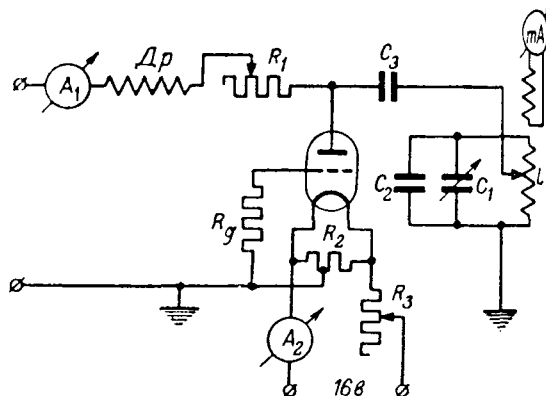


Рис. 7.

Выделение колебаний во внешний колебательный контур. Для выделения высокочастотной составляющей был собран генератор параллельным включением контура (рис. 7). Работа генератора изучалась на двух экземплярах тиратрона KU-635 при $I_a = 2$ а. Резонансная частота при одном экземпляре была $f = 47$ кГц при другом $f = 39$ кГц. Наибольшая амплитуда напряжения на контуре была 60 в. Настройку в резонанс производилась изменением одной трех величин I_a , I_k или $C = C_1 + C_2$ при постоянном значении двух остальных. Грубая настройка осуществлялась изменением C_2 и точная — изменением C_1 и I_k (в допустимых пределах). Мощность, выделяющаяся в контур была порядка 1 вт.

Включение контура как нагрузки для высокочастотной составляющей анодного тока тиратрона искажает форму анодных колебаний.

Ввиду малого внутреннего сопротивления тиратрона более рациональной оказалась схема последовательным включением контура. Внутреннее сопротивление тиратрона при этом входило в контур. При $R = 20$ ом (включая сопротивление теплового миллиамперметра) ток в контуре достигал 330 ма, а мощность 2 вт.

Для возбуждения колебаний большой мощности с помощью газоразрядных приборов обычного типа (тиратронов, ртутных выпрямителей, игнитронов и др.) требуется разработка специальных генераторных схем.

Генерирование колебаний высокой частоты с помощью газоразрядных приборов с ртутным катодом. При разработке конструкции газоразрядного прибора, предназначенного для генерирования колебаний высокой частоты большой мощности, особый интерес представлял жидкий катод с нефиксированным катодным пятном, не ограничивающим преобразуемый ток. Для экспериментальных целей в качестве газоразрядного прибора с ртутным катодом служил неуправляемый металлический разборный ртутный выпрямитель РМНВ-500.

Результаты, приведенные ниже, получены нами при изучении анодного узла РМНВ-500. Из рукава анода была удалена деионизирующая

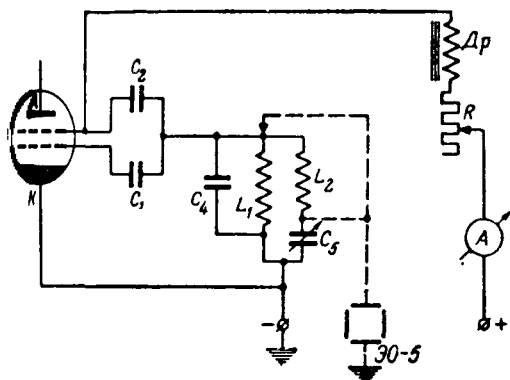


Рис. 8.

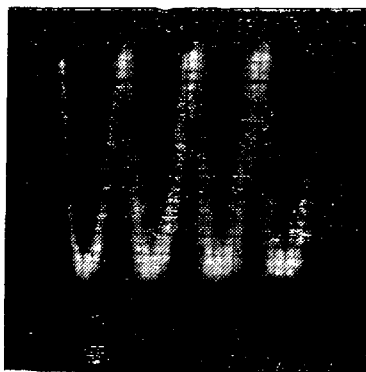


Рис. 9.

тка и вставлены на заданном расстоянии два электрода g_1, g_2 (рис. 8). Электроды соединялись к электровакуумным вводам, оснащенным во фланец анодного узла.

Следование колебаний производилось при менном возбуждении. Колебания наблюда- на электронном осциллографе ЭО-5, отграду- нном при различных значениях усиления хронизации. При снятии нагрузочной ха- ристики $U_{g2}=f(I_{g2})$ измерялись частота F и амплитуда колебаний U_k , как функции нагру- зочного тока I_{g2} . С помощью схемы рис. 8 были рены колебания в интервале от 4 до 112 кгц. Амплитуда колебаний U_k изменялась в интер- вал от 6,35 до 58 в. Колебания частотой $F=21,8$ кгц и амплитуды $U_k=17,4$ в получены при $C_1=1$ мкф, $C_2=22$ мкф, $C_4=1,5$ мкф, $C_5=0$, $C_3=0,5$ мкф. Постоянная составляющая разрядного тока $I_{g2}=4,5$ а. Колебания амплитуды $U_k=33$ в получены при следующих условиях: $C_1=1$ мкф, $C_2=25$ мкф, $C_4=1,5$ мкф, $C_5=0$, $C_3=0,5$ мкф. Постоянная составляющая разрядного тока $I_{g2}=2,5$ а. Форма колебаний $F=14,8$ кгц, записанная

на рис. 9. Колебания частоты $F=112$ кгц были полу- чены при $C_1=1$ мкф, $C_2=22$ мкф, $C_4=1,5$ мкф, $C_5=0$, $C_3=0,5$ мкф; постоянная составляющая раз- рядного тока $I_{g2}=4,5$ а. Колебания амплитуды $U_k=33$ в получены при следующих условиях: $C_1=1$ мкф, $C_2=25$ мкф, $C_4=1,5$ мкф, $C_5=0$, $C_3=0,5$ мкф. Форма колебаний $F=14,8$ кгц, записанная

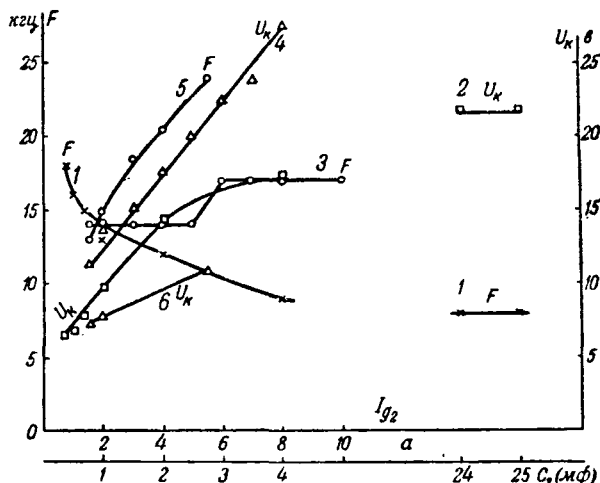


Рис. 10.

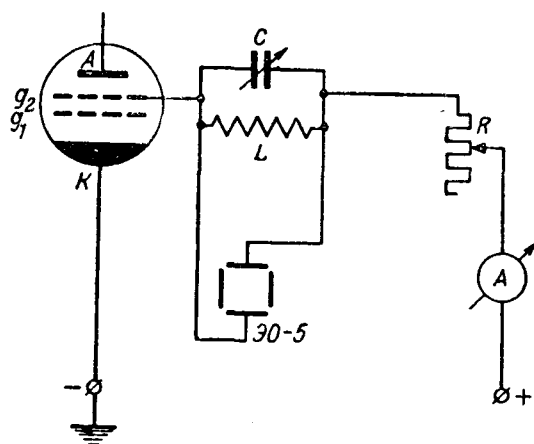


Рис. 11.

электронным осциллографом ЭО-5, представлена на рис. 9. Постоянная составляющая разрядного тока $I_{g2}=2$ а, $U_{g2}=36$ в.

На рис. 10 даны кривые 1—2 зависимости частоты и амплитуды колебаний от емкости C_2 . Кривые 3—4 и 5—6 дают те же параметры в зависимости от разрядного тока I_{g2} .

Изменение C_1 от 0,25 мкф до 2 мкф, а также отсоединение C_1 и g_1 от схемы не изменяет колебания ни по частоте, ни по амплитуде. В схеме рис. 8 частота и амплитуда колебаний обусловлены внешними параметрами схемы и величиной разрядного тока. Нами изучались явления колебаний на одиннадцати различных схемах. Форма колебаний частоты $F=21,8$ кгц, $U_k=33$ в для одного из вариантов этих схем (рис. 11; $I_{g2}=2,5$ а, $C=3$ мкф) показана на рис. 12.

Значения частоты и амплитуды колебаний при различных значениях емкости C и разрядного тока I_{g2} или I_{g1} для схемы рис. 11 приведены в таблице, из которой нетрудно видеть, что в схеме (рис. 11) разрядные токи I_{g2} или I_{g1} не влияют на частоту колебаний. Амплитуда же колебаний U_k с увеличением разрядного

I_{g2}, a	0,76	1,25	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5
$C, мкф$	2	0,25	0,5	1	2	2,5	2,5
$F, кгц$	16,2	49,5	34,2	23,2	16,2	15,2	14,4
$U_k, в$	30	9	9,75	8,25	16,5	13,5	17

I_{g2}, a	1,75	2,0	2,25	2,5	2,5	2,5	2,5
$C, мкф$	2,5	2,5	2,5	2,5	2	3	0,25
$F, кгц$	12,8	13,5	15,0	14,2	16,6	21,8	43,8
$U_k, в$	20,3	26,3	25	22,5	35	33	18,6

$$I_{g1} = 1,53 a$$

$C, мкф$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
$F, кгц$	52	36	25	23	22,2	19,5	18,8
$U_k, в$	0,5	0,8	0,7	1	1,05	1,0	1,05

$C, мкф$	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	3,75
$F, кгц$	17,0	14,8	13,5	12,6	13,0	11,7	11,7	12,0
$U_k, в$	0,9	0,8	0,8	1,1	1,35	1,5	1,45	1,2

$C, мкф$	4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,25	5,5	5,75	7
$F, кгц$	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	9,8	9,8	9,0	8,0
$U_k, в$	1,1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

$$I_{g1} = 5,1 a$$

$C, мкф$	0,25	0,5	0,75	1,0	3,0
$F, кгц$	52	36	25	23	13
$U_k, в$	1,05	1,35	1,5	1,45	2,1

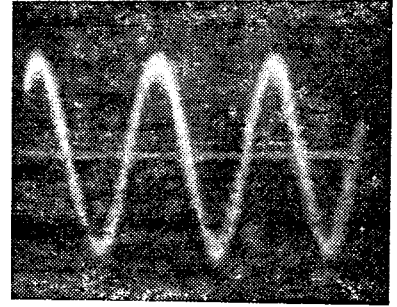


Рис. 12.

тока I_{g2} или I_g возрастает. Было также установлено, что в схеме рис. 11 включение последовательно соединенных емкости и индуктивности между электродами g_1 и катодом не влияет на частоту, ни на амплитуду колебаний.

Закключение. Необходимо дальнейшее изучение возможности увеличения частоты и мощности колебаний, генерируемых в газоразрядных приборах. Необходимо также изучать колебания в газоразрядных приборах, как причину аварий и источник помех. Следует выяснить связь обратных зажигания с колебаниями в газоразрядных приборах. Сопоставление характеристик $F=f(I_a)$ и $U_k=f(I_a)$ тиратронов ТГ-8/3000 и КУ-4 с значениями их максимальных допустимых обратных напряжений показывает, что большая амплитуда колебаний (КУ-635) соответствует меньшему допустимому значению обратного напряжения. Это положение надлежит проверить в других типах газоразрядных приборов.

В исследовании колебаний в газоразрядных приборах принимали участие студент В. И. Шлюбский (тиратроны и газотроны) и научные сотрудники П. П. Климентов и Т. М. Свиридов (приборы с ртутным катодом).



Анализ работы индукционного реле направления мощности с цилиндрическим ротором при переходных процессах

Кандидат техн. наук Л. А. ГЕЛЬБУХ

Харьковский электротехнический институт

Введение в эксплуатацию быстродействующих индукционных реле с цилиндрическим ротором двигает необходимость решения ряда новых задач, не возникавших ранее при применении реле с дисковым ротором, собственное время действия которых велико. Поэтому важна задача анализа работы реле под воздействием переходных токов, влиянию которых сильно подвержены реле с цилиндрическим ротором, обладающие малой инерцией подвижных частей. Переходные токи, как показано ниже, могут привести к неселективному срабатыванию индукционного однофазного реле направления мощности с цилиндрическим ротором, если не принять специальных мер, заключающихся в ведении резонансного контура в цепь обмотки напряжения.

Рассматривается действие однофазного индукционного реле направления мощности с цилиндрическим ротором от переходных токов, возникающих в его обмотках при аварии. Доказана возможность неселективного действия реле при больших посадках напряжения, что можно предотвратить, включив в цепь обмотки напряжения емкость и активное сопротивление. Устройство также обеспечивает срабатывание реле при прямом направлении мощности даже при падении напряжения до нуля.

составляющей, соответствующее следующему уравнению:

$$i_i = I_{\max} \sin(\omega t + \alpha) - I_{\max} \sin \alpha e^{-\frac{t}{T_c}}, \quad (1)$$

где α — фазный угол в момент аварии.

T_c — постоянная времени системы (обычно значение T_c колеблется в пределах $0,01 \div 0,1$ сек).

До аварии ток в системе принят равным нулю. Переходные процессы в трансформаторах тока не учитываются.

Ток i_i имеет намагничивающую составляющую i_{ii} (рис. 1). Приблизненно

$$i_{ii} = \eta I_{\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_1) - I_{\max} \sin \alpha e^{-\frac{t}{T_c}},$$

где

$$\eta = \frac{R_s}{\sqrt{\omega^2 L_i^2 + R_s^2}} \text{ и } \varphi_1 = \arccos \eta. \quad (1')$$

Активное сопротивление R_s определяется реакцией ротора. Омическое сопротивление обмотки не учитывается.

Будем считать, что в период аварии напряжение на обмотке напряжения реле синусоидально:

$$u = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_c), \quad (2)$$

где φ_c — угол, зависящий от сдвига фаз между током и напряжением и от способа включения обмотки реле (например, 30-градусная и 90-градусная схемы).

Намагничивающий ток в обмотке напряжения будет также иметь установившуюся и переходную составляющие и может быть приближенно выражен следующей зависимостью, которая легко получается при применении принципа

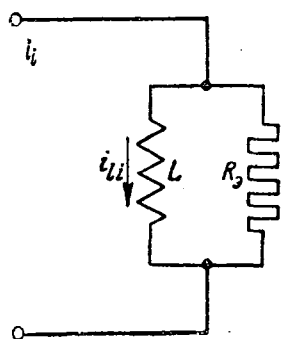


Рис. 1. Схема замещения обмотки реле (i_{ii} — намагничивающий ток).

При коротком замыкании в системе ток в обмотке тока реле рассматриваемого типа, как известно, состоит из установившейся и переходной

¹ Индекс i указывает на токовую обмотку; u — на обмотку напряжения.

Тевенена-Гельмгольца:

$$i_{lu} = -\frac{U_{\max}}{\omega L_u} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_c) - \frac{U_{\varphi, \max}}{\omega L_u} \cos(\alpha + \varphi_\varphi) e^{-\frac{t}{T_{1u}}}, \quad (3)$$

где $U_{\varphi, \max}$ — амплитуда фиктивного напряжения, равного геометрической разности напряжений до и в период аварии; φ_φ — угол сдвига фаз между напряжением U_φ и током в обмотке тока.

Взаимодействие потоков и токов наведенных в роторе реле, дает движущий момент:

$$M = k' \left[i_{lu} \frac{di_{lu}}{dt} - i_{lu} \frac{di_{lu}}{dt} \right]. \quad (4)$$

Применение (4) к первым членам (1') и (3) дает установившийся момент, равный:

$$M_y = k \frac{U_{\max} I_{\max}}{L_u} \cos(\varphi_c + \varphi_1), \quad (5)$$

где k — постоянная, определяемая конструктивными параметрами реле.

Вычислением этого момента обычно и ограничиваются в существующей литературе по реле и технике релейной защиты. Однако для реле с цилиндрическим ротором необходимо еще найти выражения для переходных моментов, возникающих вследствие взаимодействия переходной составляющей в обмотке тока с установившимся током в обмотке напряжения, переходной составляющей в обмотке напряжения с установившимся током в обмотке тока и, наконец, между переходными составляющими в обеих обмотках.

Как показали проведенные исследования, значительное влияние на работу реле оказывает лишь второй из названных моментов, который достигает значительной величины при больших посадках напряжения при аварии, так как при этом велико напряжение $U_{\varphi, \max}$. Образование этого момента имеет место вследствие взаимодействия переменного и постоянного (по направлению) тока; переходный момент знакопеременен и направлен то в сторону размыкания, то в сторону замыкания контактов. Он может быть приближенно выражен так:

$$M_n = k \frac{U_{\varphi, \max} I_{\max}}{L_u} \cos(\alpha + \varphi_\varphi) \times \cos(\omega t + \alpha - \varphi_1 - \varphi_u) e^{-\frac{t}{T_{1u}}}, \quad (6)$$

где

$$\varphi_u = \arctg \frac{1}{\omega T_{1u}}.$$

Из сравнения (5) и (6) следует, что при благоприятной фазе включения аварийного тока ($\alpha + \varphi_\varphi = 0$) и при условии $U_{\varphi, \max} \gg U_{\max}$ амплитуда переходного момента M_n может во много

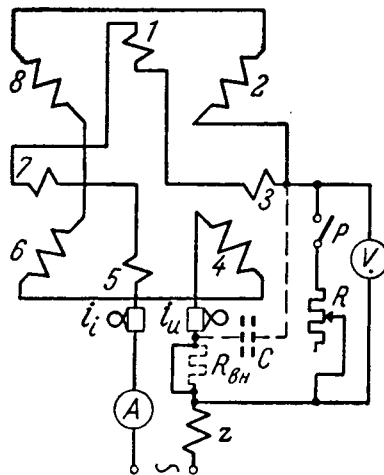


Рис. 2. Схема опыта, иллюстрирующего работу однофазного реле направления мощности при коротком замыкании.

раз превзойти установившийся момент M_y , приводит к неселективному срабатыванию реле при обратном направлении мощности.

Возможность подобного неселективного действия была проверена экспериментально. Для опытов было использовано восьмиполусное индукционное реле с цилиндрическим ротором включенное по схеме однофазного реле направления мощности (рис. 2).

При разомкнутом рубильнике P катушки токов 1, 3, 5 и 7 и напряжения 2, 4, 6 и 8 включены последовательно. При этом катушки напряжения находятся почти под полным напряжением сети, так как их сопротивление значительно больше сопротивления катушек тока и внешнего сопротивления z . Ток в катушках тока невелик и совпадает по фазе с током в катушках напряжения такой режим имитирует включение линии без нагрузки. Короткое замыкание имитируется включением рубильника P . При этом ток в катушке тока ограничивается сопротивлением z и может регулироваться реостатом. Катушки напряжения оказываются включенными параллельно реостату, который имитирует сопротивление участка линии от шин подстанции до места короткого замыкания. Активный характер сопротивления соответствует искомому режиму — близкому короткому замыканию, когда преобладает сопротивление дуги и имеется значительная посадка напряжения.

Осциллограмма рис. 3 иллюстрирует неселективное действие реле при включении обратной мощности, когда напряжение падает до 1% от величины, имевшей место до короткого замыкания. Как видно, неселективное действие реле произошло вследствие взаимодействия затухающей постоянной составляющей тока i_u в катушке напряжения и переменного тока i_i в катушке тока.

При опытах наблюдалось неселективное срабатывание реле и при меньших посадках напряжения, когда оно падало до 20% предварительной величины. Следует отметить, что время за

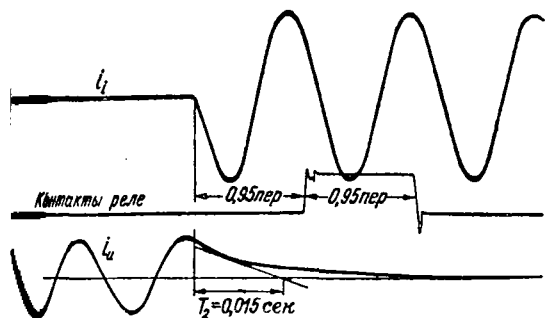


Рис. 3. Работа реле направления мощности при включении обратной мощности. Напряжение на обмотке напряжения падает до 1%, i_l — ток в катушке тока; i_u — в катушке напряжения.

падения контактов реле направления мощности (0,95 периода) достаточно для прилипания быстрого промежуточного реле, действующего на отключение выключателя.

На рис. 2 (пунктир) приведена схема, позволяющая увеличить чувствительность реле направления мощности с цилиндрическим ротором. В схеме параллельно обмотке напряжения реле включается емкость, настроенная в резонанс с ее индуктивностью. Последовательно с образованным контуром вводится активное сопротивление $R_{сн}$. Как будет показано, при таком включении обмотки напряжения можно также избежать неправильного действия реле при обратном направлении мощности.

При включенной емкости переходный ток обмотке напряжения имеет колебательный характер. Приблизительно, намагничивающий ток i_u (приложение)

$$i_u = -\frac{U_{\text{макс}}}{\omega L_u} \frac{R_s}{R_s + R_{сн}} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_c) - \frac{U_{\text{ф.макс}}}{\omega L_u} \frac{R_s}{R_s + R_{сн}} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_\phi) e^{-\frac{t}{T_{2u}}}, \quad (7)$$

R_s — эквивалентное активное сопротивление индуктивного контура, состоящего из обмотки напряжения и емкости (рис. 4),

$$T_{2u} = 2C \frac{R_s R_{сн}}{R_s + R_{сн}}.$$

Сопротивление $R_{сн}$ и емкость C подбираются по условию $T_{2u} \gg 0,01 \text{ сек}$ с тем, чтобы обеспечить достаточно медленное затухание переходного тока.

Ток в обмотке тока попрежнему выражается формулой (1). Момент от взаимодействия установившихся составляющих тока в обмотке тока и напряжения может быть найден из выражения, аналогичного (5),

$$M_y = k \frac{U_{\text{макс}} I_{\text{макс}}}{L_u} \frac{R_s}{R_s + R_{сн}} \cos(\varphi_\phi + \varphi_1). \quad (8)$$

Приблизительно момент от взаимодействия переходной составляющей тока в обмотке на-

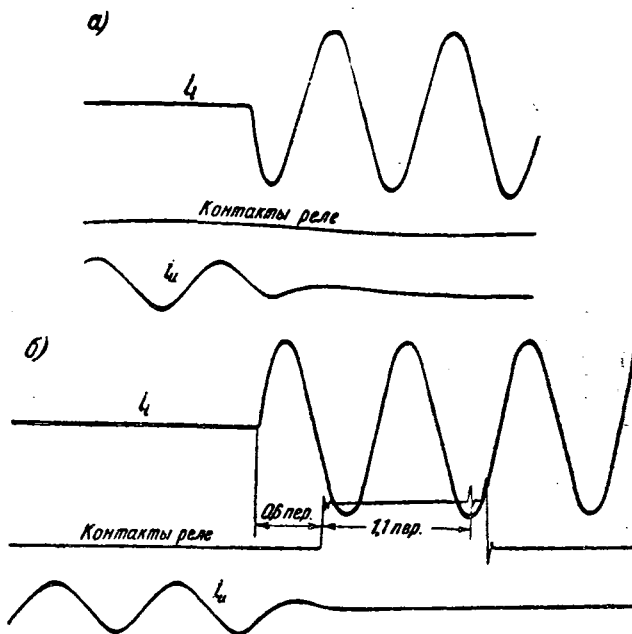


Рис. 4. Работа реле направления мощности, обмотка которой шунтирована емкостью, при включении обратной мощности (а) и прямой мощности (б). u падает до нуля; i_l — ток в катушках тока; i_u — в катушках напряжения.

пряжения с установившейся составляющей в обмотке тока

$$M_n = k \frac{U_{\text{ф.макс}} I_{\text{макс}}}{L_u} \frac{R_s}{R_s + R_{сн}} \cos(\varphi_\phi + \varphi_1) e^{-\frac{t}{T_{2u}}}. \quad (9)$$

Остальные переходные моменты не оказывают существенного влияния на работу реле.

Переходный момент, соответствующий (9), постоянен по знаку и направлен в ту же сторону, что и установившийся момент по (8), если считать, что разность углов φ_ϕ и φ_c не настолько велика, чтобы изменить знак $\cos(\varphi_\phi + \varphi_1)$. Напомним, что угол φ_ϕ образуется между геометрической разностью напряжений на обмотке напряжения реле до и в период аварии и током короткого замыкания. Если реле работает в условиях, близких к оптимальным для получения максимума установившегося момента ($\varphi_c = -\varphi_1$), то

$$\varphi_\phi - \varphi_c < \frac{\pi}{2},$$

что выполняется в большинстве случаев аварийных режимов в энергосистеме, особенно при больших посадках напряжения², когда $U_{\text{ф.макс}} \gg U_{\text{макс}}$.

Таким образом, переходный момент по (9) не только не приводит к неселективному действию реле при больших посадках напряжения, но, на-

² При малых посадках напряжения установившийся момент достигает достаточно большой величины, а потому влияние переходного момента несущественно.

оборот, действуя в ту же сторону, что и установившийся момент, увеличивает чувствительность защиты, — ликвидируется так называемая «мертвая зона» реле направления мощности.

Приведенные теоретические положения подтверждаются опытом. Осциллограмма *a* рис. 4 иллюстрирует работу реле направления мощности, включенного согласно схеме рис. 2 (пунктир) при обратном направлении мощности. Напряжение на реле падает до нуля; неселективного действия не происходит. Осциллограмма *b* рис. 4 снята при тех же условиях, что и осциллограмма на рис. 3, но при прямом направлении мощности. Реле замыкает контакты за время 0,6 периода. Продолжительность замыкания составляет 1,1 периода и вполне достаточна для прилипания промежуточного реле.

Из изложенного может быть сделан вывод, что для индукционного однофазного реле направления мощности с цилиндрическим ротором для повышения надежности его действия может быть рекомендовано включение резонансного контура в цепь обмотки напряжения согласно схеме рис. 2 (пунктир).

Приложение. Вычисление переходной составляющей тока в обмотке напряжения с включенными $R_{\theta H}$ и C .

Непосредственно из схемы замещения рис. 5 следует операционное выражение для тока i_{lu} :

$$i_{lu}(p) = U \frac{1}{R_{\theta H} + \frac{1}{pC + \frac{1}{pL_u + \frac{1}{R_{\theta}}}}} \times \\ \times \frac{R_{\theta} \frac{1}{pC}}{\left(R_{\theta} + \frac{1}{pC}\right) \left(\frac{R_{\theta} \frac{1}{pC}}{R_{\theta} + \frac{1}{pC}} + pL_u\right)} = -\frac{U}{CL_u R_{\theta H}} \times \\ \times \frac{1}{p^2 + \frac{p}{C} \left(\frac{1}{R_{\theta H}} + \frac{1}{R_{\theta}}\right) + \frac{1}{L_u C}}. \quad (10)$$

Корни знаменателя (10):

$$p_{1,2} = -\frac{R_{\theta} + R_{\theta H}}{2R_{\theta} R_{\theta H} C} \pm j \sqrt{\frac{1}{L_u C} + \frac{(R_{\theta} + R_{\theta H})^2}{4R_{\theta}^2 R_{\theta H}^2 C^2}} = \\ = -\frac{1}{T_{2u}} \pm j\gamma,$$

где

$$T_{2u} = 2C \frac{R_{\theta} R_{\theta H}}{R_{\theta} + R_{\theta H}}; \quad \gamma = \sqrt{\frac{1}{L_u C} - \frac{1}{T_{2u}^2}} = \\ = \sqrt{\gamma_0^2 - \frac{1}{T_{2u}^2}}; \quad \gamma_0 = \sqrt{\frac{1}{L_u C}}.$$

Применяя теорему разложения и подставляя вместо U

$$U_{\phi} = U_{\phi, \max} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_{\phi}),$$

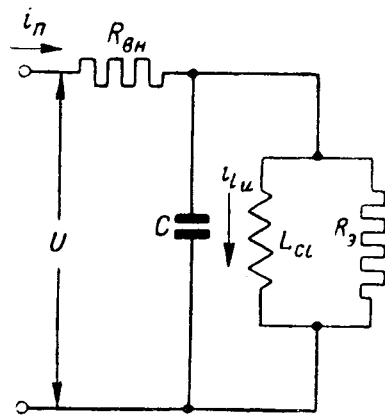


Рис. 5. Схема замещения обмотки напряжения реле шунтированной емкостью (i_{lu} — намагничивающий ток).

получим следующее выражение для переходной составляющей тока:

$$i_{luH} = -\frac{U_{\phi, \max}}{2\gamma L_u C R_{\theta H}} e^{-\frac{t}{T_{2u}}} \times \\ \times \left[-\frac{e^{j(\gamma t + \alpha + \varphi_{\phi})}}{j \left[\frac{1}{T_{2u}} + j(\gamma - \omega) \right]} + \frac{e^{j(-\gamma t + \alpha + \varphi_{\phi})}}{j \left[\frac{1}{T_{2u}} + j(\gamma + \omega) \right]} \right].$$

Мнимая часть (11) дает формулу

$$i_{luH} = \frac{U_{\phi, \max}}{2\gamma L_u C R_{\theta H}} e^{-\frac{t}{T_{2u}}} \times \\ \times \left[-\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{T_{2u}^2} + (\gamma - \omega)^2}} \cos(\gamma t + \alpha + \varphi_{\phi} + \beta_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{T_{2u}^2} + (\gamma + \omega)^2}} \cos(\gamma t - \alpha - \varphi_{\phi} + \delta) \right],$$

где

$$\beta = \arctg(\gamma - \omega) T_{2u}, \\ \delta = \arctg(\gamma + \omega) T_{2u}.$$

Предположим, что мы выбрали постоянные контуры таким образом, что собственная частота контура $\gamma = \omega$. Кроме того, постоянная времени T_{2u} достаточно велика, чтобы обеспечить срабатывание реле от переходных токов ($T_{2u} \geq 0,01$ сек). Тогда мы можем пренебречь вторым членом (12) и считать, что имеет место резонанс токов ($\gamma_0 = \gamma = \omega$).

При этом (12), принимая во внимание (13) и значение T_{2u} , переходит в

$$i_{luH} = -\frac{U_{\phi, \max}}{\omega L_u} \frac{R_{\theta}}{R_{\theta} + R_{\theta H}} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_{\phi}) e^{-\frac{t}{T_{2u}}}. \quad (15)$$

Установившийся ток, как легко видеть из схемы рис. 5, будет:

$$i_{luu} = -\frac{U_{\max}}{\omega L_u} \frac{R_{\theta}}{R_{\theta} + R_{\theta H}} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_{\phi}). \quad (16)$$

Суммирование (15) и (16) дает формулу (7)

[10. 8. 1]



Контроль влажности изоляции по методу „емкость—частота“

Инж. В. Б. КУЛАКОВСКИЙ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Увлажненность — одна из наиболее важных характеристик изоляции. Методики определения увлажненности изоляции электрических машин и трансформаторов уделяет большое внимание. Широко внедряются емкостные методы контроля влажности.

Метод емкость — температура [Л. 3, 4, 7], предложенный в 1945 г. Московским трансформаторным заводом им. Куйбышева для решения вопроса установки вопроса о сушке трансформаторов, транспортируемых без масла, был описан в журнальной литературе. По данным автора, если при нагреве трансформатора с 20° С до 70—80° С его емкость, измеренная на частоте 50 гц, меняется не более чем на 20%, то трансформатор можно считать не требующим сушки. Этот метод был рекомендован Министерством электрификации для применения в энергосистемах и получил довольно широкое распространение. Недостатком нагрева испытуемого объекта является серьезным недостатком метода.

В ЦНИЭЛ МЭС по заданию Технического комитета МЭС производились исследования метода емкость — температура в процессе которых выяснилось, что имеется возможность производить контроль влажности изоляции, не нагревая ее, измеряя частотные изменения емкости [Л. 3]. Этот метод контроля влажности, который может быть назван методом «емкость — частота», был усовершенствован и проверен на ряде трансформаторов при помощи прибора, описанного ниже. Изменение диэлектрической проницаемости изоляции по частоте и температуре можно объяснить явлением внутрислойной поляризации [Л. 1]. Внутрислойная поляризация имеет место в неоднородных диэлектриках, и особенно таких, у которых неоднородность обусловлена наличием в толще их вкраплений полупроводящего вещества (например, воды) [Л. 3, 6]. В та-

Приведены результаты исследований метода контроля влажности изоляции по зависимости емкости от частоты. Установлено, что при измерениях по схеме заряд — разряд зависимость емкости от частоты выражена более резко, чем при измерениях на синусоидальном переменном токе. Показано, что для контроля влажности изоляции при температуре 15—20° С достаточно замерить значения емкости при частотах 2 и 50 гц. Приводится описание аппаратуры для измерений по методу емкость — частота и результаты применения этого метода для определения увлажнения изоляции трансформаторов.

ризации и смещения, происходит медленный процесс накопления зарядов на границах раздела диэлектрического и полупроводящего вещества, т. е. на поверхности вкраплений. Наличие этих зарядов увеличивает диэлектрическую проницаемость диэлектрика. Особенно значительное увеличение ее в тех случаях, когда имеются вкрапления в виде тонких нитей или пленок, образованных веществом со сравнительно большой проводимостью [Л. 5]. Это характерно для увлажненного волокнистого материала, в котором влага располагается в весьма тонких внутренних полостях, образуя извилистые нити. Опыт показывает, что наличие нескольких процентов влаги в волокнистом материале может вызвать увеличение его диэлектрической проницаемости во много раз. Например, возрастание влажности образцов бязевой ткани с 0,9 до 11,2% вызвало увеличение емкости конденсатора, в котором ткань служила диэлектриком, почти в 17 000 раз [Л. 2] (измерение емкости производилось баллистическим гальванометром).

Как уже указывалось, внутрислойная поляризация является весьма медленным процессом, длительность которого может составлять десятки и сотни минут. Для того чтобы внутрислойная поляризация проявилась на переменном токе, период его должен быть достаточно велик. Вследствие этого она почти совершенно не сказывается на высоких частотах; сколько-нибудь заметные проявления ее начинаются со звуковых частот. На промышленных частотах внутрислойная поляризация уже существенным образом сказывается на диэлектрической проницаемости и угле потерь увлажненного диэлектрика. При постоянном токе или частотах порядка нескольких герц диэлектрическая проницаемость изоляции, содержащей несколько процентов влаги, может достигать весьма больших значений. Скорость процесса внутрислойной поляризации в значительной степени зависит от температуры: при повышении

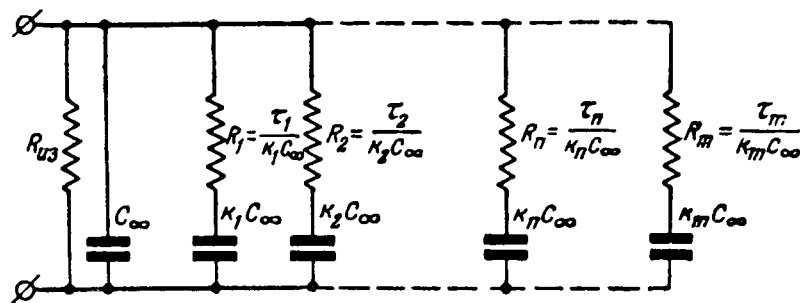


Рис. 1. Схема замещения реального увлажненного диэлектрика.

температуры проводимости веществ, входящих в диэлектрик, увеличиваются, вследствие чего процесс накопления зарядов ускоряется.

Поэтому при одной и той же частоте внутрислойная поляризация в нагретом диэлектрике успевает проявиться более полно, и диэлектрическая проницаемость его в нагретом состоянии выше, чем в ненагретом. Таким образом, емкость увлажненного диэлектрика зависит от частоты и температуры и тем резче, чем больше увлажнение и вызываемое им усиление процесса внутрислойной поляризации.

Этот вывод может быть получен также из аналитического выражения для емкости конденсатора с диэлектриком, в котором наблюдается внутрислойная поляризация.

Если в диэлектрике такого конденсатора имеются вкрапления полупроводящего вещества только одной формы, одинаковой для всего объема диэлектрика (например, в виде шариков, цилиндров, плоских слоев и т. п.), то емкость конденсатора на переменном синусоидальном токе определяется, как известно, выражением [Л. 3, 6]:

$$C = C_\infty \left(1 + \frac{k}{1 + \omega^2 \tau^2} \right),$$

где C_∞ — геометрическая емкость, определяемая, как емкость на высокой (теоретически бесконечной) частоте;

ω — круговая частота переменного тока, при которой производятся измерения;

τ — постоянная времени процесса внутрислойной поляризации, зависящая от формы вкраплений и свойств диэлектрика и полупроводящего вещества;

k — постоянная последствия, зависящая от количества полупроводящего вещества (по отношению к количеству диэлектрика), от формы вкраплений и свойств диэлектрика и полупроводящего вещества.

Вкрапления полупроводящего вещества (например, влаги) могут иметь различные формы, что наблюдается у большинства реальных диэлектриков. Емкость конденсатора определяется тогда рядом, число членов которого зависит от числа форм вкраплений m :

$$C = C_\infty \left(1 + \sum_{n=1}^m \frac{k_n}{1 + \omega^2 \tau_n^2} \right).$$

Этому случаю соответствует схема замещения диэлектрика, представленная на рис. 1.

Понижение частоты вызывает увеличение емкости. Повышение температуры влечет за собой уменьшение постоянных времени τ , что приводит к увеличению емкости. Коэффициенты k_1, k_2, \dots, k_n могут служить, очевидно, количественной оценкой действия внутрислойной поляризации, иначе говоря, показателем неоднородности диэлектрика.

Сумма их

$$\sum_{n=1}^m k_n = K$$

(постоянная последствия) должна служить рошей характеристикой увлажненности диэлектрика, будучи пределом отношения $\frac{C - C_\infty}{C_\infty}$ при

частоте, стремящейся к нулю, тем самым характеризуя максимально возможное возрастание емкости при данной влажности. У однородно неувлажненного диэлектрика K должно быть равно нулю. Казалось бы, величина K может быть определена путем непосредственных измерений емкости на высокой частоте и на постоянном токе. Однако вследствие длительности процесса внутрислойной поляризации определение емкости на постоянном токе весьма затруднительно и приходится ограничиваться температурными или частотными изменениями емкости на переменном токе.

Метод „емкость—частота“. Емкость целесообразно измерять не мостовыми схемами при синусоидальном переменном токе, а по схеме заряд-разряд (рис. 2, а). По этой схеме измеряем емкость периодически заряжается от источника постоянного напряжения, затем разряжается гальванометр. Величина емкости может быть вычислена по показаниям гальванометра и параметрам схемы:

$$C = \frac{I}{u f},$$

где I — среднее значение тока, текущего через гальванометр;

u — зарядное напряжение;

f — частота переключений (на заряд или разряд).

Сопrotивление утечки в идеальном случае не должно влиять на показания гальванометра. Однако практически переключатель Π (рис. 2, а) срабатывает не мгновенно и показания гальванометра могут несколько уменьшиться за счет явления саморазряда в момент переключения с заряда на разряд.

Получающаяся при этом ошибка в значении емкости

$$\Delta C \% = -100 \left(1 - e^{-\frac{t_0}{rc}} \right),$$

где t_0 — время срабатывания переключателя;

r — сопротивление утечки;

C — измеряемая емкость.

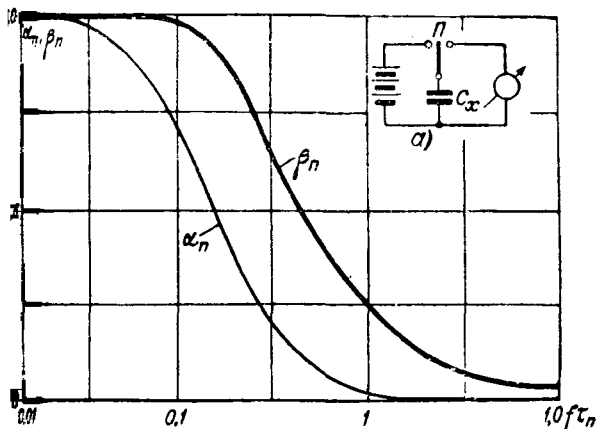


Рис. 2. Зависимость коэффициента возрастания емкости от частоты и постоянной времени (α — измерение на синусоидальном напряжении; β — по схеме заряд—разряд).

Значение емкости, измеренное по схеме заряд—разряд, не равно значению емкости на синусоидальном токе той же частоты.

Емкость, измеренная по схеме заряд—разряд,

$$= C_{\infty} \left(1 + \sum_{n=1}^m k_n \frac{1 - e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}} \right) = C_{\infty} \left(1 + \sum_{n=1}^m k_n \beta_n \right).$$

на синусоидальном токе той же частоты

$$= C_{\infty} \left(1 + \sum_{n=1}^m k_n \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_n^2} \right) = C_{\infty} \left(1 + \sum_{n=1}^m k_n \alpha_n \right).$$

Коэффициенты α_n и β_n зависят при данной постоянной времени τ_n только от частоты, они и определяют зависимость емкости от частоты.

β_n всегда больше α_n (рис. 2.), следовательно, емкость, замеренная по методу заряд—разряд, всегда больше емкости, замеренной на синусоидальном напряжении.

По мере понижения частоты β_n достигает предельного значения (единицы) при $f\tau_n \approx 0,1$, величина α_n достигает того же значения при $f\tau_n$ до 2. Следовательно, при измерении на синусоидальном напряжении требуется применение более низких частот.

Все это позволяет сделать вывод, что для изучения зависимости емкости от частоты тот заряд—разряд более выгоден, чем измерения мостиками переменного тока. Аппаратура для измерения на частотах порядка единиц герц методом заряд—разряд к тому же получается весьма простой и удобной.

На рис. 3 приведены кривые зависимости емкости от частоты для образца прессшпана при разной степени его увлажненности и температуре. В диапазоне 20...20 000 гц измерения проводились с помощью моста, в диапазоне 1,32... гц — по схеме заряд—разряд. Из кривых

¹ Вывод формулы приведен в приложении.

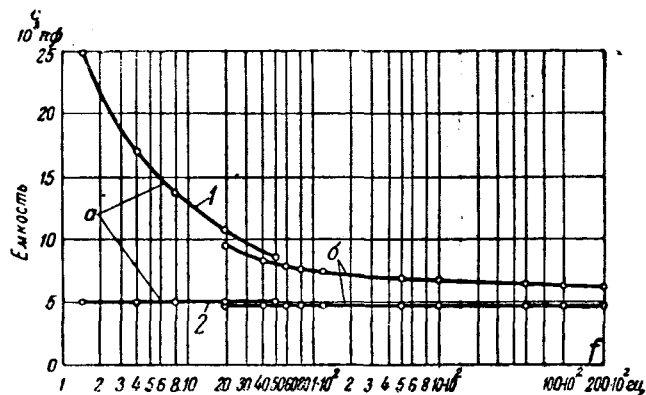


Рис. 3. Емкость в зависимости от частоты для увлажненного при влажности 5,62% (1) и сухого прессшпана (2). а — измерение по схеме заряд—разряд; б — мостиком переменного тока.

видно, что влажность существенным образом отражается на частотной зависимости емкости особенно в области низких частот.

Приведенные кривые (рис. 3) позволяют сделать вывод, что для суждения о влажности вполне достаточно знать зависимость емкости от частоты в диапазоне частот от нескольких герц до промышленных частот. На звуковых частотах в очень широком диапазоне емкость изменяется незначительно даже при сильно увлажненной изоляции. За величину, характеризующую увлажненность изоляции, может быть принято отношение емкости при низкой частоте f к емкости, замеренной на 50 гц $\left(\frac{C_f}{C_{50}} \right)$.

На рис. 4 даны значения $\frac{C_f}{C_{50}}$ для различных частот, полученные при измерениях емкости обмотки 220 кВ трансформатора 220/110/10 кВ, 40 000 кВА относительно корпуса. Замеры производились до сушки трансформатора (кривая 1, рис. 4) и после сушки и заливки маслом (2, рис. 4).

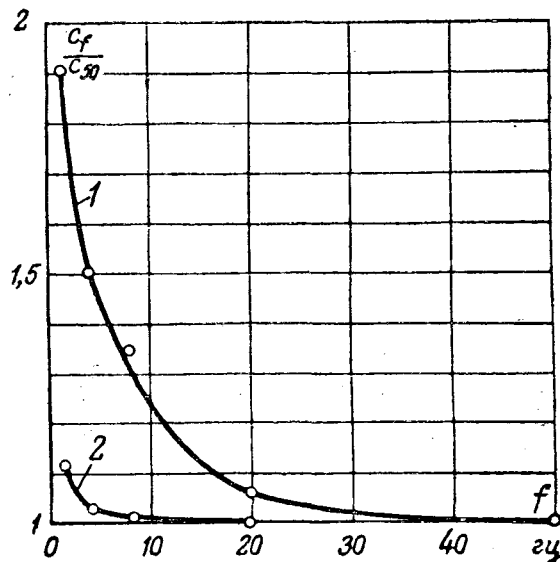


Рис. 4. Отношение емкостей $\frac{C_f}{C_{50}}$ в зависимости от частоты для обмотки 220 кВ трансформатора 220/110/10 кВ, 40 000 кВА до сушки при температуре 23° С (кривая 1) и после его сушки (26° С).

которых случаях в пределах $3 \dots 5^\circ \text{C}$. Замерялась емкость каждой обмотки на землю при неизменных остальных обмотках. В дальнейшем принимается в расчет лишь максимальное значение $\frac{C_2}{C_{50}}$, полученное для обмоток трансформатора. Измерения показали, что 85% всех трансформаторов имеют максимальное значение $\frac{C_2}{C_{50}}$ ниже 1,2, для остальных оно лежит в пределах 1,2—1,3.

У трансформаторов, не проходивших сушку, величина $\frac{C_2}{C_{50}}$ имеет, как правило, большее значение. Например, у трансформатора ТДТГ-31500/110 были получены следующие значения $\frac{C_2}{C_{50}}$:

Напряжение обмотки, кВ	C_2/C_{50}	
	до сушки и пропитки	после сушки и заливки
110	1,4	1,07
35	1,46	1,04
6	1,44	1,04

До сушки температура обмоток составляла 15°C , после сушки 21°C ; во время сушки вышло 12 л влаги.

На рис. 7 представлены максимальные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для 16 трансформаторов различной мощности, на которых измерения производились также дважды: первый раз — до сушки и пропитки, второй раз — после сушки, пропитки и заливки маслом в полностью собранном состоянии.

Во всех случаях величина $\frac{C_2}{C_{50}}$ в результате сушки значительно снижается. Были испытаны также пять трансформаторов мощностью от 1000 до 2000 кВ, в течение нескольких лет находившиеся без масла по разным причинам. Максимальные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для этих трансформаторов лежат в пределах 1,43—2,55 при температуре обмоток от 16 до 30°C .

В качестве примера можно привести данные трансформатору 1000 кВ, 6/3 кВ производства МТЗ, который в течение нескольких лет стоял без масла. При температуре обмоток 20°C значение $\frac{C_2}{C_{50}}$ для обмотки 6 кВ равно 2,2, для обмотки 3 кВ — 2,02.

Величина $\frac{C_2}{C_{50}}$ возрастает с температурой, особенно у увлажненной изоляции. На наличие такой зависимости указывают аналитические выражения для отношения емкостей при разных частотах.

Синусоидальный ток

$$\frac{C_{f_2}}{C_{f_1}} = \frac{1 + \sum_{n=1}^m \frac{k_n}{1 + 4\pi^2 f_2^2 \tau_n^2}}{1 + \sum_{n=1}^m \frac{k_n}{1 + 4\pi^2 f_1^2 \tau_n^2}}.$$

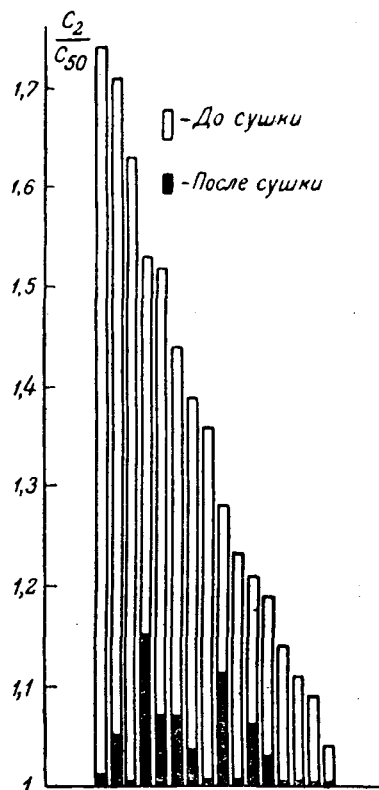


Рис. 7. Максимальные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для шестнадцати различных трансформаторов до сушки и пропитки маслом и после сушки и заливки.

Схема заряд — разряд

$$\frac{C_{f_2}}{C_{f_1}} = \frac{1 + \sum_{n=1}^m k_n \frac{1 - e^{-\frac{1}{2f_2 \tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f_2 \tau_n}}}}{1 + \sum_{n=1}^m k_n \frac{1 - e^{-\frac{1}{2f_1 \tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f_1 \tau_n}}}},$$

где C_{f_1} — емкость при высшей частоте f_1 ;
 C_{f_2} — емкость при низшей частоте f_2 .

Из выражений следует, что $\frac{C_{f_2}}{C_{f_1}}$ стремится к единице, когда τ_n стремятся к бесконечности или к нулю, следовательно, зависимость имеет максимум по τ_n . При обычных соотношениях рабочие точки лежат на спадающей части кривой, где росту τ_n соответствует уменьшение $\frac{C_{f_2}}{C_{f_1}}$.

Повышение температуры приводит к уменьшению значений τ_n и росту $\frac{C_2}{C_1}$.

Очевидно, что температурная зависимость будет определяться также коэффициентами k_n ; чем больше значения k_n (т. е. чем больше

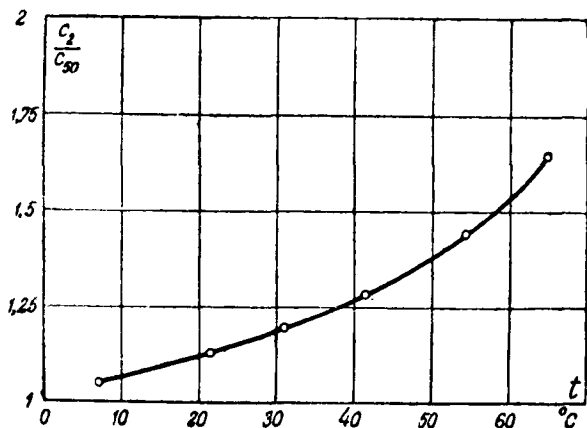


Рис. 8. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ в зависимости от температуры для прессшпана влажностью 3,6%.

увлажненности), тем эта зависимость резче. При $k_n = 0$ емкость не зависит ни от температуры, ни от частоты.

Кривая рис. 3 показывает, что $\frac{C_2}{C_{50}}$ зависит

от температуры даже при данной сравнительно небольшой влажности.

Влияние температуры. На рис. 9 дан ряд значений $\frac{C_2}{C_{50}}$, полученных на трансформаторах с различной увлажненностью при разных температурах. Точки, относящиеся к одним и тем же обмоткам, соединены пунктирными линиями. Из рисунка видно, что наибольшая зависимость $\frac{C_2}{C_{50}}$ от температуры наблюдается у трех увлажненных трансформаторов (из числа 10 трансформаторов, данные которых приведены). Не сколько меньше температурная зависимость у новых, еще непропитанных трансформаторов в начальной стадии их сушки на заводе.

У трансформаторов, прошедших сушку, и еще не пропитанных и не залитых маслом, $\frac{C_2}{C_{50}}$ мало зависит от температуры: даже при температурах 90...100°C $\frac{C_2}{C_{50}}$ не поднимается выше значения 1,3. После пропитки и заливки трансформаторов маслом, прошедших сушку, темпе

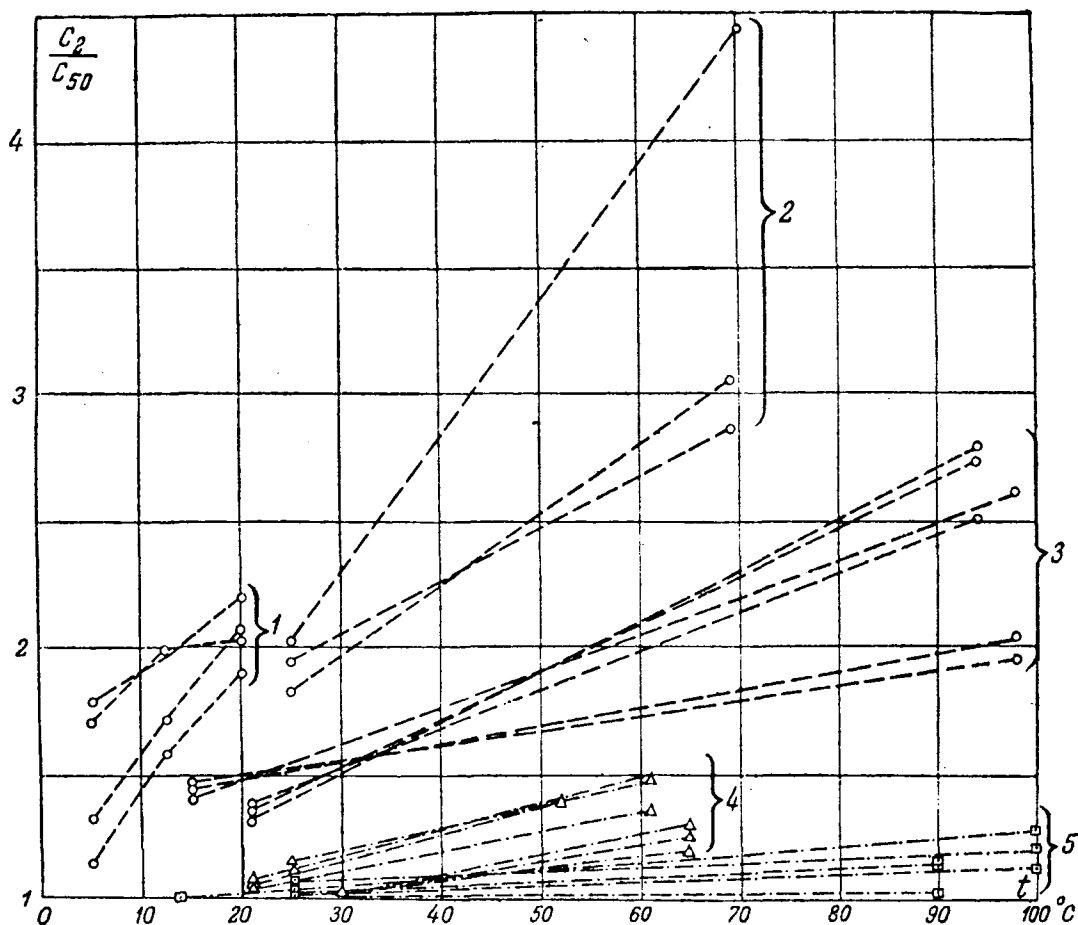


Рис. 9. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ при различных температурах для некоторых трансформаторов.

1 — увлажненные трансформаторы, несколько лет стоявшие не залитые маслом; 2 — увлажненный трансформатор, несколько лет стоявший не залитый маслом (начало сушки в собственном кожухе); 3 — увлажненные трансформаторы без масла (сушка в шкафу); 4 — после сушки в масле; 5 — после сушки, без масла.

турная зависимость несколько увеличивается: новых трансформаторов, залитых маслом, возрастает от значений, не превышающих 1,2, значений 1,4 ... 1,5 при нагреве от 15 ... 20° до 50 ... 60° С.

ким образом, при измерении $\frac{C_2}{C_{50}}$ необходимо учитывать температуру, при которой производится это измерение. При понижении температуры чувствительность метода значительно падает и при температурах ниже 10° С величины могут отличаться от единицы на величину, сравнимую с погрешностью измерений.

Для контроля влажности при температурах, близких к нулю и ниже нуля, требуется, видимо, переход к частотам ниже 2 гц. Измерение отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ при повышенных температурах (пока 70° и выше) может потребоваться лишь сравнительно редких случаях. В частности, в сушке трансформаторов такое измерение может быть произведено с целью определения влажности изоляции к концу сушки, до снижения температуры, в тех случаях, когда сушка велась ненормальном режиме (например, при чрезвычайно низкой температуре).

Пока нет достаточных данных, чтобы указать какое-либо значения $\frac{C_2}{C_{50}}$, которые служили бы критерием качества сушки. Можно лишь указать, что значение это должно быть выше, чем при -20° С (рис. 8).

При нормальном режиме сушки измерять $\frac{C_2}{C_{50}}$ к концу сушки не требуется, достаточным критерием сушки является неизменность сопротивления изоляции.

Влияние масла. Масло, как жидкость, практически неполярная, с малой вязкостью, не должно влиять свою диэлектрическую проницаемость частотой и температурой, во всяком случае в пределах частот от звуковых и ниже, при температурах, достаточно далеких от точки застывания (за исключением синтетических масел, обладающих дипольными свойствами [Л. 8]).

Опыты ЦНИЭЛ подтвердили, что емкость трансформаторного масла чистого или загрязненного и увлажненного практически не зависит от частоты (при температуре 20° С в диапазоне частот 1,32—50 гц по схеме заряд — разряд и 20—1000 гц на синусоидальном токе). Тем не менее, после пропитки и погружения в масло какой-либо изоляционной конструкции зависимость емкости от частоты может значительно измениться. Объясняется это, видимо, тем, что масло, имеющее сравнительно большую диэлектрическую проницаемость, заполняет различные воздушные промежутки в изоляции, вызывая тем самым перераспределение электрического поля. Проникновение поля в самом изолирующем материале должна возрасти, и, следовательно, емкость его в большей степени влияет на емкость конструкции. Таким образом, увлажнение материала и вызванное им изменение зависимо-

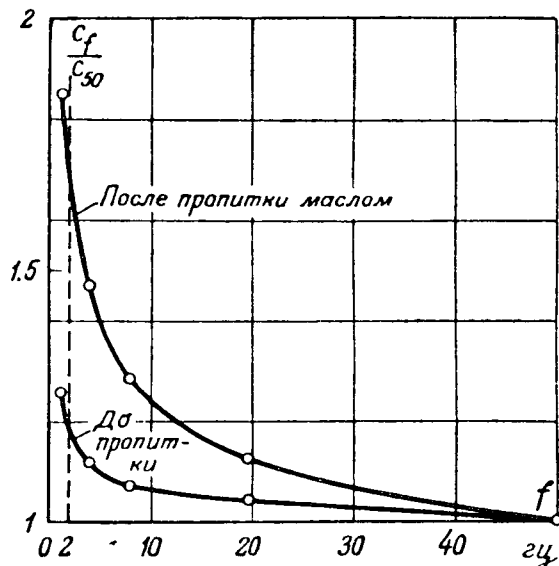


Рис. 10. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ для образца увлажненного прессшпана при 20° С до и после его пропитки маслом.

сти емкости материала от частоты и температуры при наличии масла в большей степени отражаются на зависимости емкости всей конструкции от частоты и температуры, чем при отсутствии масла.

Особенно заметно это явление при пропитке материала, когда масло заполняет многочисленные воздушные промежутки в толще его. На

рис. 10 приведены значения $\frac{C_f}{C_{50}}$ при разных частотах для образца увлажненного прессшпана до и после его пропитки при температуре 20° С. Из кривых видно, что пропитка значительно увеличивает зависимость емкости от частоты. Аналогичное явление, но в меньшей степени, наблюдается у пропитанных трансформаторов при заливке их маслом.

Применение емкостных методов к измерению миканитовой изоляции. Емкостные методы должны давать наилучшие результаты при сравнительно однородной среде с полупроводящими включениями в виде тонких, длинных нитей. Волокнистые материалы по своему строению близки к этим условиям. Ряд других материалов, в том числе и миканит, имеет другое строение. Миканит, даже совершенно сухой, не принадлежит к однородным материалам, свойства его склеивающего вещества значительно отличаются от свойств основного вещества (слоуды). Присутствие влаги не должно существенным образом влиять на емкость миканита, так как влага располагается в виде плоских слоев, почти перпендикулярных полю.

Это дает основание предполагать, что емкостными методами могут быть обнаружены лишь весьма значительные увлажнения миканитовой изоляции, как это и наблюдается в практике.

Заключение. Зависимость емкости от частоты и температуры является чувствительным показателем увлажнения изоляции класса А.

Метод емкость — температура, применяющий-ся в настоящее время наряду с другими методами контроля изоляции трансформаторов (измерение сопротивления изоляции, токов утечки, $\lg \delta$), может быть в большинстве случаев заменен (также в сочетании с другими методами) методом емкость — частота, не требующим нагрева трансформатора выше 15—20° С.

Судя по предварительным данным, он может быть применен также к электродвигателям с изоляцией класса А.

На зависимость емкости от частоты существенное влияние оказывает температура. Сильнее всего влияние температуры проявляется у трансформаторов с увлажненной изоляцией. Влияние температуры должно учитываться при оценке результатов измерения емкости. Применение метода емкость — частота при температурах ниже 15—20° С нежелательно.

Приложение

Вывод зависимости емкости от частоты для схемы заряд—разряд. Пусть конденсатор с несовершенным диэлектриком, схема замещения которого представлена на рис. 1, периодически заряжается от источника напряжением U_0 , затем разряжается на гальванометр. Частота переключений равна f гц, а времена заряда и разряда равны между собой и составляют половину периода переключений каждое.

Рассмотрим соотношения, получающиеся в установившемся режиме в одной из параллельных ветвей схемы замещения, имеющей емкость $k_n C_\infty$ и постоянную времени τ_n . Обозначим: U_{\max} — напряжение на емкости в конце заряда (или в начальный момент последующего разряда); U_{\min} — напряжение на емкости в начале заряда (или в конце предыдущего разряда).

Исходя из обычных соотношений, имеющих место при разряде емкости, можно написать:

$$U_{\min} = U_{\max} e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}.$$

С другой стороны, повышение напряжения на емкости за время заряда составляет:

$$U_{\max} - U_{\min} = (U_0 - U_{\min}) \left(1 - e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}\right).$$

Решая совместно полученные уравнения, находим:

$$U_{\max} = \frac{U_0}{1 + e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}; \quad U_{\min} = \frac{U_0 e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}.$$

Отсюда может быть получено выражение для изменения количества электричества за время разряда:

$$\Delta Q = C_\infty k_n (U_{\max} - U_{\min}) = U_0 C_\infty k_n \frac{1 - e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}.$$

Относя эту величину к зарядному напряжению, получим эквивалентную емкость рассматриваемой ветви при данной частоте переключений f :

$$C_n = C_\infty k_n \frac{1 - e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}.$$

Эквивалентная емкость для всей схемы замещения, содержащей геометрическую емкость C_∞ и m параллельных ветвей, будет:

$$C = C_\infty \left(1 + \sum_{n=1}^m k_n \frac{1 - e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}{1 + e^{-\frac{1}{2f\tau_n}}}\right).$$

Литература

1. П. В. Борисоглебский. Методы профилактики промышленной изоляции. Госэнергоиздат, 1949.
2. Е. Манкаш. Баллистический метод быстрого определения влажности материалов. Заводская лаборатория, № 4—5, 1939.
3. Л. Г. Мамиконянц. Контроль влажности изоции электрических машин и трансформаторов по измерению емкости их обмоток. Электрические станции, № 4, 1949.
4. Б. Б. Гельперин. Новый метод определения влажности изоляции. Электрические станции, № 6, 1949.
5. М. М. Михайлов и Т. Н. Дьяченко. Влагопоглощение малополярных органических электроизоляционных материалов. Электричество, № 8, 1947.
6. С. М. Брагин и др. Теория и практика проб диэлектриков. Госиздат, 1929.
7. А. В. Калантаров. Профилактические испытания изоляции крупных силовых трансформаторов. Электрические станции, № 3, 1948.
8. Справочник по электрической изоляции. Под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева. Госэнергоиздат, 1948.

(10.6.11)



Об экономичной конструкции вертикального гидрогенератора малой мощности

Кандидат техн. наук И. Д. УРУСОВ и инж. Г. И. ШУР

Завод «Уралэлектроаппарат»

Советской сельскохозяйственной энергетикой используются малые реки. В связи с этим имеет ряд задач в области разработки новых типов электрооборудования. Основной из них является задача создания более экономичной и простой конструкции гидрогенератора, на базе которой могла бы быть разработана серия малых машин на мощности от 500 квт в интервале скоростей 187—1000 об/мин для непосредственного соединения с гидротурбинами.

Авторами настоящей статьи в 1948 г. была проведена научно-исследовательская проектная работа по изысканию экономичной конструкции гидрогенератора, удовлетворяющей поставленным требованиям. В процессе работы выяснялось целесообразность применения для данного интервала скоростей и мощностей машин с наружным ротором. В результате была разработана типовая конструкция вертикальной машины, представленная на рис. 1. Существенные преимущества этой конструкции заключаются в экономии металла при одновременном увеличении выходного момента, уменьшении трудоемкости и повышении к. п. д. при ее пригодной замене существующей серии ВГС4-213 на мощность от 160 до

Приведены результаты выполненного авторами изыскания экономичной конструкции гидрогенераторов для сельской электрификации. Показаны зависимости основных размеров активных частей машины и величины махового момента. Обоснованы преимущества исполнения для нужд сельскохозяйственной гидроэнергетики машин с наружным ротором. На основе предложенной новой конструкции промышленностью будет выпускаться серия гидрогенераторов на малые мощности.

500 квт. Впоследствии, в 1949 г., на заводе «Уралэлектроаппарат» была разработана серия подобных генераторов на малые мощности, описание которой приведено в статье З. Б. Неймана и К. Ф. Костина [Л. 1].

Целью настоящей статьи является: 1) представление зависимостей, связывающих основные размеры активных частей с величиной махового момента машины и определение на основе этих зависимостей условий, при которых целесообразно применение конструкции с наружным ротором; 2) описание конструкции и сравнительный анализ технико-экономических показателей ма-

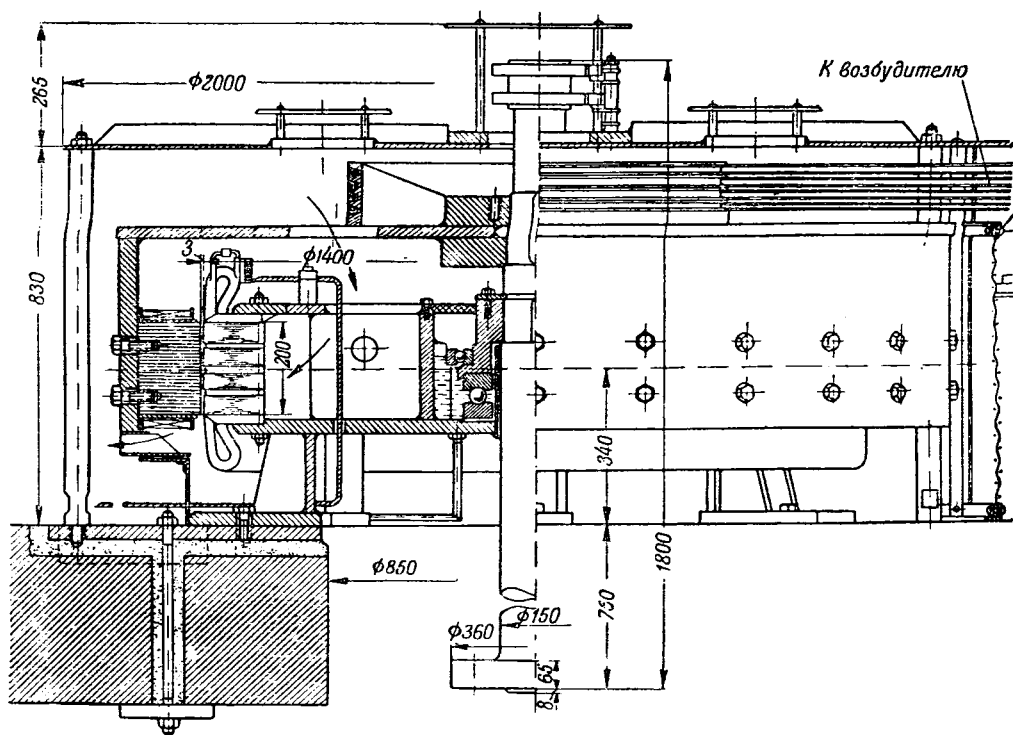


Рис. 1. Гидрогенератор 250 квт, 250 об/мин с наружным ротором, соответствующий рис. 3.

шин с наружным ротором применительно к гидрогенераторам малой мощности.

Вывод основных соотношений. Главным условием, которое ставится перед конструктором гидрогенератора, является выполнение машины с заданной величиной махового момента (GD^2). Величина махового момента условно определяется, исходя из времени, потребного для подъема числа оборотов ненагруженной машины от нуля до номинального в предположении постоянства момента вращения, равного номинальному. Это время в теории электропривода носит название «механической постоянной времени» T_m и связано с другими указанными величинами известной формулой

$$T_m = \frac{GD^2 n}{375 M_N} \text{ сек}, \quad (1)$$

где GD^2 — маховой момент, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

M_N — момент, соответствующий номинальной мощности, $\text{кв} \cdot \text{а}$;

n — номинальная скорость вращения, об/мин .

Ввиду большой механической инерции системы регулирования водяных турбин возможные в эксплуатации колебания нагрузки генератора могут сопровождаться значительными колебаниями скорости агрегата, а следовательно, частоты и напряжения. Ограничение этих колебаний достигается повышением махового момента до таких значений, при которых механическая постоянная времени гидроагрегата оказывается в пределах

$$T_m = 2 \div 5 \text{ сек}.$$

Исходя из этого, требуемый маховой момент будет определяться формулой

$$GD^2 = A \frac{P}{n^2}, \quad (2)$$

где P — номинальная мощность, $\text{кв} \cdot \text{а}$.

В соответствии с требованиями Центрального конструкторского бюро гидромашин (ЦКБГМ) коэффициент A лежит в пределах

$$A = (800 \div 2000) \cdot 10^3.$$

Эти значения A отвечают вышеуказанным пределам постоянной времени T_m .

Выясним теперь, как влияет условие (2) на соотношение основных размеров активных частей машины. При этом поставим в качестве основного требования — отсутствие дополнительного маховика или специального утяжеления ротора. Воспользуемся известным соотношением, связывающим мощность, скорость вращения и основные размеры активных частей машины:

$$P = c D_l^2 n, \quad (3)$$

где P — мощность машины, $\text{кв} \cdot \text{а}$;

D_l — диаметр расточки, см ;

l — полная длина стали статора, см ;

n — номинальная скорость вращения, об/мин ;

c — коэффициент использования

$$c = \frac{k_w a_l B_s A S}{6 \cdot 10^{11}}. \quad (4)$$

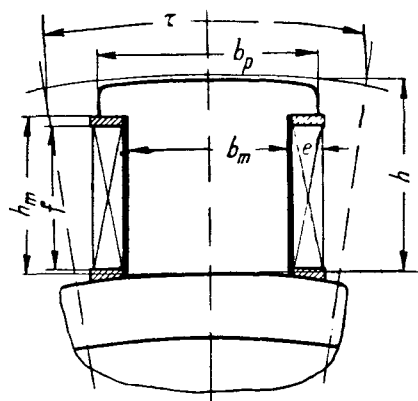


Рис. 2.

При легких сварных ободах маховой момент ротора создается преимущественно весом активной зоны (рис. 2). Без большой погрешности каждый из размеров, показанных на рис. 2, можно принять пропорциональным полюсному делению τ . В таком случае вес активной зоны ротора может быть, очевидно, выражен в виде произведения

$$G = 2p \cdot k \cdot \tau^2 l \text{ [кг]},$$

где k — постоянный коэффициент, не зависящий от абсолютных значений размеров;

$2p$ — число полюсов.

Используя соотношение (3), найдем:

$$G = \frac{k \tau^2 P}{2 p c n}.$$

Эквивалентный диаметр для расчета махового момента

$$D = \gamma D_r$$

для машины нормального исполнения $\gamma < 1$ находится обычно в пределах $0,6 \div 0,8$.

На основании (3), (6), (7) получаем выражение махового момента

$$GD^2 = \sqrt{\frac{k^3 A P^5 \gamma^6}{2 p c^5 n^5 \left(\frac{l}{\tau}\right)^2}}.$$

Выясним, какие ограничения накладывает выбор величины $\frac{l}{\tau}$ условие минимального махового момента (2). Приравнявая правые части уравнений (2) и (8), получаем искомое соотношение для $\frac{l}{\tau}$:

$$\frac{l}{\tau} = N P n,$$

где

$$N = \frac{\gamma^3}{8} \sqrt{\frac{k^3}{A^3 c^5}}. \quad (9)$$

Формула (9) дает максимальное значение $\frac{l}{\tau}$, которое можно получить в машине, если маховой момент ротора подчинить условию (2), не применяя при этом дополнительного маховика и оставаясь в то же время в рамках нормального конструктивного исполнения. Из этой формулы

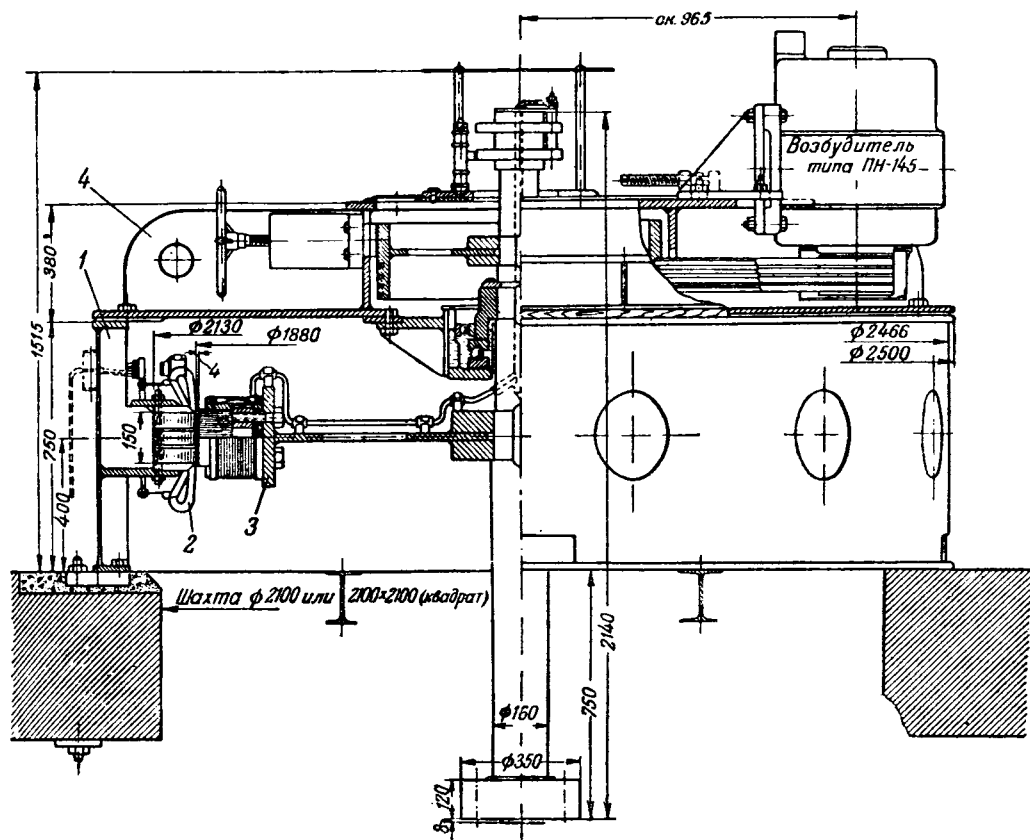


Рис. 3. Гидрогенератор 250 ква, 250 об/мин, существующее исполнение.

следует также, что при проектировании малых генераторов малой мощности возникнут затруднения (мало P_n), так как при этом представляется возможным удержать $\frac{l}{\tau}$ в экономически разумных пределах, которыми обычно принято считать величины $1 \div 1,6$.

В качестве примера выясним, какого наибольшего значения $\frac{l}{\tau}$ можно достигнуть для генератора мощностью $P = 250$ ква, $n = 300$ об/мин.

Для машины подобной мощности на основе численных данных спроектированных машин можно принять в качестве средних значений:
 $k = 7500$ кг/м³ (при гнутых ободах);
 $c = 2,2$ ква/м³ об/мин;
 $\lambda = 1300 \cdot 10^3$;
 $\eta = 0,8$.

Подставляя по формулам (9) и (10), полу-

$$N = 4 \cdot 10^{-6}, \frac{l}{\tau} = 0,3.$$

Полученное значение $\frac{l}{\tau}$ является, очевидно, не оптимальным с точки зрения расхода материалов. Кроме того, недостатком перехода на увеличенный габарит является увеличение конструктивных элементов и грузонесущей крестовины за счет больших лап, а также увеличение окружающей конструкции крепления

полюсов, в особенности при высоких угонных скоростях. Разрез такой машины представлен на рис. 3.

При стремлении сохранить отношение $\frac{l}{\tau}$ в нормальных пределах необходим переход на меньший диаметр расточки, что требует установки дополнительного маховика. Недостатком такого исполнения, кроме затраты большого количества металла на его изготовление, является: усложнение конструкции грузонесущей крестовины, повышенные нагрузки на подпятник, неудобство монтажа и пр. Разрез такой машины изображен на рис. 4.

Каким же образом можно удовлетворить этим двум противоречивым требованиям — обеспечению достаточного собственного махового момента ротора при сохранении отношения $\frac{l}{\tau}$ в экономически целесообразных пределах?

Для ответа на этот вопрос обратимся к формуле (10). Очевидно, что ни одна из величин в этой формуле не может быть произвольно изменена в такой степени, чтобы заметно поднять средний уровень отношения $\frac{l}{\tau}$. Однако коэффициент γ может быть резко увеличен, если, отказавшись от обычного исполнения машин, имеющих ротор внутри статора, перейти на исполнение с наружным ротором. Выясним на предыдущем численном примере, какой результат может быть достигнут применением

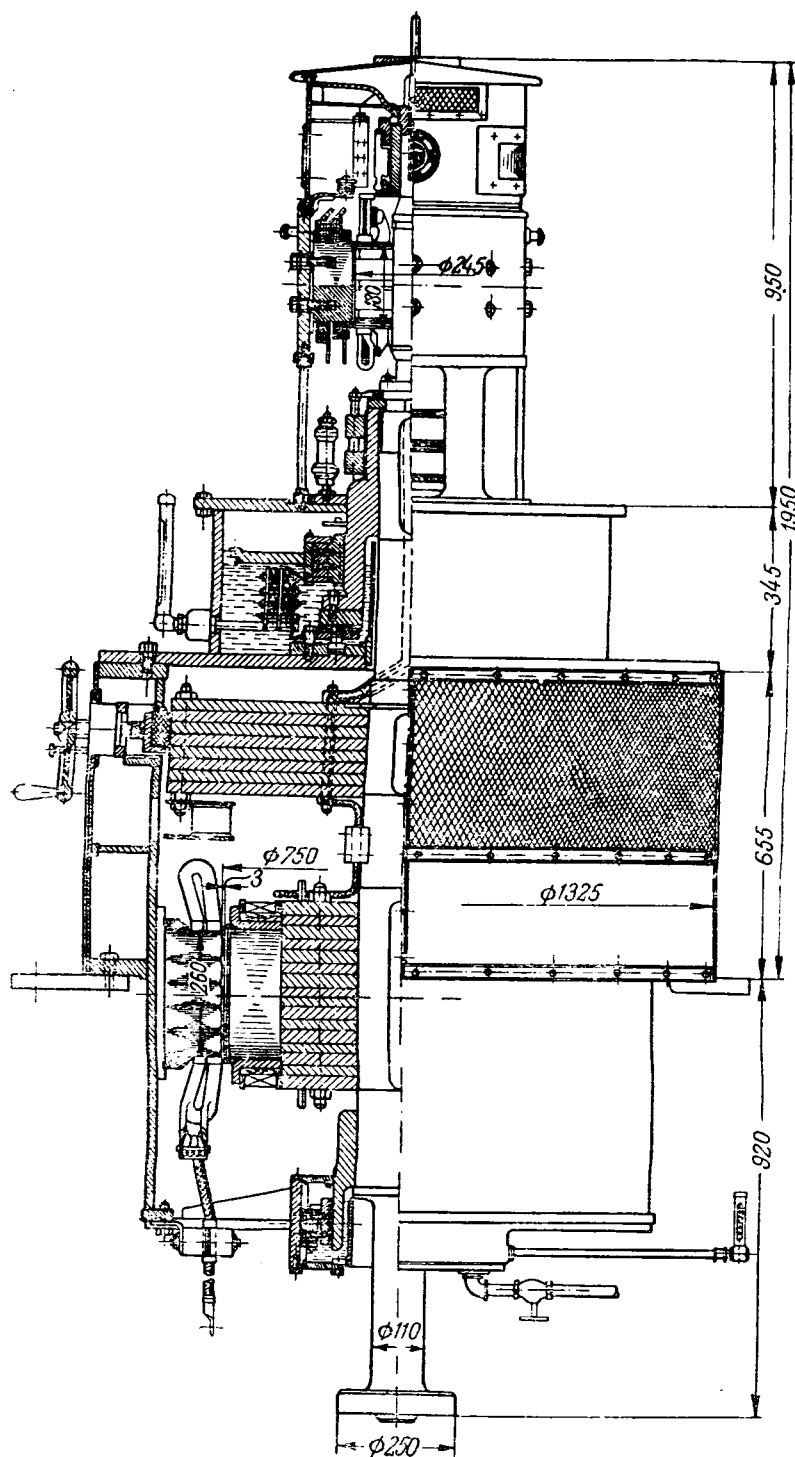


Рис. 4. Гидрогенератор 250 ква, 600 об/мин, существующее исполнение.

наружного ротора для рассмотренной машины. Учитывая, что вынос ротора наружу делает коэффициент γ больше единицы и доводит его средние значения от 0,8 до величин порядка 1,2, отношение $\frac{l}{\tau}$ может быть увеличено соответственно до практически приемлемого значения

$$\frac{l}{\tau} = \left(\frac{1,2}{0,8}\right)^3 \cdot 0,3 \approx 1.$$

Описание конструкции. Необходимо прежде всего указать, что идея нового ротора не нова. Попытки изменить ее имели место в машинах горизонтального исполнения [Л. 2]. Это обстоятельство, что неподвижная часть оказывалась при этом в машинах, затрудняло осуществление опор, что в свою очередь усложняло конструкцию машины в целом. Однако в вертикальных машинах большой мощности, у которых связь ротора с фундаментом осуществляется тем же естественным постановкой его пуском на фундамент, оказалось возможным беспрепятственно применить наружный ротор, причем внутреннее расположение статора дало возможность объединить функции механических частей статора, несущих магнитопровод с обмоткой, и грузонесущей крестовины, получив, таким образом, бесстычковую конструкцию гидротурбины.

Ниже дается краткое описание разработанной авторами в 1948 г. конструкции машины с наружным ротором, которая в дальнейшем ради сокращения названа «обращенной» машиной.

Статор, нижняя крестовина и направляющая ванна представляют собой конструктивно цельную сварную конструкцию большой жесткости и большой устойчивости. В основании статора лежит опорный лист, который не только воспринимает осевую нагрузку подшипника и передает ее на фундамент, но и удерживает в спрессованном состоянии активные стали статора. К основному листу в центральной части приваривается цилиндр масляной ванны. Подпятник и направляющий подшипник шариковые, как это и принято в гидрогенераторах подобного мощного нормального исполнения.

Технология обработки статора обеспечивает получение при сборке машины равномерного фиксированного воздушного зазора подобно горизонтальным машинам со щитовым исполнением подшипников, так как обработка посадочных стили статора и направляющей заточки для направляющего подшипника производится с одной установки. Возможность получения

равномерного воздушного зазора позволяет несколько уменьшить его абсолютную величину вследствие того, что в малых гидрогенераторах величина воздушного зазора диктуется не заданным значением о. к. з., а условиями производственного и монтажного порядка. Уменьшение воздушного зазора позволяет в свою очередь уменьшить расход активных материалов.

Конструкция ротора также весьма проста. Магнитное колесо, согнутое из листовой стали

приваляется к диску. Чтение полюсов рото-обращенной машины тельно упрощается, благодаря тому, что центрирующая сила прижимает полюсы к ободу.

В качестве возбудителя используется, как обычно, машина постоянного тока серийного изготовления типа ПН, которая приводится во вращение от вала генератора клиноременной передачей.

При торможении обращенного гидрогенератора производится ручным тормозом.

В качестве тормозной поверхности используется наружная поверхность обода ротора.

Для предотвращения случайных прикосновений обслуживающего персонала вращающимся частям генератор закрыт легким защитным кожухом.

Такая конструкция обладает следующими преимуществами и с точки зрения вентиляции:

Холодный воздух вначале проходит через полюсы статора, охлаждая его обмотку, а затем попадает на обмотку ротора. Такой порядок прохода воздуха весьма желателен, так как обмотка статора обычно класса А, а изоляция ротора — класса В.

Вентилирующее действие полюсов более эффективно, так как полюсы расположены на большом диаметре.

Охлаждение самих полюсов улучшено за счет большей величины междуполюсных окон, а также за счет большей окружной скорости середины полюсов.

Конструкция ротора предусматривает удобное место для установки центробежного вентилятора. Такая возможность создает предпосылки для дальнейшего повышения существующих норм тепловых нагрузок.

Необходимо отметить, что, несмотря на некоторое повышение вентиляционных потерь в гидрогенераторах с наружным ротором, общий КПД таких генераторов несколько повышается благодаря более рациональной геометрии активных элементов машины.

В таблице приведены сравнительные данные для нормальной и «обращенной» конструкции: 50 кВА, 250 об/мин соответственно рис. 1 и 3; 250 кВА, 600 об/мин соответственно рис. 4 и 5. В качестве образцов машин нормальной конструкции взяты машины завода «Уралгидроаппарат» (рис. 3) и завода «Электросила» (рис. 4).

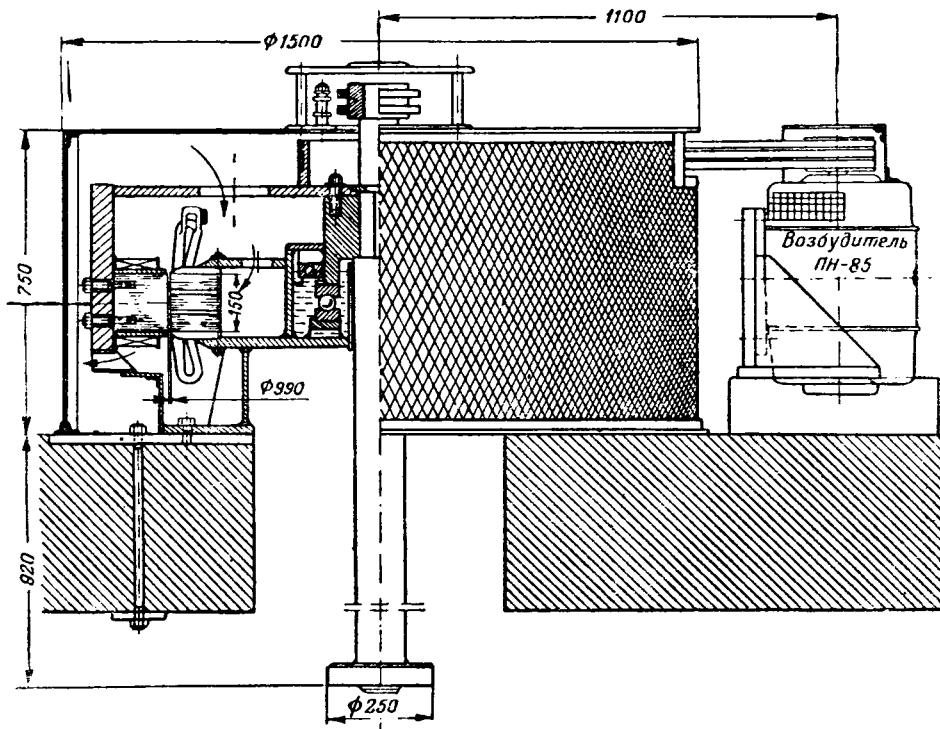


Рис. 5. Гидрогенератор 250 кВА, 600 об/мин с наружным ротором.

Характеристика генератора	250 кВА, 250 об/мин		250 кВА, 600 об/мин	
	Исполнение	Обращенное	Обращенное	Обращенное
Показатели	ВГС-213/15-24	Обращенное	СВ-99/24-10	Обращенное
Общий вес, т . .	7,0	5	5,9	3,0
Маховой момент, т.м ²	3,8	4,6	0,8	1,7
Коэффициент полезного действия, % . . .	88,5	90	83,4	90,5

Заключение. Предложенная типовая конструкция обращенного гидрогенератора обладает рядом следующих технико-экономических преимуществ:

1. Повышение $\frac{I}{\tau}$ до экономически целесообразных значений, обеспечивающих лучшее использование активных и изоляционных материалов и снижение их веса.

2. Значительное снижение конструктивного веса благодаря развитию корпуса статора не наружу, как это имеет место в обычном исполнении, а внутрь машины и отсутствию отдельного грузонесущего узла крестовины. Снижение общего веса машин, учитывая экономию активных материалов, достигает в среднем 30—40%.

3. Существенное увеличение махового момента, повышающее эксплуатационную надежность генератора.

4. Улучшение условий вентиляции, создающее возможность дальнейшего увеличения теплового использования машины.

5. Упрощение технологии изготовления и значительное снижение трудоемкости.

6. Вследствие изъятия обслуживаемого узла нижней крестовины облегчаются условия эксплуатации, а также упрощается строительная часть станции.

7. Из полученных выше соотношений [формулы (9) и (10)] следует, что при мощностях выше 1 000 *кв*а затруднения, связанные с обеспечением рациональных соотношений, исчезают.

8. При мощностях, меньших, 200 *кв*а, может оказаться более целесообразным применение быстросходных генераторов с тем или иным видом передачи, что обычно и осуществляется на практике.

9. Таким образом, предлагаемая здесь конструкция гидрогенератора с наружным ротором

наиболее эффективно может быть исполнена в интервале мощностей 150—1 000 *кв*а и в первую очередь для модернизации серий гидротурбин, выпускаемых заводом «Уралэлектромашин» для сельского хозяйства.

Все перечисленные преимущества позволяют считать данную конструкцию заслуживающей внимания электромашиностроительных и проектных организаций.

Литература

1. З. Б. Нейман и К. Ф. Костин. Гидротурбины для сельской электрификации. Электричество, 1950.

2. Е. А. Алексеев. Конструкция электромашин. ГЭИ, 1949.



Переходные процессы в электрических системах содержащих вращающиеся машины переменного тока

Кандидат техн. наук Е. Я. КАЗОВСКИЙ

Ленинград

За последние два десятилетия теория переходных процессов в бесколлекторных машинах переменного тока обогатилась рядом исследований, позволивших аналитически рассмотреть многие сложные физические явления.

Особенно плодотворным оказалось преобразование переменных в основных дифференциальных уравнениях синхронной и асинхронной машин к вращающимся осям, в частности к осям, вращающимся вместе с ротором. При таком преобразовании переменных дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами для многих режимов становятся линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Однако не были разработаны аналитические методы исследования системы машин, вращающихся с разными скоростями, и машин, работающих на нагрузках в общем случае. Очевидно, что в этом случае для устранения периодических коэффициентов в уравнениях следует преобразовать дифференциальные уравнения к вращающимся осям.

В разработке простой методики рассмотрения элементов электрической системы, содержащей машины, во вращающихся осях уже давно назрела острая необходимость. Отсутствие такой

В области теории переходных процессов бесколлекторных электрических машин плодотворное применение получило преобразование переменных в основных дифференциальных уравнениях к вращающимся осям. Преобразование обращает дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами в линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. В статье метод получает развитие для анализа переходных процессов в системе, состоящей из вращающихся машин и нагрузки. Решение дается в виде комплексных операторных уравнений, позволяющих пользоваться простыми эквивалентными схемами. Даны примеры применения.

методики приводило к необходимости для каждой конкретной электрической системы заново составлять соответствующие дифференциальные уравнения с учетом переходных процессов в машинах.

В статье излагается метод расчета переходных процессов в системе, состоящей из вращающихся

машин и нагрузки, помощью комплексных операторных уравнений, имеющих наглядный физический смысл и позволяющих пользоваться простыми эквивалентными схемами. Представлены примеры применения предлагаемого метода. В частности рассмотрен процесс включения асинхронной машины в сеть, питаемую генератором соизмеримой мощности.

Допущения и замечания. 1. Электродвижущие силы, создаваемые в системе вращающимися магнитными обмотками, образуют в установившемся режиме при независимом возбуждении системы напряжений прямой последовательности.

2. Внешние э. д. с., действующие в роторных цепях, при отсутствии специальной оговорки принимаются постоянными.

3. На статорах машин имеется по одной системе синусоидальных обмоток, т. е. обмотки создающих синусоидально распределенные в пространстве н. с.

4. Насыщение в стали элементов системы учи-
ается только выбором соответствующих па-
ров.

5. Потери в стали элементов системы не учи-
тываются.

6. Скорость вращения роторов в тех случаях,
когда это специально не оговаривается, прини-
мается постоянной.

7. Статические элементы системы создают
асимметричную нагрузку. Это значит, что все со-
бственные активные и реактивные сопротивле-
ния в фазах a, b, c являются одинаковыми,
значения элементов, расположенных в разных фа-
зах, друг на друга является одинаковым.

Общие замечания. 1. Рассмотрение ведется
в относительных единицах. За единицу времени
принимается электрический радиан (при 50 гц —
сек).

2. При записи операторных уравнений обо-
значения для операторных эквивалентов токов,
напряжений и потокосцеплений не отличаются от
обозначений оригиналов, являющихся функциями
времени, как это принято в современной теории
электрических машин. Несмотря на известную
похожесть подобной записи, применение ее це-
лесообразно, так как она существенно упрощает
уравнений, а возможность ошибки, связан-
ной с такой записью, практически исключена.

3. При преобразовании операторных уравне-
ний в различных системах вращающихся осей
символически записанных уравнениях могут
появляться коэффициенты, являющиеся функцией
времени.

Такие символические операторные уравнения,
несмотря на ограниченный смысл их с точки зре-
ния непосредственного раскрытия в функции вре-
мени, дают удобную запись и в ряде случаев
могут быть решены путем преобразования пере-
менных, благодаря определенным условиям сим-
метрии в машине.

4. Для удобства пользования символической
записью дифференциальных уравнений началь-
ные условия рассматриваемого процесса всегда
принимаются нулевыми. Учет начальных условий
вводится методом наложения.

5. Короткие замыкания могут быть просто
рассчитаны по предлагаемой методике при поль-
зовании принципом наложения для случаев, когда
параметры статических элементов системы
одинаковы во всех фазах. Несимметричные ко-
эффициенты замыкания также могут быть рассчитаны,
рассматривая точку короткого замыкания как
источник напряжений прямой, обратной и нуле-
вой последовательности. При этом раскрытие
операторных выражений может быть в общем
случае представлено в функции времени только
в виде сходящегося ряда.

6. Система напряжений нулевой последова-
тельности создает токи, не зависящие от ротор-
ных параметров машин и от скорости вращения,
как при принятых допущениях н. с. нулевой
последовательности в воздушном зазоре машин
туда равна нулю.

Некоторые определения и обозначения

1. Статические элементы системы, создающие
симметричную нагрузку, и вращающиеся эле-
менты с симметричным ротором называются
симметричными элементами.

2. Система осей, в которой одна из осей
совпадает с продольной осью ротора d , а вто-
рая с поперечной осью ротора q , называется
собственной системой осей машины.

3. Система осей, вращающихся с положи-
тельной скоростью, равной единице, называется
синхронной системой осей.

4. Величины в собственной системе осей харак-
теризуются индексом s , в неподвижной системе
осей — индексом σ , в синхронной системе осей —
индексом u .

5. Реальная и мнимая оси в собственных осях
характеризуются индексами d и q , в неподвиж-
ных прямоугольных осях — индексами α и β .

6. При отсутствии специального указания под
системой осей понимается система прямоуголь-
ных осей.

7. Сопряженные комплексные величины обо-
значаются звездочками.

8. Под операторным изображением¹ $f|p|$
функции $F|t|$ подразумевается изображение, со-
ответствующее преобразованию

$$f|p| = p \int_0^{\infty} F|t| e^{-pt} dt.$$

В этом случае при нулевых начальных усло-
виях изображение линейных дифференциальных
уравнений с постоянными коэффициентами можно
получить подстановкой

$$\frac{d}{dt} \div p.$$

Основные положения. 1. Токи, потокосцепле-
ния и напряжения электрической машины, соот-
ветствующие вращающимся синусоидально рас-
пределенным в пространстве волнам н. с., можно
характеризовать комплексами, которые связаны
комплексными дифференциальными уравнениями.

Комплексы эти могут быть определены своими
проекциями на реальную и мнимую оси, которые
образуют систему пространственных осей, вра-
щающихся с выбранной произвольной скоростью.

2. Решение дифференциальных уравнений,
связывающих токи и напряжения в машине, су-
щественно упрощается, если ввести понятия ком-
плексных операторных сопротивлений.

При пользовании операторными комплексны-
ми сопротивлениями электрические системы, со-
держащие вращающиеся машины переменного
тока, могут быть представлены эквивалентными
схемами, изображенными на рис. 1, 2.

В этих схемах операторные сопротивления
являются, как правило, комплексными величина-
ми и получаются преобразованием исходных ком-
плексных операторных уравнений к единой си-
стеме вращающихся осей, как указано ниже.

¹ В статье везде принято аргумент функции заклю-
чать в прямые скобки.

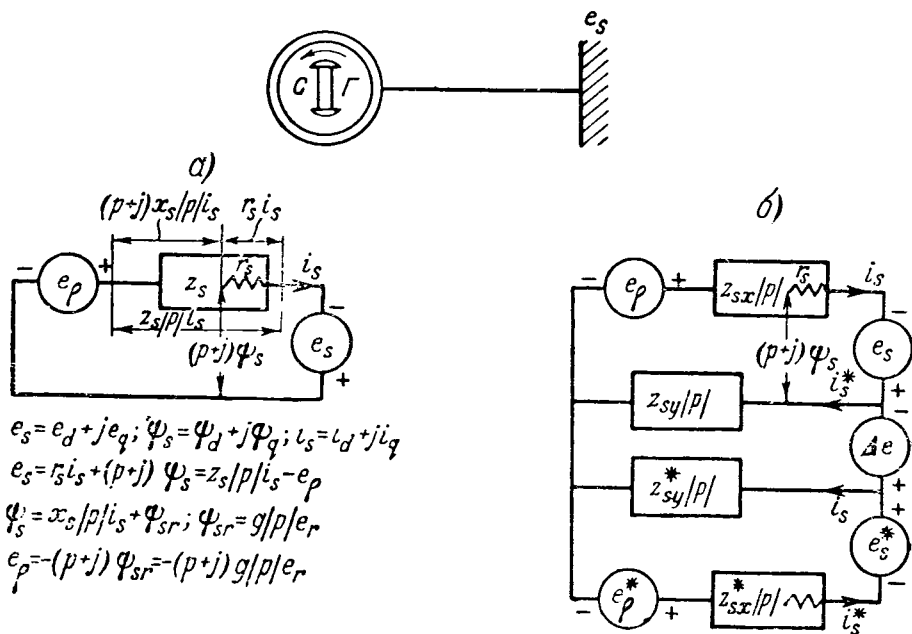


Рис. 1. Эквивалентная схема синхронной машины, включенной в бесконечно мощную сеть при симметричном (а) и асимметричном роторе (б).

$$\psi_s = x_s / p \iota_s + y_s / p \iota_s^*; x_s / p = \frac{x_d / p + x_q / p}{2}$$

$$y_s / p = \frac{x_d / p - x_q / p}{2}; e_s = z_{sx} / p \iota_s + z_{sy} / p \iota_s^* - e_p;$$

$$z_{sx} / p = r_s + (p+j) x_s / p; z_{sy} / p = (p+j) y_s / p$$

Предлагаемый метод является обобщением символических методов, принятых в электротехнике, как это видно из таблицы.

3. Для преобразования операторных сопротивлений симметричных элементов к вращающимся осям достаточно заменить операторное выражение z/p на $z/p + j s_v$, где s_v — скорость вращения выбранной системы осей по отношению к рассматриваемому элементу.

Для статических элементов при синхронно вращающейся системе осей $s_v = 1$. Для вращающихся элементов, обладающих симметричным

ротором, вращающимся со скоростью ω_r , и синхронно вращающейся системе осей $s_v = (1 - \omega_r)$.

4. Операторные выражения z/p для статических элементов системы в неподвижных осях составляются по обычным правилам операторного исчисления.

Пример. Емкость C соответствует операторному сопротивлению $\frac{1}{Cp}$; индуктивность соответствует xp ; индуктивность в трехфазной системе с собственной индуктивностью фаз x_L индуктивностью взаимной индукции между фазами x_m соответствует $(x_L - x_m)p$ и т. д.

В синхронно вращающихся осях имеем соответственно

$$\frac{1}{C(p+j)};$$

$$x(p+j);$$

$$(x_L - x_m)(p+j) \text{ и т. д.}$$

5. Операторные реактивности x/p симметричных вращающихся элементов в собственных осях, иначе говоря, в осях, связанных с собственным ротором, имеют тот же вид, что и операторные реактивности соответствующих статических трансформаторов, выраженные в собственной для трансформатора неподвижной системе осей. Соответствующие операторные сопротивления имеют для вращающихся элементов $z_s/p = r_s + (p+j\omega_r) x_s/p$ вместо $z/p = r + p x/p$ для трансформаторов.

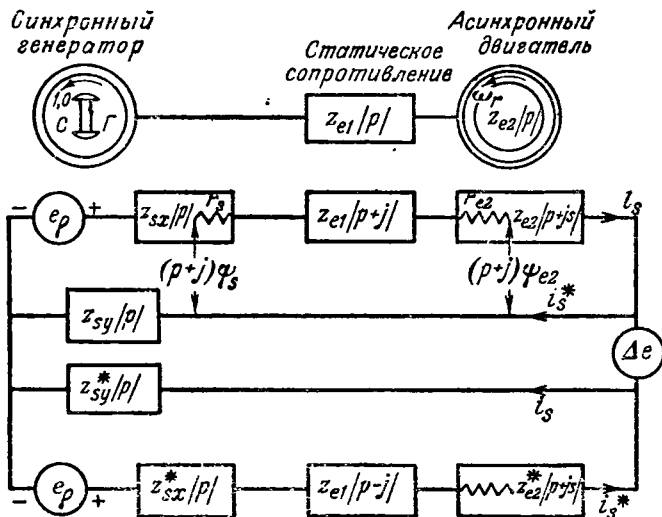


Рис. 2. Эквивалентная схема синхронной машины, работающей на изолированную нагрузку, состоящую из статического сопротивления и асинхронной машины.

Символические методы расчета электрических систем

Характер процесса	Тип эквивалентной системы	Род элементов в эквивалентной системе	Эквивалентные выражения тока, напряжения и потокосцеплений
Установившиеся процессы при постоянном напряжении	Реальная электрическая система с омическими сопротивлениями	$z = r,$ $\Sigma e = \Sigma zi$	Реальные установившиеся постоянные значения
Установившиеся процессы при переменном напряжении	Эквивалентная электрическая система с кажущимися сопротивлениями	$z j\omega = r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C},$ ω — частота тока, $\Sigma e = \Sigma zi$	Комплексные выражения с постоянным модулем и с постоянной либо равномерно изменяющейся фазой. Реальные токи, потокосцепления и напряжения соответствуют реальной составляющей комплексов с равномерно изменяющейся фазой
Переходные процессы в статической электрической системе при изменении напряжения в момент $t=0$ из нулевых начальных условий. Начальных условий производится между наложения	Эквивалентная электрическая система с операторными сопротивлениями	$z p = r + Lp + \frac{1}{Cp}, \quad p \doteq \frac{d}{dt},$ $\frac{1}{p} \doteq \int dt,$ $\Sigma e = \Sigma zi.$	Операторные выражения токов, потокосцеплений и напряжений, раскрываемые в функции времени по правилам операционного исчисления
Переходные процессы в симметричных многофазных системах, содержащих машины, при включении нагрузки прямой и обратной последовательности. Процессы, связанные с изменением напряжения нулевой последовательности, образуют изолированную систему, не связанную с остальными роторами машин	Эквивалентная электрическая система с комплексными операторными сопротивлениями (предлагается)	$z p + js = r + L(p + js) + \frac{1}{C(p + js)},$ s — скорость вращения выбранной системы осей относительно рассматриваемого элемента $\Sigma e = \Sigma zi$	Комплексные операторные выражения токов, потокосцеплений и напряжений, отнесенных к вращающимся осям. Реальные токи получаются как проекции полученных токов, потокосцеплений и напряжений на соответствующие вращающиеся оси
Переходные процессы в многофазных электрических системах, содержащих вращающуюся машину, обладающую асимметрией ротора при изменении напряжения нулевой последовательности	Эквивалентная электрическая система с комплексными операторными и их сопряженными величинами (предлагается)	$\Sigma e = \Sigma z_x i + \Sigma z_y i^*$ $z_x p $ — среднее операторное сопротивление; $z_y p $ — полуразность операторных сопротивлений, вызванная асимметрией ротора; является функцией времени во всех системах осей, кроме собственной, неподвижной по отношению к ротору	То же, что и выше

Пример. Ротор имеет одну систему обмотки. Операторное сопротивление обмотки статора при одной системе обмоток в симметричной системе

$$|p| = r_s + (p + j\omega_r) x'_s \frac{p + a'_r}{p + a_r} r_r + (p + j\omega_r) x_s |p|;$$

где r_s — активное сопротивление обмотки статора;

$x'_s = x_s - \frac{x_{sr}^2}{x_r}$ — „переходная реактивность“ обмотки статора;

x_s — реактивность самоиндукции („синхронная реактивность“) обмотки статора;

x_{sr} — реактивность взаимной индукции;

x_r — реактивность самоиндукции обмотки ротора;

a_r, a_r' — коэффициенты затухания (обратные величины постоянных времени) обмотки ротора при зам-

кнутой и разомкнутой обмотке статора соответственно

$$a'_r = \frac{r_r}{x_r}; \quad a_r = \frac{r_r}{x_r}; \quad x'_r = x_r - \frac{x_{sr}^2}{x_s},$$

ω_r — скорость вращения ротора.

Операторные реактивности вращающейся машины в любой другой системе осей являются комплексными величинами.

6. При преобразовании операторных реактивностей вращающейся машины, обладающей в общем случае асимметрией ротора, к системе осей, имеющих скорость вращения ω_r , отличающуюся от скорости вращения ротора машины ω_r , имеют место следующие соотношения:

а) средняя операторная реактивность

$$x_s |p| = \frac{x_a |p| + x_q |p|}{2}$$

преобразуется в комплексную величину путем замены p на $p + js_r$, где $s_r = \omega_r - \omega_r$ — скорость выбранных осей относительно ротора

$$x_r |p| = x_s |p + js_r|;$$

6) полуразность операторных реактивностей $y_s |p| = \frac{x_d |p| - x_q |p|}{2}$ становится в символической записи переменной во времени комплексной величиной

$$y_s |p| = \varepsilon^{-2j(\theta_s - \theta_r)} y_s |p - js_s|,$$

где

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt + \theta_{s0}; \quad \theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r0};$$

ω_s — скорость вращения выбранной системы осей;

ω_r — скорость вращения ротора машины;

θ_{s0}, θ_{r0} — соответствующие начальные углы;

θ_{r0} — начальный угол между продольной осью ротора d и осью статорной обмотки a .

Пример. В неподвижных осях $|\omega_s| = 0$ операторные реактивности вращающейся машины, обладающей асимметричным ротором, выразятся в виде:

$$x_a |p| = \frac{x_d |p - j\omega_r| + x_q |p - j\omega_r|}{2};$$

$$y_a |p| = \varepsilon^{2j\theta_r} \left[\frac{x_d |p + j\omega_r| - x_q |p + j\omega_r|}{2} \right].$$

7. Преобразование операторных сопротивлений при параллельном и последовательном соединении в представленных на рис. 1 и 2 эквивалентных схемах производится совершенно аналогично таковому в обычных электрических цепях: при последовательном соединении сопротивления складываются, при параллельном соединении складываются обратные величины сопротивлений.

8. Переходный процесс в системе, содержащей k машин, определяется следующей системой уравнений падений напряжения в осях, вращающихся вместе с роторами машин,

$$e_{sn} = r_{sn} i_{sn} + (p + j\omega_n) \psi_{sn} + [z_{en} |p + j\omega_n|] i_{sn} \quad (n = 1, 2, \dots, k),$$

где $e_{sn}, i_{sn}, \psi_{sn}$ — комплексные напряжения, ток и потокосцепления статора машины с индексом n :

$$e_{sn} = e_{dn} + je_{qn}; \quad i_{sn} = i_{dn} + ji_{qn}; \quad \psi_{sn} = \psi_{dn} + j\psi_{qn}.$$

Индексы d и q соответствуют величинам, рассматриваемым по продольной и поперечной осям роторов, соответственно;

r_{sn} — активное сопротивление в фазной обмотке статора машины с индексом n , не изменяющееся при преобразовании к вращающимся осям;

$z_{en} |p|$ — операторное сопротивление статического элемента, включенного последовательно с машиной, имеющей индекс n , рассматриваемое в неподвижной системе осей;

$z_{en} |p + j\omega_n|$ получается при приведении к собственной системе осей машины с индексом n заменой p на $p + j\omega_n$;

ω_n — скорость вращения ротора машины с индексом n .

Пример. Машина, ротор которой вращается со скоростью ω_r , включается в бесконечную мощную сеть через трансформатор, иший операторное сопротивление

$$z_t |p| = r_t + px_t \frac{p + a'_t}{p + a_t}$$

и параллельно трансформатору подключена емкость C ,

$$z_c |p| = \frac{1}{Cp}.$$

В неподвижной системе осей результирующее внешнее сопротивление

$$z_e |p| = \frac{z_t |p| z_c |p|}{z_t |p| + z_c |p|}.$$

В „собственных“ осях, вращающихся со скоростью ω_r , внешнее операторное сопротивление будет иметь вид:

$$z_e |p + j\omega_r| = \frac{[z_t |p + j\omega_r|] [z_c |p + j\omega_r|]}{z_t |p + j\omega_r| + z_c |p + j\omega_r|}.$$

Уравнение падения напряжения выразим следующим образом:

$$e_s = r_s i_s + (p + j\omega_r) \psi_s + z_e |p + j\omega_r|;$$

здесь e_s — напряжение бесконечно мощной сети.

Пример. Асинхронный двигатель включается в бесконечно мощную сеть через емкостное сопротивление x_c . Параметры двигателя: $x_d = x_q = 0,75$; $x'_d = 0,3$; x'_q ; критическое скольжение $s_k = 0,1$. Влиянием омического сопротивления цепи статора двигателя пренебрегаем. Скорость вращения ротора двигателя $\omega_r = 0,95$. Емкостное сопротивление $x_c = 0,45$. Ток статора

$$i_s = \frac{e_s}{(p + j\omega_s) x_d |p| + \frac{x_c}{p + j\omega_r}} = e_s \left\{ \frac{1}{(p + j)x_d |p + js| + \frac{x_c}{p + j}} \right\},$$

здесь

$$x_d |p| = x'_d \frac{p + a'_r}{p + a_r}; \quad a'_r = s_k = 0,1$$

$$a_r = a'_r \frac{x'_d}{x_d}; \quad s = 1 - \omega_r.$$

Подставляя значения параметров, получаем:

$$i_s = e_s \left\{ \frac{(p + j)(p + 0,040)}{D |p|} \right\},$$

где

$$D |p| = 0,3 [p^3 + (0,1 + j2,05) p^2 + (0,4 + j0,2) p + (-0,04 + j0,025)].$$

Напряжение

$$e_s = e_{sm} \varepsilon^{j(t + \gamma_a)} \varepsilon^{-j(\omega_r t + \gamma_a)} = e_{sm} \varepsilon^{jst},$$

где e_{sm} — амплитуда напряжения сети;

γ_a — начальная фаза реального напряжения

фазовой обмотке a . Определение i_s производится по обычным правилам операционного метода.

Реальные фазовые токи i_a , i_b , i_c определяются как

$$i_a = Re[i_s e^{j(\omega_r t + \gamma_a)}]; \quad i_b = Re[i_s e^{j(\omega_r t + \gamma_a - 2\pi/3)}]; \\ i_c = Re[i_s e^{j(\omega_r t + \gamma_a - 4\pi/3)}].$$

енное решение для рассматриваемого примера представлено в приложении 1.

Условия устойчивости системы могут быть определены без решения уравнения $D|p|=0$ — анализом коэффициентов полинома по известным правилам.

9. Коэффициенты затухания и собственные частоты определяются решением характеристического уравнения соответствующей системы уравнения падения напряжений.

Пример. Синхронная машина, вращающаяся с скоростью, равной единице, и имеющая в собственных осях операторные реактивности по прямой и поперечной осям $x_d|p|$ и $x_q|p|$, включенная через промежуточное операторное сопротивление $z_{e1}|p|=r_{e1}+p x_{e1}|p|$ на асинхронный двигатель, имеющий операторное сопротивление

$$z_{e2}=r_{e2}+(p+j\omega_{e2})x_{e2}|p|.$$

Здесь промежуточное операторное сопротивление $z_{e1}|p|$ выражено в системе неподвижных кр. Операторное сопротивление асинхронной машины $z_{e2}|p|$ выражено в осях, вращающихся вместе с ротором асинхронной машины.

Уравнение падения напряжения будет иметь

$$0=r_s i_s + (p+j)\psi_s + [z_{e1}|p+j|]i_s + \\ + [z_{e2}|p+j s_{e2}|]i_s,$$

где s_{e2} — скольжение асинхронной машины;

r_s — активное сопротивление статора синхронной машины;

$\psi=[x_s|p|]i_s + [y_s|p|]i_s^* + \psi_{sr}$ — потокосцепления статора синхронной машины;

i_s и i_s^* — ток статора и его сопряженная величина, соответственно;

$\psi_{sr}=[g_s|p|]e_r$ — потокосцепления статорной синхронной машины, созданные независимым возбуждением со стороны ротора от напряжения e_r .

Коэффициенты затухания и собственные частоты определяются как реальные и мнимые части корней уравнения

$$D|p|=z_x z_x^* - z_y z_y^* = 0,$$

где

$$z_x = r + (p+j)[x_s|p| + x_{e1}|p+j| + \\ + x_{e2}|p+j s_{e2}|], \\ z_y = (p+j)y_s|p|,$$

$r=r_s+r_{e1}+r_{e2}$ — сумма активных сопротивлений в статорной цепи.

Это же уравнение $D|p|$ определяет условия самовозбуждения на основании известных критериев, устанавливающих наличие положительной вещественной части в корнях уравнения.

Численный пример представлен в приложении 2.

10. Эквивалентная схема синхронной машины, включенной в бесконечно мощную сеть при рассмотрении в собственных осях будет иметь вид, представленный на рис. 1. В этой схеме: z_{sx} — среднее операторное сопротивление машины; z_{sy} — полуразность операторных сопротивлений, вызванная асимметрией ротора; e_p — э. д. с. машины, вызванная возбуждением со стороны ротора. В собственных осях $e_p = -(p+j\omega_p)\psi_s$; e_s — напряжение сети бесконечной мощности.

При отсутствии асимметрии схема имеет простой вид, представленный на рис. 1, а.

Наличие магнитной асимметрии ротора приводит к необходимости введения в схему дополнительных элементов, связанных с протеканием сопряженного тока, как это видно на рис. 1, б, на котором показана добавочная э. д. с. $\Delta e = 2jy_s|p|i_a$, необходимая для наличия представленной симметрии протекающих токов.

В вычислении ее, однако, нет необходимости, так как связь сопряженных комплексных величин с исходными дает необходимые добавочные условия для решения соответствующей системы уравнений. Это характеризуется на схеме рис. 1, б тем, что для определения токов достаточно составить уравнения для падения напряжения в двух наружных контурах.

При переходе к другой системе осей схема не меняется. Меняются только выражения для соответствующих параметров и переменных.

11. Ток статора при включении машины в мощную сеть будет:

$$i_s = \frac{z_{sx}^*(e_s + e_p) - z_{sy}(e_s^* + e_p^*)}{z_{sx} z_{sx}^* - z_{sy} z_{sy}^*}. \quad (1)$$

Потокосцепления статора ψ_s соответствуют падению напряжения $(p+j)\psi_s$, представленному на рис. 1 (см. п. 9).

Электромагнитный вращающий момент синхронной машины

$$M_e = Re[j\psi_s i_s^*], \quad (2)$$

где ψ_s и i_s предварительно раскрыты в функции времени.

Электромагнитный вращающий момент определяет скорость вращения машины в соответствии с уравнением

$$-H \frac{d\omega_r}{dt} + M_e = M_L,$$

где H — механическая постоянная времени машины;

M_L — внешний вращающий момент.

Точное раскрытие операторного уравнения для определения тока в функции времени при переменной скорости вращения может быть произведено только при определенных условиях, например: медленное изменение скорости вращения по сравнению со скоростью электромагнитного процесса, незначительное активное сопротивление в цепи статора и симметричный ротор и т. д.

Пользование операторной записью позволяет представить электрические системы, содержащие вращающиеся машины, простыми эквивалентными схемами с использованием обычных законов электрической цепи и с использованием графических методов расчета.

Ряд задач, даже при наличии переменных коэффициентов в исходных дифференциальных уравнениях, при этой записи имеют простое решение.

Если, например, $e_s = [z_{sx} | p - j\omega |] i_s + [\varepsilon^{j2\theta} z_{sy} | p + j\omega |] i_s^*$, где θ — функция времени и ток известен в функции времени, то нетрудно определить e_s в функции времени из такого символического операторного уравнения. Порядок определения в этом случае следующий: определяют операторное выражение тока, умножают его на операторное сопротивление, находят соответствующую функцию времени и в случае наличия экспоненциального коэффициента умножают полученную функцию времени на этот коэффициент.

Дальнейшие примеры применения предлагаемого метода к ряду практических задач, соответствующие эквивалентные схемы и графические построения будут также опубликованы.

Приложение 1. Пример расчета фазных токов в статоре при включении асинхронного двигателя в сеть через емкость.

Параметры электрической системы и расчетные формулы представлены в разделе „основные положения“ п. 8.

Включение в сеть производится в момент, когда напряжение в фазе a соответствует углу $\gamma_a = 20^\circ$:

$$e_a = \cos(t + 20^\circ),$$

$$i = e_s \left\{ \frac{(p + j)(p + j0,05 + 0,04)}{D|p|} 1 \right\}; e_s = \varepsilon^{j0,05t};$$

$$D|p| = 0,3(p^3 + (0,1 + j2,05)p^2 + (0,4 + j0,2)p + (-0,04 + j0,025)).$$

Определяем корни уравнения $D|p| = 0$.

Для определения первого корня пользуемся методом последовательного приближения Ньютона. Задаемся приближенным значением p_{10} корня p_1 , определяем уточненное значение по формуле

$$p_{11} = p_{10} - \frac{D|p_{10}|}{D'|p_{10}|},$$

где

$$D'|p| = \frac{dD|p|}{dp} \quad \text{и т. д.}$$

Примем за первое приближение коэффициент при s обратным знаком:

$$p_{10} = -0,1 - j2,05,$$

$$D'|p| = 0,3[3p^2 + (0,2 + j4,10)p + 0,4 + j0,2];$$

$$p_{11} = -0,1 - j2,05 -$$

$$\frac{-(0,4 + j0,2)(0,1 + j2,05) + (-0,04 + j0,025)}{3(0,1 + j2,05)^2 - (0,2 + j4,10)(0,1 + j2,05) + 0,4 + j0,2} =$$

$$= -0,1 - j2,05 - \frac{0,330 - j0,815}{-3,793 + j0,61} = 0,0185 - j2,246.$$

Находя вышеизложенным методом следующие приближения, получим: $p_1 \approx -0,016 - j2,22$.

Для проверки правильности полученного решения воспользуемся связью корней с коэффициентами полинома

$$-(p_1 + p_2 + p_3) = 0,1 + j2,05,$$

откуда

$$p_2 + p_3 = -0,084 + j0,17,$$

$$(p_2 + p_3)p_1 + p_2p_3 = 0,4 + j0,2,$$

$$p_1p_2p_3 = -(-0,04 + j0,025).$$

Разделив $D|p|$ на $p - p_1 = p - [-0,016 - j2,22]$, надем квадратное уравнение для определения p_2 и p_3 :

$$p^2 + (0,084 - j0,176)p + (0,007 + j0,016) = 0.$$

Получаем следующие приближенные выражения корней p_2 и p_3 :

$$p_2 \approx 0,041 - j0,06; \quad p_3 \approx -0,125 + j0,23.$$

Производим проверку получившихся коэффициентов полинома $D|p|$

$$-(p_1 + p_2 + p_3) = 0,1 + j2,05;$$

$$p_1p_2 + p_2p_3 + p_3p_1 = 0,3842 + j0,2007 \quad \text{вместо } 0,4 + j0,2;$$

$$-p_1p_2p_3 = 0,0374 - j0,0195 \quad \text{вместо } 0,04 - j0,025.$$

Полученная точность для практических целей достаточна.

Зная корни, нетрудно определить составляющие комплексы тока i_s в функции времени, пользуясь теоремой разложения

$$i_{s0} = \varepsilon^{j0,05t} \left\{ \frac{1}{jx_d[j0,05 - jx_c]} \right\} =$$

$$= \varepsilon^{j0,05t} \left\{ \frac{j0,05 + 0,04}{j0,3(j0,05 + 0,1) - j0,45(j0,05 + 0,04)} \right\} =$$

$$= 4,525 \varepsilon^{j(0,05t - 0,116)};$$

$$i_{s1} = \frac{\varepsilon^{j0,05t}}{0,3} \left[\frac{(p_1 + j)(p_1 + j0,05 + 0,04)}{p_1[(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)]} \varepsilon^{p_1 t} \right] =$$

$$= 0,750 \varepsilon^{j0,05t} \varepsilon^{-0,016t + j(1,518 - 2,22t)};$$

$$i_{s2} = \frac{\varepsilon^{j0,05t}}{0,3} \left[\frac{(p_2 + j)(p_2 + j0,05 + 0,04)}{p_2[(p_2 - p_3)(p_2 - p_1)]} \varepsilon^{p_2 t} \right] =$$

$$= 4,879 \varepsilon^{j0,05t} \varepsilon^{0,041t + j(1,882 - 0,06t)};$$

$$i_{s3} = -(i_{s0} + i_{s1} + i_{s2})_{t=0} \varepsilon^{j0,05t} \varepsilon^{p_3 t} =$$

$$= -5,731 \varepsilon^{j0,05t} \varepsilon^{-0,125t + j(1,016 + 0,23t)}.$$

Для определения фазных токов умножаем полученные комплексы токов на коэффициенты $\varepsilon^{j(\omega_r t + \gamma_a)}$ и отделяем реальные части.

Получаем следующие выражения для составляющих тока в фазе a :

$$i_{a0} = 4,525 \cos(t + 13^\circ 20'),$$

$$i_{a1} = 0,750 \varepsilon^{-0,016t} \cos(107^\circ 00' - 1,22t),$$

$$i_{a2} = 4,879 \varepsilon^{0,041t} \cos(127^\circ 51' + 0,94t),$$

$$i_{a3} = -5,731 \varepsilon^{-1,25t} \cos(78^\circ 10' + 1,23t).$$

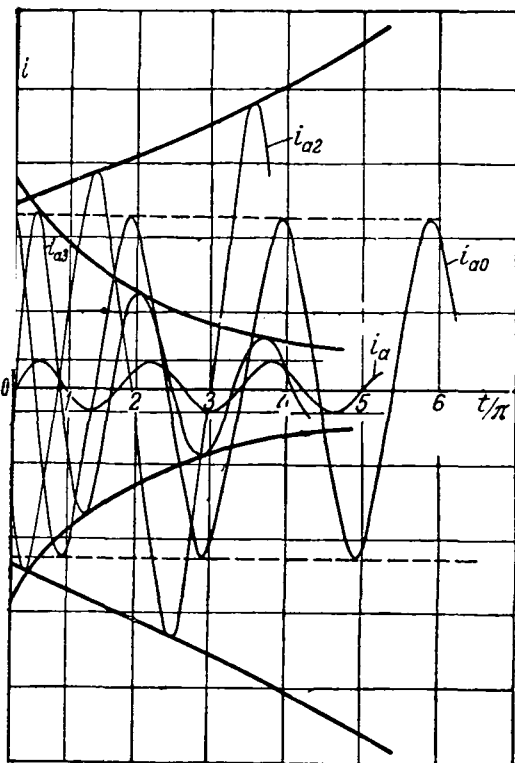


рис. 3. Составляющие тока в фазе a статора асинхронной машины, включаемой в сеть через емкость.

$$\begin{aligned}x_d &= x_q = 0,75; \\x'_d &= 0,3; \quad s_k = 0,1; \\ \omega_r &= 0,95; \quad x_c = 0,45.\end{aligned}$$

Соответствующие кривые токов в функции времени представлены на рис. 3.

Как видим, одна из составляющих i_{a2} со временем растет, а не затухает. Это значит, что система самовозбуждается с частотой 0,94 от номинальной. Предел роста тока будет положен изменением параметров магнитного насыщения и влияния омического сопротивления в цепи статора, которым мы пренебрегли. Кроме того, при самовозбуждении в силу изменения скорости вращения двигателя.

Приложение 2. Пример расчета токов при включении асинхронного двигателя через трансформатор генератор соизмеримой мощности.

Ток в цепи статоров при включении определяется статорным уравнением

$$i_s = \frac{z_{sx}^* e_s - z_{sy}^* e_s}{z_{sx} z_{sx}^* - z_{sy} z_{sy}^*}.$$

или

$$z_{sx} = r + (p + j) x |p|; \quad z_{sy} = (p + j) y |p|,$$

$$-j - \frac{A|-j|}{A'|-j|} = -j - \frac{r}{x'|-j| - \frac{y^2|-j|}{x'|-j|}} = -j - \frac{0,21}{2,045 + \frac{0,0004}{-j+0,001} + \frac{0,135}{-2j+0,01}} - \frac{\left(0,225 - \frac{0,0004}{-j+0,001}\right)^2}{2,045 + \frac{0,0004}{-j+0,001} + 13,5}.$$

(см. рис. 2)

$$|p| = x_s |p| + x_{e1} |p + j| + x_{e2} |p + j s_{e2}|; \quad y |p| = y_s |p|.$$

Полные обозначения даны в разделе „Основные положения“, п. 9. Пусть система имеет следующие параметры:

генератор — мощность 500 $\kappa\text{ва}$; $x_d = 1,0$; $x'_d = 0,2$; $x_q = x'_q = 0,65$; $a'_d = 0,005$ (т. е. $T'_d = 200$); $a_d = 0,001$ (т. е. $T_{d0} = 1000$); $r_s = 0,01$. Трансформатор — мощность 250 $\kappa\text{ва}$; реактивность 6%. Двигатель — мощность 100 $\kappa\text{ва}$; $x_a = 0,3$; $a'_a = 0,1$; $a_a = 0,01$; $r_a = 0,04$.

Двигатель имеет скольжение $s_e = -1,00$. Приведем параметры системы к единой мощности 500 $\kappa\text{ва}$, имеем:

$$\begin{aligned}x |p| &= \left[0,325 + 0,1 \frac{p+0,005}{p+0,001} + 0,12 + 1,5 \frac{p-j+0,1}{p-j+0,01} \right] = \\ &= \left[2,045 + \frac{0,0004}{p+0,001} + \frac{0,135}{p-j+0,01} \right]; \\ y |p| &= \left[-0,225 + \frac{0,0004}{p+0,001} \right]; \quad r = 0,21,\end{aligned}$$

Знаменатель в уравнении для тока

$$A |p| = z_{sx} z_{sx}^* - z_{sy} z_{sy}^* = r^2 + r \{ p [x |p| + x^* |p|] + j [x |p| - x^* |p|] \} + (p^2 + 1) [x |p| x^* |p| - y^2 |p|],$$

где

$$x^* |p| = 2,045 + \frac{0,0004}{p+0,001} + \frac{0,135}{p+j+0,01}.$$

Уравнение $A |p| = 0$ содержит 3 пары комплексных корней. Эти корни можно определить сначала приближенно из условий

$$p^2 + 1 = 0 \text{ и } x |p| = 0; \quad x^* |p| = 0 \text{ или } 2,045 p^2 + (0,157895 \mp j 2,045) p + (1,5945 \mp j 2,45) 10^{-4} = 0.$$

Имеем первые приближения для корней:

$$\begin{aligned}p_{10} &= -j; \quad p_{30} = +j; \quad p_{20} = -0,001195 - j 1,425 \cdot 10^{-5}; \\ p_{40} &= p_{20}^*; \quad p_{50} = -0,0780 - j - p_{20}; \quad p_{60} = p_{50}^*.\end{aligned}$$

Если требуется точное решение, то уточняют значения всех шести корней, пользуясь методом Ньютона. Затем, пользуясь теоремой разложения, получают соответствующее выражение для тока в функции времени. Очевидно, что выражение получится весьма громоздким и расчет трудоемким. Для упрощения расчета сравним рассматриваемую задачу со случаем отсутствия асимметрии ротора. В этом случае мы имели первые приближения для корней p_1 из условия $(p+j)=0$ и p_2 из условия $x |p| = 0$.

Из этого следует, что составляющие тока, связанные с остальными корнями, вызваны только асимметрией ротора и относительно малы. Исходя из изложенного, допустимо принять следующий метод расчета:

- определяем уточненные значения корней p_1 и p_2 ;
- определяем установившийся ток i_{s0} , соответствующий условию $p=0$, и первую составляющую свободного тока i_{s1} , связанную с корнем p_1 ;
- определяем вторую составляющую свободного тока i_{s2} , пользуясь соотношением $(i_{s0} + i_{s1} + i_{s2})t = 0 = 0$;
- определяем фазные токи.

Определение p_1 . Пренебрегая влиянием r^2 , имеем:

откуда

$$p_1 \approx -j - 0,1029 + j 0,00347 = -j - \alpha_1 + j \omega_c;$$

$$\alpha_1 = 0,1029; \quad \omega_c = 0,00347.$$

Величина α_1 , как видим, весьма близка к значению $\frac{r}{\Sigma x'}$, где $\Sigma x'$ представляет собой сумму приведенных переходных реактивных сопротивлений генератора, двигателя и трансформатора:

$$\Sigma x' = \frac{0,2 + 0,65}{2} + 0,12 + 1,5 = 2,045.$$

Это объясняется тем, что α_1 связано со свободной составляющей тока, почти неподвижной в пространстве и, следовательно, создающей ток относительно большой частоты в роторах вращающихся машин.

Определение p_2 . Определяем p_2 из условия $x|p| x^*|p| - y^2|p| = 0$.

Для первого приближения p_{20} пренебрегаем в выражении $x|p|$ и $x^*|p|$ комплексной частью $\frac{0,135}{p + j + 0,01}$, вызванной потерями в роторе асинхронного двигателя. Это значит, что в первом приближении мы учитываем асинхронный двигатель как чисто реактивное сопротивление.

Условие $x|p| x^*|p| - y^2|p| = 0$ может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} & \left(2,045 - 0,225 + \frac{0,0008}{p + 0,001} \right) (2,045 + 0,225) + \\ & + 2 \left(2,045 + \frac{0,0004}{p + 0,001} \right) \frac{0,135(p + 0,01)}{[(p + 0,01)^2 + 1]} + \\ & + \frac{0,135^2}{[(p + 0,01)^2 + 1]} = 0. \end{aligned}$$

Пренебрегая указанной комплексной частью в $x|p|$ и $x^*|p|$, отбрасываем второй и третий член составленного уравнения. Получаем:

$$p_{20} = - \frac{0,0008 + (2,045 - 0,225) 0,001}{2,045 - 0,225} = - 0,001439.$$

Пользуясь методом Ньютона, определяем уточненное значение корня p_2 с учетом отброшенных при первом приближении двух членов

$$\begin{aligned} p_{21} &= p_{20} - \\ & - \frac{(2,045p_{20} + 0,002445) 0,27(p_{20} + 0,01) + 0,135^2(p_{20} + 0,001)}{(2,045 + 0,225)(2,045 - 0,225)[(p_{20} + 0,01)^2 + 1]} = \\ & = - 0,001437. \end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что влияние отброшенной вначале комплексной части в $x|p|$ и $x^*|p|$ незначительно и неучет ее давал ошибку только порядка 0,15%.

Определение тока i_{s0} :

$$i_{s0} = \frac{[r - jx^*|0|] e_s - jy|0| e_s^*}{x|0| x^*|0| - y^2|0| + r^2 + jr[x|0| - x^*|0|]}.$$

Подставляя в $x|p|$ и $y|p|$ величину $p = 0$, получаем:

$$x|0| = \frac{1,5945 - j24,45}{0,001(-j + 0,01)} 10^{-4} = 2,45 e^{j0,552};$$

$$y|0| = 0,175; \quad x|0| x^*|0| - y^2|0| = 5,9722$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} i_{s0} &= \frac{[0,21 - j2,45 e^{-j0,552}] e_s - j0,175 e_s^*}{5,9722 + 0,21^2 - 0,21 \cdot 2,45 \cdot 0,11} = \\ &= (0,0109 - j0,411) e_s - j0,0294 e_s^* = \\ &= 0,411 e_s e^{-j1,5446} - j0,0294 e_s^*. \end{aligned}$$

Определение токов i_{s1} и i_{s2} . Пренебрегая влиянием активного сопротивления на амплитуду тока имеем:

$$\begin{aligned} i_{s1} &= \frac{-2jx^*|0| - j e_s e^{p_1 t}}{-j(-2j)[x|0| - jx^*|0| - j] - y^2|0|} = \\ &= \frac{e_s (-j - p_1)}{-j} e^{p_1 t}. \end{aligned}$$

Подставляя значение p_1 и r , получаем:

$$\begin{aligned} i_{s1} &= (0,0165 + j0,4898) e_s e^{-0,1029t} - j(1 - 0,00347)t = \\ &= 0,490 e_s e^{-0,1029t} - j(1 - 0,00347)t e^{j1,5624}. \end{aligned}$$

Определяем ток i_{s2} :

$$\begin{aligned} i_{s2} &= -(i_{s0} + i_{s1})_{t=0} e^{p_2 t} = -(0,02762 + j0,0788) e_s e^{p_2 t} \\ &\times e^{-0,001437t} - j0,0294 e_s^* e^{-0,001437t} \end{aligned}$$

или

$$i_{s2} = -e^{-0,001437t} \{ 0,0841 e_s e^{j1,2390} - j0,0294 e_s^* \}.$$

Начальные условия включения. Пусть в момент включения напряжение на фазе a $e_a = \cos(t + \gamma_a)$ было равно $\cos 40^\circ$. В таком случае $\gamma_a = 40^\circ$ (0,698 радиан) и $e_{a2} = e^{j(t + 0,693)} (e_s = -j)$.

Фазные токи. Ток в фазе a

$$i_a = Re \left[\frac{i_s}{e_s} e^{j(t + 0,693)} \right];$$

аналогично

$$i_b = Re \left[\frac{i_s}{e_s} e^{j(t + 0,698 - 2\pi/3)} \right];$$

$$i_c = Re \left[\frac{i_s}{e_s} e^{j(t + 0,693 - 4\pi/3)} \right].$$

Подставляя численные значения, получаем следующие значения составляющих тока в фазе a :

$$i_{a0} = 0,381 \cos(t - 0,8450);$$

$$i_{a1} = 0,490 e^{-0,1029t} \cos(0,00347t + 2,2602);$$

$$i_{a2} = -0,1105 e^{-0,001437t} \cos(t + 2,0223).$$

Токи i_{a0} и i_{a2} являются суммами двух членов, имеющих одинаковую частоту. Если бы машина, имеющая асимметрию ротора, вращалась несинхронно, то частоты этих членов были бы разные.

Приложение 3.

Связь операторных эквивалентных схем асинхронной машины с обычной эквивалентной схемой и графическое исследование устойчивости работы систем (пример).

Пусть имеется короткозамкнутая асинхронная машина с одной системой обмоток в роторе, обычная эквивалентная

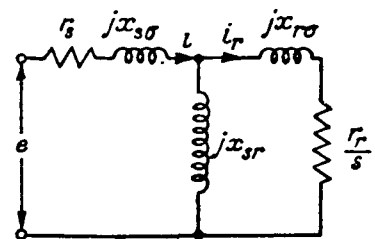


Рис. 4. Эквивалентная схема асинхронной машины, работающей в установившемся режиме.

ная схема которой для установившегося режима представлена на рис. 4. Этой эквивалентной схеме при $r_s =$ соответствует круговая диаграмма, представленная рис. 5.

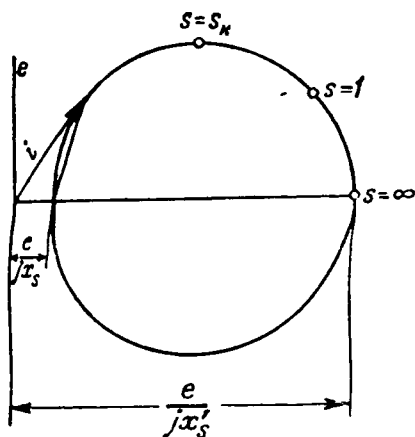


Рис. 5. Круговая диаграмма асинхронной машины при $r_s = 0$.

в этой диаграмме $x_s = x_{ss} + x_{sr}$ — синхронная реактивность обмотки статора, соответствующая результирующей реактивности по эквивалентной схеме при $s \rightarrow 0$;

$x_{sr} x_{rs} / x_r = \sigma x_s$ — переходная реактивность обмотки статора, соответствующая результирующей реактивности по эквивалентной схеме при $s \rightarrow \infty$; $\sigma = 1 -$

коэффициент рассеяния; $x_r = x_{sr} + x_{rs}$ — полнореактивность обмотки ротора.

Эквивалентная схема, представленная на рис. 4, модифицирована для определения тока статора i заменена эквивалентной схемой рис. 6, а, где эквивалентная комплексная реактивность обмотки статора для установившегося режима x_s / js определяется в соответствии со схемой рис. 6, б и равна

$$x_s / js = x_{ss} + \frac{x_{sr} (x_{rs} + r_r / js)}{x_r + r_r / js} = x_s \frac{js + a'_r}{js + a_r}, \quad (1)$$

где $a_r = \frac{r_r}{x_r}$ и $a'_r = \frac{r_r}{x_r} = \frac{r_r}{x_r}$ — коэффициенты затухания

ротора при разомкнутой и замкнутой обмотке соответственно.

В установившемся режиме ток статора i , соответствующий круговой диаграмме рис. 5, будет:

$$i = \frac{e}{r_s + jx_s / js} = \frac{e}{r_s + (js + j\omega_r) x_s / js} = \frac{e}{r_s + jx_s (j - j\omega_r)}, \quad (2)$$

где ω_r — скорость вращения ротора в относительных ед.

Если известно, комплексное выражение для установившегося тока в цепи, характеризуемой операторным сопротивлением z и напряжением с угловой частотой ω , подставляя в выражение $z |p|$ величины $j\omega$ вместо p . Если

в комплексном виде ток i был равен $i_s = \frac{e_s}{z |p|}$, где $e_s =$

$e_s e^{j(\omega t + \gamma_0)}$ — комплекс, реальной частью которого является приложенное напряжение $e_a = e_m \cos(\omega t + \gamma_0)$, то комплексное выражение установившегося тока будет

$i_{уст} = \frac{e_s}{z |j\omega|}$. Мгновенное значение установившегося тока $i_{уст}$ будет равно реальной составляющей по комплексному выражению для тока $i_{уст}$.

Подставив в асинхронный двигатель напряжение частоту, равную единице, и под e мы пони-

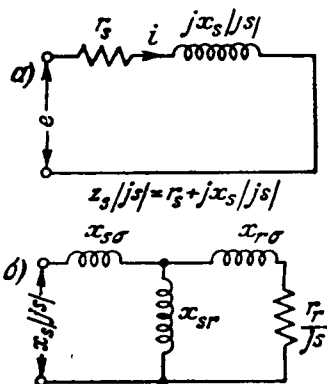


Рис. 6. Эквивалентные схемы асинхронной машины, работающей в установившемся режиме.

маем комплекс $e_s = e_m e^{j(t + \gamma_0)}$, соответствующий реальным приложенным напряжениям, прямой последовательности с мгновенным значением напряжения в фазе a , равным $e_a = e_m \cos(t + \gamma_0)$, то, зная комплексное выражение для установившегося тока $i_{уст}$, можно перейти к общему выражению для тока статора в переходном режиме, произведя обратную замену $j\omega$ на p . Общий ток статора, выраженный в неподвижных осях, связанных со статором, i_s будет поэтому равен

$$i_s = \frac{e_s}{r_s + px_s p - j\omega_r} = \frac{e_s}{r_s + px_s |p|}, \quad (3)$$

где

$$x_s |p| = x_s |p - j\omega_r| = x_s \frac{p - j\omega_r + a'_r}{p - j\omega_r + a_r}. \quad (4)$$

Если рассматривать напряжение e в собственных осях вращающихся вместе с ротором, то напряжение $e = e_s$, где $e_s = e_a e^{-j(\omega_r t + \gamma_0)} = e_m e^{js t}$, и, следовательно, в этом случае e имеет частоту скольжения s . В таком случае на основании (2), подставляя вместо js оператор p , имеем:

$$i_s = \frac{e_s}{r_s + (p + j\omega_r) x_s |p|}, \quad (5)$$

где

$$x_s |p| = x_s \frac{p + a'_r}{p + a_r}. \quad (6)$$

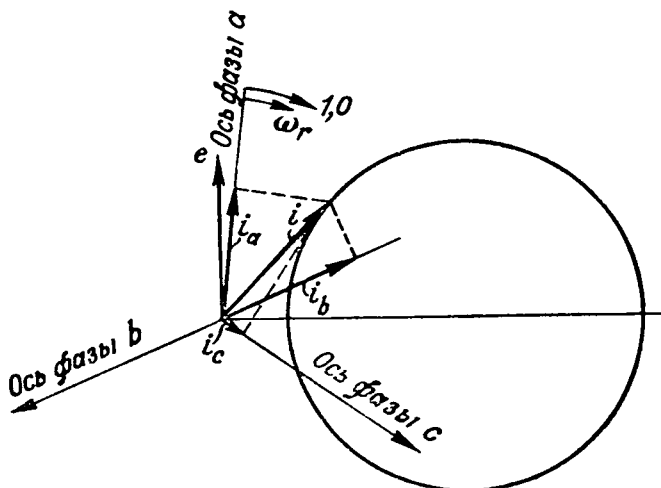


Рис. 7. Определение фазных токов и напряжений в статоре из круговой диаграммы.

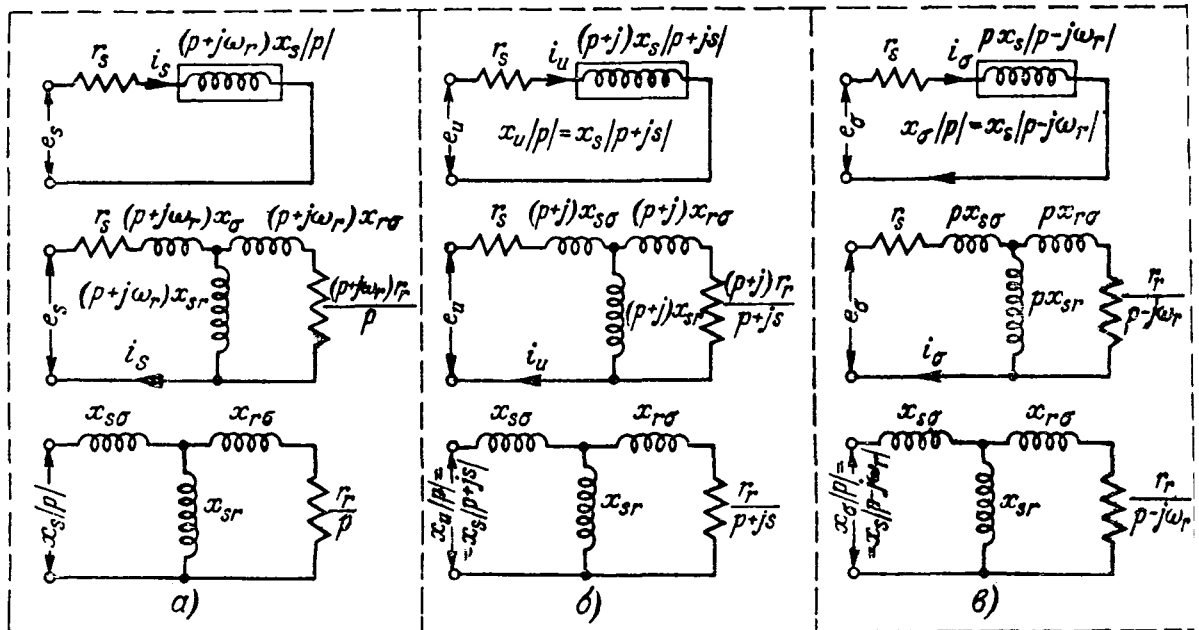


Рис. 8. Эквивалентные схемы операторного сопротивления и операторной реактивности обмотки статора, выраженных: а) — в собственных осях $x_s = r_s + (p + j\omega_r) x_s |p|$; б) — синхронных осях $x_u |p| = r_s + (p + j) x_u |p|$ и в) неподвижных осях $x_s |p| = r_s + p x_s |p|$.

Наконец, если рассматривать представленное на круговой диаграмме напряжение e , как напряжение $e_u = e_s e^{-j(t+\omega)} = e_m$, выраженное в синхронных осях, т. е. имеющее частоту, равную нулю, то комплексное выражение установившегося тока (2) можно рассматривать как результат подстановки $p=0$ в выражение переходного тока, представленного в синхронных осях,

$$i_u = \frac{e_u}{r_s + (p + j) x_s |p + js|} = \frac{e_u}{r_s + (p + j) x_u |p|}, \quad (7)$$

где

$$x_u |p| = x_s |p + js| = x_s' \frac{p + js + a_r'}{p + js + a_r}. \quad (8)$$

Как видно из сравнения формул (1) и (6), операторная реактивность обмотки статора $x_s' p$, выраженная в собственных осях, получается из комплексной реактивности, для установившегося режима $x_s' |js|$, соответствующей эквивалентным схемам рис. 4 и 6, простой заменой js на p .

При представлении операторной реактивности в неподвижных осях нужно заменить, как это видно из (4), в комплексной реактивности для установившегося режима $x_s' js$ на $p - j\omega_r$. При представлении операторной реактивности обмотки статора в синхронных осях нужно, как это видно из (8), заменить в выражении $x_s' |js|$ величину js на $p + js$.

Так как e и i , представленные на круговой диаграмме рис. 5 для установившегося режима, имеют одинаковую частоту, то их относительное положение на круговой диаграмме не будет изменяться в зависимости от того, в какой системе осей эти величины выражены.

Мгновенные значения фазных токов и напряжений статора определяются как проекции соответствующих комплексных на три оси a, b, c , расположенные под углами в 120° (рис. 7). Характер выбранной системы осей скажется только на скорости вращения этих осей. При представлении e и i в системе синхронных осей фазные оси a, b, c будут на круговой диаграмме рис. 7 вращаться по часовой стрелке со скоростью, равной единице. При представлении e и i в собственных осях эти фазные оси будут вращаться на круговой диаграмме рис. 7 со скоростью ω_r по часовой стрелке. При представлении e и i в неподвижных

осях фазные оси на круговой диаграмме рис. 7 б) неподвижны.

На основании полученных соотношений между комплексной реактивностью обмотки статора для установившегося режима $x_s' |js|$ и операторными реактивностями обмотки статора, выраженными в разных осях $x_s' |p|$; $x_u |p|$; $x_s |p|$, — нетрудно составить эквивалентные схемы для расчета переходных режимов при представлении напряжения e и тока i в выбранной системе осей. Та эквивалентные схемы представлены на рис. 8.

Нетрудно проверить, что из операторных реактивностей $x_s' |p|$; $x_u |p|$ и $x_s |p|$ — представленных в схемах рис. 8, при подстановках: $p = js$ — для собственных осей $p = 0$ — для синхронных осей и $p = j\omega_r$ — для неподвижных осей получается одна и та же комплексная реактивность для установившегося режима $x_s' |js|$.

Если синхронная машина включена в сеть через следовательно включенное емкостное сопротивление то эквивалентная схема такой системы в собственных осях будет иметь вид, представленный на рис. 9, а.

На рис. 9, б представлен пример использования та эквивалентной схемы для графического исследования устойчивости системы с точным учетом основных параметров, включая r_s . В качестве исходной кривой А берется обычная круговая диаграмма асинхронной машины при напряжении, равном единице, построенная без учета активного сопротивления в цепи статора r_s . Ток статора, представленный такой круговой диаграммой, будет равен

$\frac{1}{jx_s |js|}$. Величина $jx_s |j\omega|$ представится обратной кривой, причем величину s на ней заменяем на ω , поскольку $\frac{1}{\omega} = 1 - \omega_r$ является в рассматриваемом случае постоянной величиной, а нас интересует изменение величины jx_s при изменении частоты ω от $-\infty$ до $+\infty$, для построения так называемой амплитудно-фазной характеристики.

Умножая $jx_s |j\omega|$ на величину $\frac{1}{\omega + \omega_r}$, получаем кривую С. Вычтя затем величину $\frac{1}{(\omega + \omega_r) x_c}$ и сдвинув вниз начало координат на величину r_s , как представлено на рис. 9, б, получаем кривую D изменения результирующего кажущегося сопротивления рассматриваемой системы $x_s' |j\omega| = r_s + j(\omega + \omega_r) x_s' |j\omega| + \frac{1}{j(\omega + \omega_r) x_c}$, при изменении частоты ω подведенного напряжения от $-\infty$ до $+\infty$.

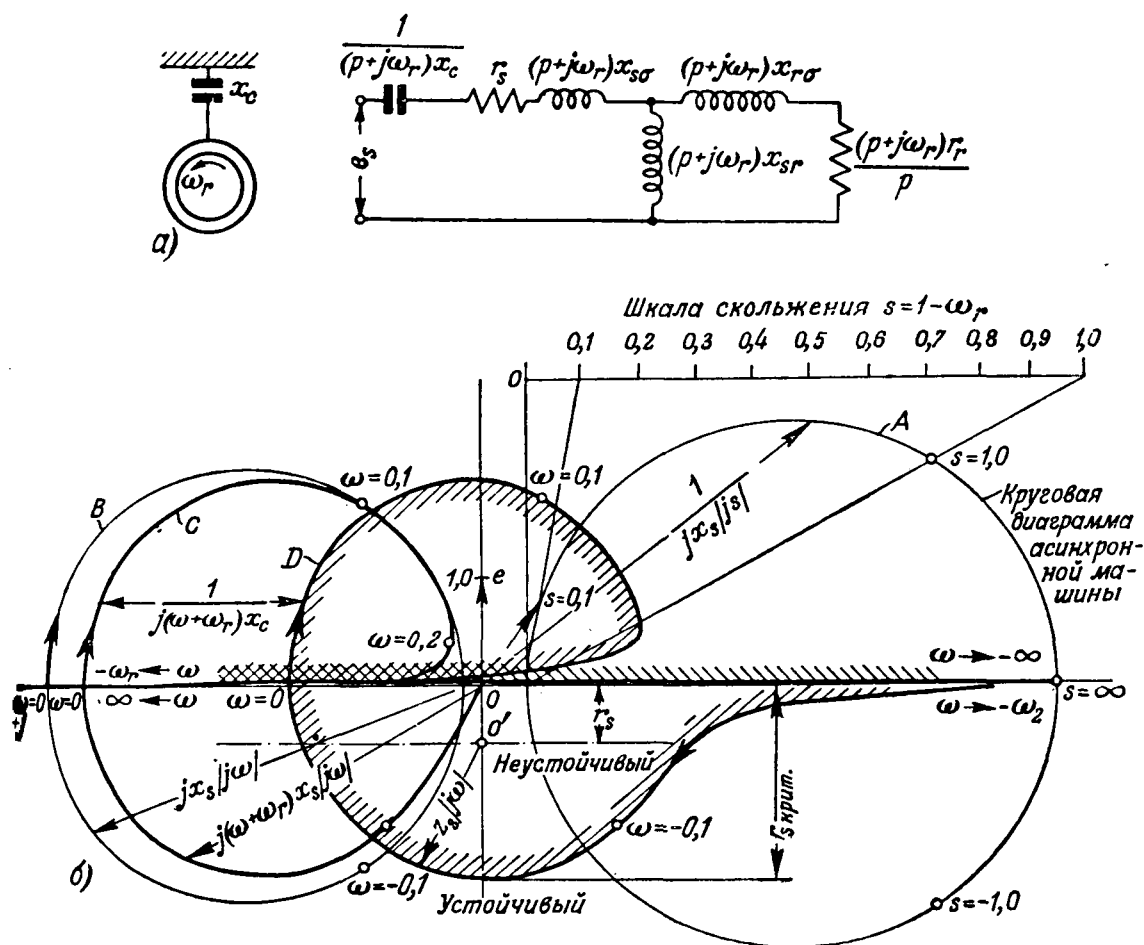


Рис. 9. Графическое исследование условий устойчивости работы асинхронного двигателя, включенного через сеть на емкость.

а — эквивалентная схема в собственных осях; б — амплитудно-фазовая характеристика.

Параметры:

$$s = 0,1; \omega_r = 0,9; x_s = 0,4; x'_s = 0,2; x_c = 0,6; r_s = 0,5;$$

$$z_s |p| = r_s + (p + j\omega_r) x_s |p| + \frac{1}{(p + j\omega_r) x_c}$$

$$z_s |j\omega| = r_s + j(\omega + \omega_r) x_s |j\omega| - j \frac{1}{(\omega + \omega_r) x_c}.$$

Затриховав кривую D справа по ходу возрастания ω , получаем область неустойчивой работы — заштрихованную (содержащую начало координат 0') и область устойчивой работы — незаштрихованную. Как видим, в данных параметрах система может работать устойчиво только при $r_s > r_{s \text{ крит}} = 1,70$.

Если увеличивать x_c , то кривая D будет сдвигаться влево и критическое значение активного сопротивления $r_{s \text{ крит}}$ будет уменьшаться.

Литература

1. Физические основы электротехники. Под ред. К. М. Поливанова, гл. 15, Госэнергоиздат, 1950.
2. Е. Я. Казовский. Переходные процессы в асинхронных машинах с учетом асимметрии ротора. Электричество, № 4, 1950.
3. Е. Я. Казовский. Переходные процессы в синхронных машинах с учетом асимметрии ротора. Электричество, № 8, 1950.

[18. 7. 1950]



Решение некоторых краевых задач электромагнитного поля на двумерных электрических моделях

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. ШТЕЙН

Московский энергетический институт им. Молотова

Введение. Точное решение некоторых краевых задач, связанных с исследованием процессов, протекающих в электромагнитном поле в двумерной и, особенно, в трехмерной областях при определенных граничных условиях практически сопряжено с большими трудностями.

Применение разностного метода для решения уравнений, описывающих рассматриваемые явления, связано с решением значительного числа уравнений со многими неизвестными, требующим большой затраты времени и труда.

Используя модели, разработанные Л. И. Гутенмахером [Л. 1, 2] и составленные из пассивных элементов самоиндукций L , емкостей C и активных сопротивлений R , было показано¹, что некоторые задачи могут быть приближенно решены применением методов электрического моделирования.

Искомые компоненты исследуемого поля могут быть найдены измерением напряжений в узловых точках модели. Но распределение напряжений по узловым точкам модели характеризует скалярное поле пространства. Поэтому при исследовании на модели векторного поля необходимо разложить его на компоненты по отдельным осям координатной системы, так чтобы числа, которыми измеряются компоненты векторов поля, тоже являлись бы скалярами. Следовательно, для решения конкретной векторной задачи поля необходимо производить столько циклов измерений напряжений в узловых точках модели, сколько нужно определить компонент поля. В частности, при решении ряда двумерных краевых задач, имеющих часто большое практическое значение (например, при исследовании магнитных волн типа H_{on} и H_{onl}) необходимо три раза производить соответствующие измерения, так как векторные уравнения

Выявлена аналогия между уравнениями поля и уравнениями, характеризующими соотношения между напряжениями и токами в модели. Определены критерии подобия этих уравнений. Приведены примеры составления моделей для решения задач, связанных с распространением электромагнитных волн в волноводах и с исследованием электромагнитного поля в объемных резонаторах.

поля распадаются в этом случае в декартовой системе координат на скалярные компоненты.

Можно показать, однако, что решение двумерных моделей краевых задач рассматри

мого типа может быть получено при одном цикле измерений одновременно для всех компонент электрической и магнитной напряженностей поля. При этом необходимо измерять не только распределение напряжений по узловым точкам модели, и распределение токов по отдельным элементам модели.

Вайнери и Рамо [Л. 3], ссылаясь на работы Крона [Л. 4], используют двумерные электрические сетки для решения некоторых вопросов распространения электромагнитных волн в волноводах. Рассмотрение опубликованных в печати в 1943—1944 гг. моделей Крона приводит к выводу, что они по сути ничем не отличаются от моделей Л. И. Гутенмахера, разработанных им и опубликованных еще в 1940 г. [Л. 1].

Аналогия между уравнениями электромагнитного поля и уравнениями модели. Для вращательных и однородных сред при отсутствии в рассматриваемой области зарядов и «сторонних» токов уравнения поля для магнитных волн типа H_{on} и H_{onl} имеют вид:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \sigma E_x,$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H_y}{\partial t},$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\mu}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t},$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0,$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0,$$

$$E_y = E_z = H_x = 0; \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0.$$

¹ Вопрос был освещен в докладе автора на Всесоюзном совещании по электромоделированию в 1949 г.

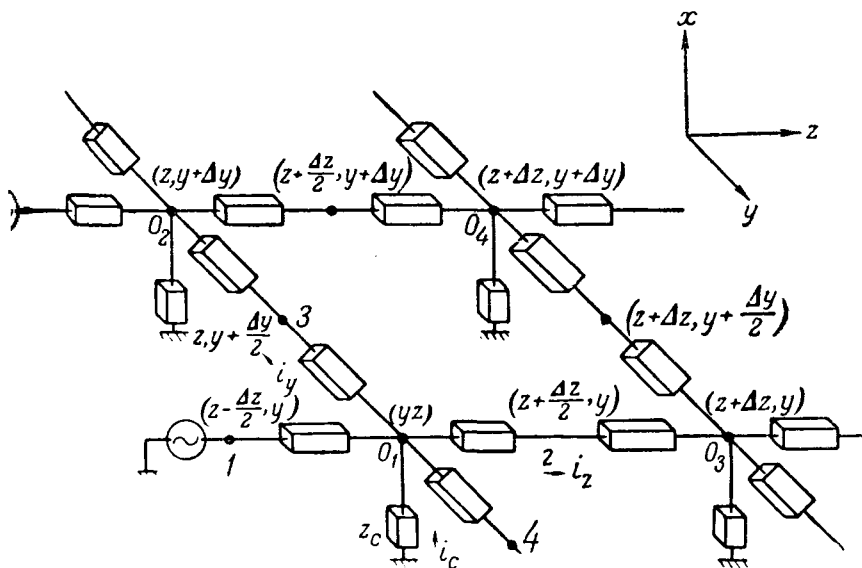


Рис. 1. Участок электрической модели.

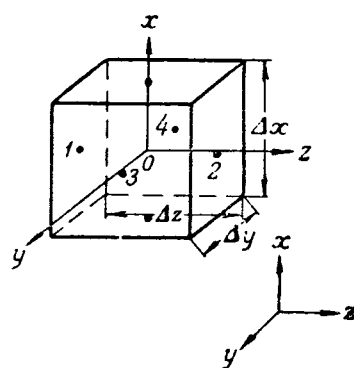


Рис. 2. Элементарный параллелепипед пространства.

Нетрудно заметить, что падение напряжения на произвольном n -ном элементе модели в направлении оси y

бразование выражений (1) ÷ (5) дает возможность разделить компоненты поля. При этом для компонента, как известно, подчиняется черному телеграфному уравнению вида:

$$\nabla^2 v = \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{4\pi \mu \sigma}{c^2} \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (6)$$

логично могут быть написаны уравнения для магнитных волн типа H_{m0} и H_{mol} . Нельзя только иметь в виду, что для этого компоненты $E_x = E_z = H_y = 0$. Остальные компоненты поля H_x , H_z и E_y от оси y не за-

и отсутствии потерь в диэлектрике в уравнении (6) пропадает первая производная времени, и уравнение превращается в вол-

тимся к рис. 1, представляющему собой шую часть электрической модели про- гва. Рассматриваемая часть модели имеет ко узловых точек (O_1 , O_2 и т. д.). На- щия в узловых точках будем обозначать ом u . Сочетание полных сопротивлений той или иной узловой точки сетки рис. 1 павляет электрическую модель того или элементарного параллелепипеда простран- ством $\Delta P = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ (рис. 2), для кото- ется рассматриваемая двумерная крае- чаща.

основании первого закона Кирхгофа показать, проделав несложные преобра- зия, что для произвольной узловой точки (например для точки O_1) справедливо шение

$$\frac{\Delta j_z}{\Delta z} + \frac{\Delta j_y}{\Delta y} = \frac{i_c}{\Delta P} = \frac{u}{z_c} \cdot \frac{1}{\Delta P}. \quad (7)$$

плотности токов соответственно:

$$i_y = \frac{i_y}{\Delta x \cdot \Delta z} \text{ и } j_z = \frac{i_z}{\Delta x \cdot \Delta y}.$$

$$\Delta_y u = \sum_{k=1}^n \Delta_y u_k - \sum_{k=1}^{n-1} \Delta_y u_k = j_y z_y \Delta y,$$

т. е.

$$\frac{\Delta_y u}{\Delta y} = j_y z_y \quad (8)$$

и падение напряжения—в направлении оси z

$$\Delta_z u = \sum_{k=1}^m \Delta_z u_k - \sum_{k=1}^{m-1} \Delta_z u_k = j_z z_z \Delta z,$$

т. е.

$$\frac{\Delta_z u}{\Delta z} = j_z z_z; \quad (9)$$

здесь z_z и z_y — погонные полные сопротивления по осям z и y .

На основании 2-го закона Кирхгофа можно написать для произвольного контура модели в плоскости yz :

$$\Delta_z(\Delta_y u) - \Delta_y(\Delta_z u) = 0. \quad (10)$$

Здесь, например, $\Delta_z(\Delta_y u)$ представляет собой изменение в направлении оси z через Δz паде- ние напряжения на элементах связей модели, расположенных по оси y .

Учитывая (8) и (9), получаем на основании выражения (10), что при $z_y = z_z$

$$\frac{\Delta j_y}{\Delta z} - \frac{\Delta j_z}{\Delta y} = 0. \quad (11)$$

Закон распределения напряжений по узловым точкам модели при $z_y = z_z = z_0$ подчиняется уравнению [Л. 2]

$$\nabla^2 u = \frac{1}{\Delta P} \frac{z_0}{z_c} u, \quad (12)$$

где $\nabla^2 u$ представляет собой оператор Лапласа в разностном виде.

Несложными преобразованиями над выражениями (7) и (11) можно показать, что распределение плотностей токов j_y и j_z в модели подчиняется закону

$$\frac{\Delta^2 j_y}{(\Delta y)^2} + \frac{\Delta^2 j_y}{(\Delta z)^2} = \nabla^2 j_y = \frac{1}{\Delta P} \frac{z_0}{z_c} j_y, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta^2 j_z}{(\Delta y)^2} + \frac{\Delta^2 j_z}{(\Delta z)^2} = \nabla^2 j_z = \frac{1}{\Delta P} \frac{z_0}{z_c} j_z. \quad (14)$$

Допустим

$$z_0 = R + Lp \quad \text{и} \quad \frac{1}{\Delta P \cdot z_c} = Cp + \frac{1}{R'},$$

где p — оператор Хевисайда;

R и L — погонные параметры полных сопротивлений связей;

C и R' — удельные параметры полных сопротивлений стоков, причем емкость стока $\Delta P \cdot C$ пропорциональна, а сопротивление утечки стока $\frac{R'}{\Delta P}$ обратно пропорционально объему замещаемого элементом модели элементарного параллелепипеда пространства.

В таком случае уравнения (12), (13) и (14) принимают вид:

$$\Delta^2 A = LC \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \left(RC + \frac{L}{R'} \right) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{R}{R'} A. \quad (15)$$

Сравнивая уравнения (15) и (6), можно установить их аналогию. Различие заключается только в том, что левые части уравнений модели составлены в виде конечных разностей, в то время как левые части уравнений поля составлены в виде частных производных. Кроме того, в правой части уравнения модели содержится дополнительный член вида $\frac{R}{R'} A$, который пропадает при $R=0$ или $R'=\infty$.

Сравнение уравнений (7) и (1) или (11) и (5) показывает, что распределение плотности тока j_y и j_z в модели дает соответственно значения компонент магнитного поля — H_z и H_y исследуемой области пространства. Измерение напряжений u в узловых точках модели позволяет определить напряженность электрического поля E_x в моделируемой области.

Таким образом, на рассмотренной электрической модели, составленной из определенных образом скомбинированных самоиндукций, емкостей и активных сопротивлений, можно приближенно исследовать электромагнитное поле пространства при любой его конфигурации, тогда, когда исследование сводится к решению задач типа H_{on} и H_{onl} . При этом требуется, однако, во-первых, задать на модели начальные и граничные условия, соответствующие таковым в моделируемой области, и, во-вторых, требуется

обеспечить равенство так называемых критериев подобия.

На аналогичной модели могут быть исследованы компоненты поля, соответствующие нам типа H_{mo} и H_{mol} . Необходимо только ввести координату y ввести координату x .

Электрические волны типа E_{oi} и E_{oil} магнитные волны типа H_{oi} и H_{oil} , которые будут получены в цилиндрических системах круглого сечения, характеризуются наличием следующих компонент поля.

При волнах H_{oi} и H_{oil} существуют компоненты поля E_φ , H_r и H_z , которые от оси зависят. Остальные компоненты $E_r = H_\varphi = H_\theta = 0$.

При волнах E_{oi} и E_{oil} существуют компоненты E_r , E_z и H_φ , которые также не зависят от оси φ . Остальные компоненты $E_\varphi = H_r = H_z = 0$.

Соответствующая модель для исследования этих волн внешне подобна модели, изображенной на рис. 1. Различие заключается в том, что здесь полные сопротивления связей z и z_c не остаются постоянными в направлении r .

Можно показать, что в цилиндрической системе координат полные сопротивления z обратно пропорциональны координате r . Пользуясь методом, изложенным выше для декартовой системы координат, нетрудно убедиться, что в цилиндрической системе координат уравнения модели имеют вид:

$$r \frac{\Delta j_z}{\Delta z} + \frac{\Delta j_r}{\Delta r} = r \frac{u}{z_c} \cdot \frac{1}{\Delta P},$$

$$r \frac{\Delta_r u}{\Delta r} = j_z z_r,$$

$$\frac{\Delta_z u}{\Delta z} = j_z z_z.$$

Сравнивая эти уравнения с известными уравнениями поля в цилиндрической системе координат, можно показать, что для волн H_{oi} и H_{oil} распределение плотностей токов в модели j_z и распределение величин напряжений в узловых точках u дают соответственно приближенные значения компонент поля H_r , H_z и E_φ .

Для волн E_{oi} и E_{oil} плотностям токов в модели j_z и j_r соответствуют компоненты E_r и E_z и значениям напряжений в узловых точках модели u соответствует компонента H_φ .

2. Определение критериев подобия. Методы определения инвариантов или критериев подобия хорошо известны [Л. 1, 2]. Для этого необходимо выразить соответствующие уравнения поля и модели в относительных безразмерных единицах, вводя так называемые базисные единицы для всех переменных и физических

т, входящих в эти уравнения. Найденные модели подобия из уравнений поля и уравнений подобия должны быть тождественными. Нельзя убедиться, что при использовании декартовой системы координат тождественность соответствующих критериев подобия имеет

$$\left[\frac{\epsilon_0 \mu_0 l_0^2}{c_0^2 t_0^2} \right] = \left[\frac{L_m C_m t_m^2}{t_m^2} \right], \quad (19)$$

$$\left[\frac{\epsilon_0 \mu_0 l_0^2}{c_0^2 t_0^2} \right] = \left[\frac{L_m t_m^2}{R_m t_m} \right] \text{ при } R_m = 0. \quad (20)$$

Индекс o относится к физическим параметрам поля (образца), индекс m — к параметрам модели. l — базисная длина, принятая одинаковой всех координатных осей.

В электрической модели число элементов n или n' в том или ином направлении соответствует числу n , равной здесь h , где

$$h = \Delta x = \Delta y = \Delta z.$$

Чем больше элементов n модели будет приходить на единицу длины (что соответствует уменьшению h), тем точнее распределение плотностей токов по элементам модели и значения напряжений в узловых точках модели будут соответствовать величинам искомым компонентам E и H в соответствующих точках пространства. Первоначальную длину l_0 удобно считать единицей длины волны, процесса в образце, независимо от фактической величины длины волны. В таком случае номинальную длину l_m в модели удобно оставить как n — число элементов модели, входящих на единицу длины волны l_0 . Аналогично условиям (19) и (20) может быть обеспечена тождественность критериев подобия при использовании цилиндрической системы координат.

В. Обеспечение на модели граничных условий исследуемой области поля. Исследуемые области поля обычно представляют собой пространства, частично или полностью ограниченные металлическими поверхностями (например: волноводы, объемные резонаторы, коаксиальные линии) или пространства, некоторые физические параметры которых резко отличаются от соответствующих параметров окружающей среды (например, диэлектрические волноводы, диэлектрические антенны).

Независимо от конфигурации области исследования электромагнитного поля в ней производится решение системы уравнений Максвелла с учетом граничных условий.

Если ограничивающую металлическую поверхность полагать идеальной, то вектор \vec{E} должен быть перпендикулярен к поверхности металла, а вектор \vec{H} параллелен ей, т. е. все тангенциальные компоненты электрического поля должны быть равны нулю, а все нормальные компоненты магнитного поля

в любой точке поверхности стенок исследуемой области должны быть равны нулю. Так, например, для волн типа H_{on} и H_{onl} $E_{xzp} = H_{yzp} = 0$, следовательно, для обеспечения на электрической модели граничных условий, для этих типов волн надо закоротить все узловые точки, лежащие на соответствующих границах модели. При этом получим:

$$i_{zp} = i_{zrp} = 0.$$

Не представляет, однако, никаких принципиальных трудностей учесть на модели конечную проводимость металлических стенок, ограничивающих данную область. В этом случае металл можно рассматривать как другую среду, имеющую иные параметры, чем среда ограниченной области, причем поверхность металлических стенок является границей раздела двух сред. На границе происходит скачок параметров пространства. На модели эта задача легко решается тем, что, начиная с некоторого определенного участка, значения индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений элементов и стоков модели также изменяются скачком в соответствии с условиями (19) — (20). Требуемое число элементов сетки n' , моделирующих металлические стенки, нетрудно определить из следующих соображений. Если принять n число элементов, приходящихся на волну λ , то

$$n' = n \frac{\delta}{\lambda} \quad (21)$$

где δ — глубина проникновения тока в металл.

По такому же принципу обеспечиваются граничные условия при изучении на моделях электромагнитных процессов, протекающих, например, в диэлектрическом волноводе, когда ограничивающие металлические поверхности отсутствуют. Здесь мы тоже имеем дело с двумя средами, отличающимися некоторыми своими параметрами, главным образом величиной ϵ .

Второй средой здесь является не металл, а воздух, в котором затухание электромагнитных волн, излучаемых через «стенки» волновода, практически отсутствует (затухание происходит в бесконечности). Поэтому здесь, как и в ряде других случаев, возникает проблема моделирования неограниченного пространства.

Между волновыми сопротивлениями неограниченного пространства и линии существует известная аналогия. Так как включение в конце линии сопротивления, равного волновому сопротивлению линии, создает такой же эффект, как удлинение линии до бесконечности, то возникает мысль, что подключение к определенным точкам сетки, моделирующей электромагнитные процессы в пространстве, сопротивлений, равных волновому сопротивлению сетки, должно моделировать эффект неограниченного пространства.

4. Примеры составления двухмерных моделей. На рис. 3 приведена двухмерная модель прямоугольного волновода, изображенного на рис. 4, для исследования волн типа H_{on} при

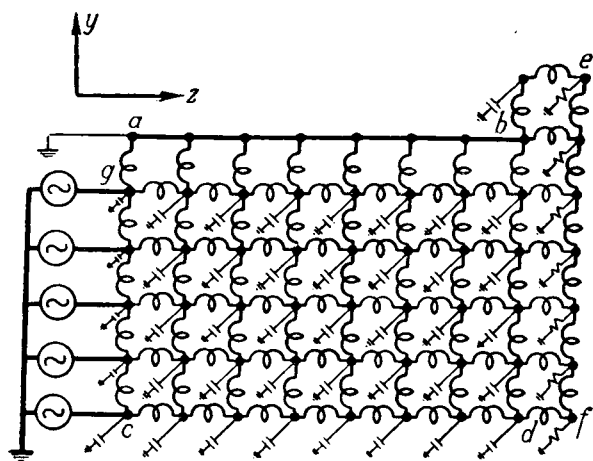


Рис. 3. Двухмерная электрическая модель волновода.

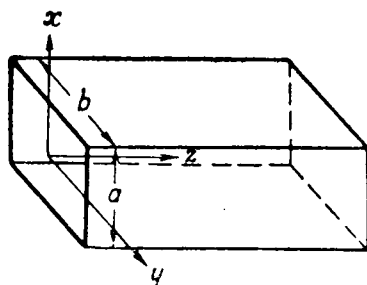


Рис. 4. Волновод прямоугольного сечения.

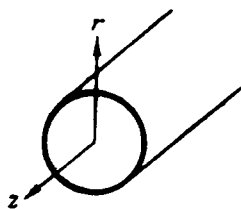


Рис. 5. Цилиндрический волновод круглого сечения.

отсутствии потерь в диэлектрике. Граничные условия задаются здесь следующим образом. Все узловые точки, лежащие на граничной линии ab , закорачиваются и заземляются. Узловые точки, расположенные на линии gc , присоединяются к источнику переменной э. д. с., частота которой рассчитывается из условия инвариантности уравнений поля и модели. К узловым точкам, расположенным на линии ef , подключены активные сопротивления, моделирующие свободное пространство. Линия cd является здесь линией симметрии. На такой же модели могут быть исследованы волны типа H_{m0} и H_{0l} . При этом для волн H_{m0} ось y должна быть заменена осью x . Для волн H_{0l} ось y должна быть заменена осью r ; кроме того, необходимо иметь в виду, что в последнем случае самоиндукции элементов модели и емкости стоков являются

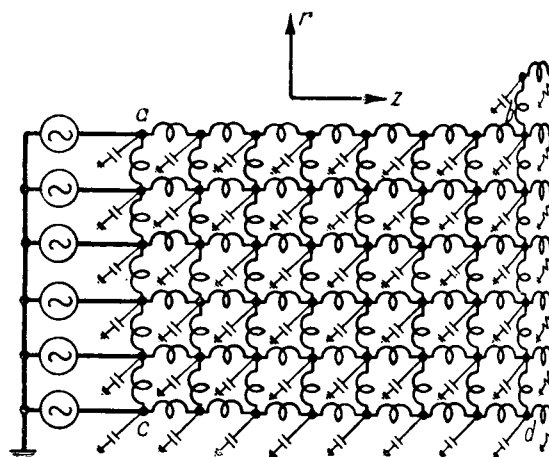


Рис. 6. Двухмерная электрическая модель цилиндрического волновода круглого сечения для исследования типа E_{0l} .

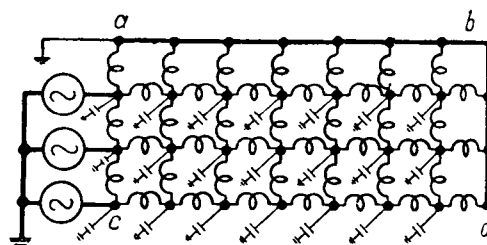


Рис. 7. Двухмерная электрическая модель цилиндра круглого сечения для исследования волн типа H_{0l} .

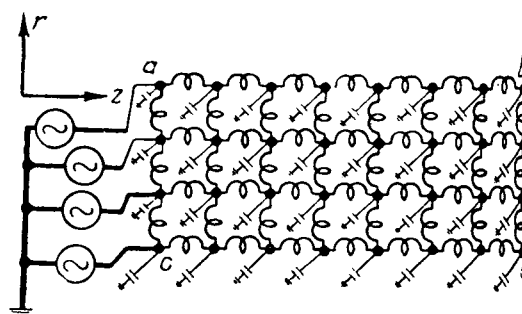


Рис. 8. Двухмерная электрическая модель цилиндра круглого сечения для исследования волн типа E_{0l} .

в направлении оси r переменными величинами в функции от r . В этом случае рис. 3 будет представлять собой модель цилиндрического волновода круглого сечения, изображенного на рис. 5. То же относится к рис. 6, представляющему собой модель волновода, приведенного на рис. 5, для исследования волн типа E_{0l} . Различие в моделях рис. 3 и 6 заключается только в том, что во втором случае граничные узловые точки, расположенные на линии ab , не закорачиваются.

На рис. 7 и 8 представлены модели цилиндра круглого сечения для исследования волн

$E_{\text{от}}$ соответственно при отсутствии потерь в электрике. В этих моделях самоиндукции в направлении оси z также являются важными величинами. Можно привести очень большое число всяких примеров построения аналогичных схем, но мы полагаем, что приведенных схем достаточно для уяснения принципа и методики внутренних здесь принципов моделирования. В заключение автор считает своим долгом сказать, что им были получены ценные советы проф. Л. И. Гутенмахера.

Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование физических явлений. Электричество, № 5, 1940.
2. Л. И. Гутенмахер. Электрические модели. Изд. Академии наук СССР, 1949.
3. J. R. Whinnery and S. Ramo. A New Approach to the Solution of High-Frequency Field Problems. Proc. Inst. Radio Eng., № 5, 1944.
4. Gabriel Kron. Equivalent Circuit of the Field Equations of Maxwell. Proc. Inst. Radio Eng., № 5, 1944.
5. К. А. Круг. Основы электротехники, т. II. Госэнергоиздат, 1932.

[14.12.1949]



Влияние вихревых токов на процесс установления потока

Кандидат техн. наук С. Я. ДУНАЕВСКИЙ

Трест „Электропривод“ МЭП

Влияние вихревых токов на процессы возбуждения неоднократно рассматривалось в технической литературе. Однако из наиболее интересных для практики случаев — массивный расслоенный сердечник, разделенный воздушным зазором, не получил исчерпывающего освещения.

Состояние вопроса. Известны две противоположные точки зрения на структуру магнитного поля на различных участках магнитопровода. Согласно одной [Л. 1, 3] во время переходного процесса в воздушном зазоре и в расслоенной части сердечника существует такое же распределение магнитного потока, как и в массивном сердечнике (рис. 1,а). Вторая точка зрения [Л. 4] предполагает, что одновременно существует неравномерное распределение потока в массивной и равномерное распределение на всех участках магнитной цепи (рис. 1,б). Обоснование этой точки зрения предполагает, что на границе массивного участка воздушного зазора существует тонкий «идеальный» слой ($\mu = \infty$ и $\rho = \infty$), в котором и происходит изменение структуры магнитного поля.

В представлении приближенные, не учитывающие изменение индукции в двух измерениях. В практических расчетах приходится удовлетворяться методами расчета, основанными на таких ограниченных представ-

Рассматриваются методы расчета, позволяющие учесть влияние вихревых токов на процессы установления потока в магнитных цепях, содержащих массивные участки. Излагается разработанный автором метод и результаты его экспериментального исследования.

гласно рис. 1,а (одинаковая структура магнитного поля на всех участках), которое по опыту автора дает лучшее совпадение экспериментальных и рас-

четных данных.

Решение дифференциальных уравнений в частных производных, к которым приводится задача, представляет значительные трудности даже в том случае, когда явления рассматриваются в двух измерениях.

В деталях, необходимых для инженерных расчетов, разработано решение только для магнитопроводов, сечение массивной части которых имеет форму круга или прямоугольника, одно измерение которого значительно превышает другое ($b \gg a$). В электрических машинах и аппаратах часто встречаются массивные части магнитопровода с сечением в виде прямоугольника с соизмеримыми сторонами ($\frac{b}{a} = 1 \div 5$). Решение для этого случая в общей и приемлемой для практических расчетов форме не найдено. Извест-

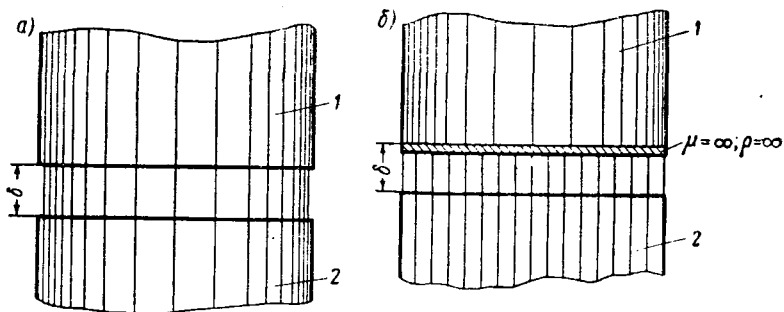


Рис. 1. Структура магнитного поля.

1 — массивная часть сердечника; 2 — расслоенная.

но, например [Л. 1], решение для сердечника с прямоугольным сечением для частного случая, когда ток возбуждения мгновенно принимает установившееся значение (выключение цепи возбуждения без разрядного сопротивления).

Наиболее общий метод расчета предложен Т. Г. Сорокером [Л. 2]. Используя понятие об операторной проводимости, Т. Г. Сорокер нашел решение, с формальной стороны пригодное для сердечников с сечением любой формы (в том числе и прямоугольной). Однако знаменателем операторных уравнений, полученных этим методом, является бесконечный ряд, который возможно просуммировать только в одном частном случае, когда массивная часть сердечников имеет цилиндрическую форму. В случае сердечника с прямоугольным сечением переход от изображений к функциям времени требует решения алгебраического уравнения бесконечно высокой степени. Замена его уравнениями конечной степени (например, второй, третьей) связана с ошибками, общий критерий для оценки которых отсутствует.

Это обстоятельство привело автора к заключению, что целесообразно рассмотреть возможность приближенного решения, основанного на замене прямоугольника другими геометрическими фигурами, эквивалентными по площади и соотношению наибольших измерений. Такими эквивалентными фигурами для прямоугольника могут являться, например, эллипс¹ или ромб.

Автором разработано решение для сердечника в форме ромба и проведены вычисления, результаты которых представлены в виде таблиц и кривых, позволяющих выполнять инженерные расчеты с приемлемой затратой времени.

В опубликованных ранее работах недостаточно внимания уделялось сопоставлению экспериментальных и расчетных данных. Например, совершенно не рассмотрен вопрос о том, как влияет на переходные процессы место размещения обмотки возбуждения (на расслоенной или на массивной части сердечника). Поставленные автором эксперименты дают некоторое освещение этому недостаточно исследованному вопросу.

Математическая формулировка задачи

Обозначения:

I и I_0 — ток возбуждения и его значение при установившемся режиме;

B_1 и B_{10} — индукция, обусловленная током возбуждения, и ее значение при установившемся режиме;

B_2 — индукция, обусловленная вихревыми токами;

μ_0 — магнитная проницаемость пустоты;

R, L_s и w — омическое сопротивление, индуктивность рассеяния и число витков обмотки возбуждения;

L_0 — индуктивность главного потока;

U_0 — напряжение, приложенное к обмотке возбуждения;

Φ_1 и Φ_{10} — магнитный поток, обусловленный током возбуждения, и его значение при установившемся режиме;

Φ_2 — магнитный поток, возбуждаемый вихревыми токами;

Φ — общий магнитный поток;

l_m и Q — средняя длина силовой линии в массивной части сердечника и его сечение;

$\frac{a}{2}$ и $\frac{b}{2}$ — наибольшие измерения сечения массивной части сердечника (для ромба a и b — его диагонали, для эллипса — полуоси), начало координат берется в геометрическом центре сердечника;

$\rho = (2 \div 2,5) \cdot 10^{-5} \text{ ом см}^2/\text{см}$ — удельное сопротивление материала сердечника;

δ' — приведенный воздушный зазор, эквивалентный по магнитному сопротивлению всему магнитному контуру;

σ — коэффициент рассеяния; $\sigma = \frac{L_s + L_0}{L_0} > 1$;

T_0 — электромагнитная постоянная цепи главного потока

$$T_0 = \frac{L_0}{R} = \frac{w^2 Q \mu_0}{\delta' R}.$$

Рассмотрим процесс возбуждения магнитной цепи, состоящей из расслоенного и массивного участков, разделенных воздушным зазором.

Исходя из первой гипотезы [Л. 1], изменения индукции в массивном сердечнике (возбуждения и пространстве) могут быть описаны уравнением

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{l_m}{\delta'} \frac{\partial B}{\partial t}.$$

При этом предполагается, что строение магнитного поля одинаково на всех участках магнитной цепи (рис. 1, а).

Рассматривая случай, когда обмотка возбуждения расположена на массивном участке, индукцию в каждой точке массивного участка магнитопровода можно представить как сумму индукции B_1 , возбуждаемой током намагничивания, и индукции B_2 , вызванной вихревыми токами. В этом случае уравнение (1) может быть переписано в виде:

$$\frac{\partial^2 B_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_2}{\partial y^2} = \frac{\mu_0 l_m}{\rho \delta'} \frac{\partial}{\partial t} (B_1 + B_2).$$

¹ С формальной стороны задача может быть решена для сердечника с эллиптическим сечением. Для инженерных расчетов это решение не пригодно ввиду его сложности.

Общий поток определяется интегрированием по гиперечному сечению сердечника:

$$\Phi = \int_Q (B_1 + B_2) dQ. \quad (3)$$

Чтобы найти индукции B_1 и B_2 и общий поток Φ в функции времени, необходимо также воспользоваться условием равновесия напряжений в цепи возбуждения:

$$IR + L_s \frac{dI}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt} = U_0. \quad (4)$$

Зависимость между током возбуждения и индукцией B_1 примем линейной и, следовательно,

$$B_{10} = \mu_0 \cdot \frac{I_0 w}{\delta'}. \quad (5)$$

Используя уравнения (3), (4), (5) и выражение для коэффициента рассеяния и постоянной времени главного потока, получим после преобразований:

$$B_1 + \sigma T_0 \frac{dB_1}{dt} + \frac{T_0}{Q} \frac{\partial}{\partial t} \int B_2 dQ = B_{10}. \quad (6)$$

После введения в уравнения (2) и (6) операторов и совместных преобразований, получим следующее операторное уравнение относительно B_2 :

$$\frac{\partial^2 B_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_2}{\partial y^2} - \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{I_m}{\delta'} p B_2 = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{I_m}{\delta'} \frac{p}{1 + \sigma T_0 p} \times \\ \times \left[B_{10} - \frac{T_0 p}{Q} \int B_2 dQ \right]. \quad (7)$$

Уравнение (7) описывает включение при нулевых начальных условиях. Решение уравнения (7) дано в приложении.

Используя операторную функцию $A(p)$ (приложение), можно решать и более сложные задачи — переходные процессы при $U \neq \text{const}$, возбуждение при наличии нескольких массивных участков магнитопровода и т. п. При решении таких задач обычно исходят из эквивалентной схемы, соответствующей уравнению (XII), для тока возбуждения [Л. 2]. С формальной стороны, влияние вихревых токов на изменение тока возбуждения выражается в том, что вместо электромагнитной постоянной времени T_0 в уравнение входит произведение $T_0 A(p)$, которое называют операторной или переходной постоянной времени. В этом смысле можно также говорить об операторной (переходной) индуктивности $L(p) = L_0 A(p)$, где L_0 — индуктивность обмотки возбуждения.

Таким образом, чтобы учесть влияние вихревых токов, операторные уравнения следует составлять для эквивалентной схемы, в которой индуктивность заменена переходной индуктивностью $L(p)$.

Выражение для $A(p)$ в данной работе представлено в интегральной форме, которая в некоторых случаях удобнее, чем бесконечный ряд [Л. 2]. Однако интегральная форма функции $A(p)$ также не позволяет рассчитать переходные процессы для сердечника с прямоугольным сечением, так как в этом случае $\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)$ не может быть выражено в таком виде, чтобы

$$\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right) = \text{const.}$$

на контуре

Интересные свойства функций $A(p)$ и $\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)$ можно выявить, рассматривая включение

при $T_0 = 0$ (электрическая инерция обусловлена только вихревыми токами). Как видно из (VIII) и (XII), величины B_1 и Φ_1 в этом случае мгновенно принимают установившиеся значения B_{10} и Φ_{10} , а частный интеграл равен $F(p) = -B_{10}$. Закон распределения общей индукции может быть найден на основании (VII)

$$B = B_{10} + B_2 = B_{10} - B_{10} \left[1 - \frac{\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)}{\varphi(q)} \right] = \\ = B_{10} \frac{\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)}{\varphi(q)}.$$

Таким образом, функция $\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)$ дает закон распределения общей индукции во времени и в пространстве (в массивной части сердечника). Как это показано на рис. 2, при включении поток постепенно проникает с периферии вглубь массивной части сердечника.

Рассматривая включение при $T_0 = 0$, нетрудно также установить, что функция $A(p)$ дает закон изменения во времени общего потока [см. уравнение (XIII)].

Как видно из уравнений (X) и (XI), функции $1 - \frac{\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)}{\varphi(q)}$ и $1 - A(p)$ характеризуют изменение индукции и потока, вызванные вихревыми токами.

Временные зависимости для сердечников с сечением в форме ромба. Как уже указывалось, для сердечника прямоугольного сечения не удается получить решения в форме, пригодной для практических расчетов. Ниже рассматривается решение для сердечника с сечением в форме ромба, который при определенных условиях эквивалентен прямоугольнику. Условие эквивалентности может быть сформулировано в виде равенства площадей и соотношений наибольших измерений (рис. 3) прямоугольника

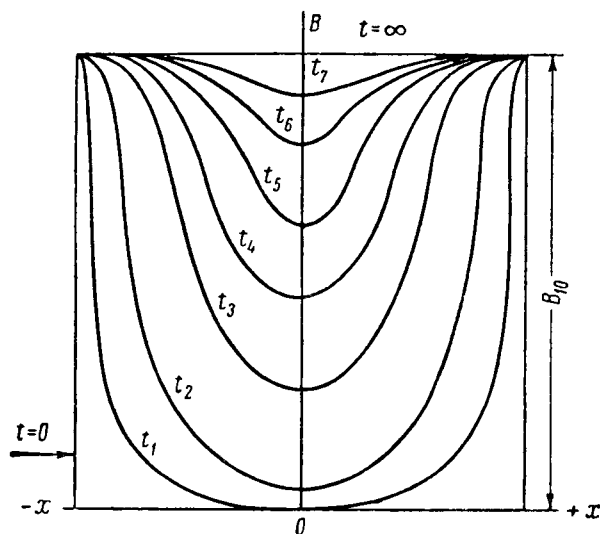


Рис. 2. Распределение индукции по сечению сердечника для различных моментов времени процесса возбуждения

и эквивалентного ему ромба

$$Q = \frac{ab}{2} = a'b' \text{ и } \frac{a'}{b'} = \frac{a}{b};$$

и, следовательно,

$$\left. \begin{aligned} a &= a' \sqrt{2}, \\ b &= b' \sqrt{2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

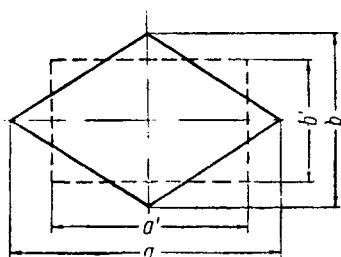


Рис. 3.

Протекание переходных процессов в двух эквивалентных магнитных цепях иллюстрирует рис. 4, где показаны кривые изменения тока в обмотке возбуждения экспериментального дросселя с массивным ярмом прямоугольного и ромбического сечений. Как видно из рис. 4, процессы протекают примерно идентично. Следовательно, прямоугольное сечение массивной части магнитопровода в технических расчетах может быть „аппроксимировано“ сечением в форме ромба. В случае квадратного сечения предлагаемый метод с формальной стороны является вполне строгим.

Если допустить, что линии элементарных токов параллельны сторонам ромба, то решение однородного уравнения можно представить в виде:

$$\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right) = \cos \left[q \left(\pm \frac{x}{a/2} \pm \frac{y}{b/2} \right) \right]. \quad (9)$$

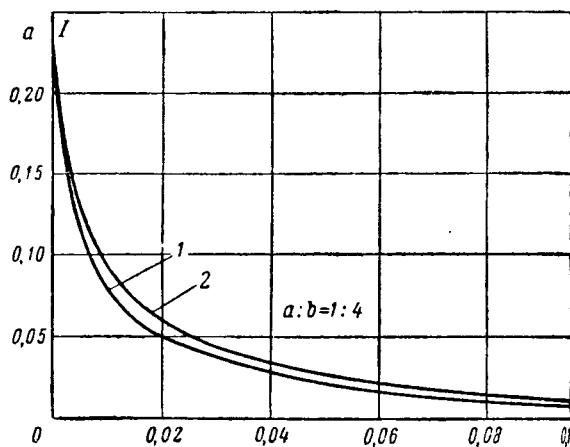


Рис. 4. Затухание тока при различной форме массивного сердечника.

1 — ромб, $I_0 = 0,22 a$; 2 — прямоугольник, $I_0 = 0,226 a$.

Знаки в скобках выбираются различными в каждом квадранте — в соответствии с показанными на рис. 5 уравнениями прямых контура ромба. При этом для всех четырех квадрантов выдерживается указанное выше условие:

$$\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right) = \cos q = \text{const.}$$

на контуре

Операторная функция $A(p)$ может быть числена как сумма четырех интегралов (по каждому квадранту отдельно):

$$A(p) = \frac{\int \cos \left[q \left(\frac{x}{a/2} + \frac{y}{b/2} \right) \right] dQ}{Q \cos q} + \frac{\int_{\text{QII}} \cos \left[q \left(-\frac{x}{a/2} + \frac{y}{b/2} \right) \right] dQ}{Q \cos q} + \frac{\int_{\text{QIII}} \cos \left[q \left(-\frac{x}{a/2} - \frac{y}{b/2} \right) \right] dQ}{Q \cos q} + \frac{\int_{\text{QIV}} \cos \left[q \left(\frac{x}{a/2} - \frac{y}{b/2} \right) \right] dQ}{Q \cos q};$$

где Q_I — площадь первого квадранта, Q_{II} — второго и т. д. После интегрирования получим:

$$A(p) = 2 \frac{q \sin q + \cos q - 1}{q^2 \cos q}. \quad (10)$$

Учитывая, что в соответствии с уравнением (9) оператор

$$p = -\frac{q^2}{T_s}, \quad (11)$$

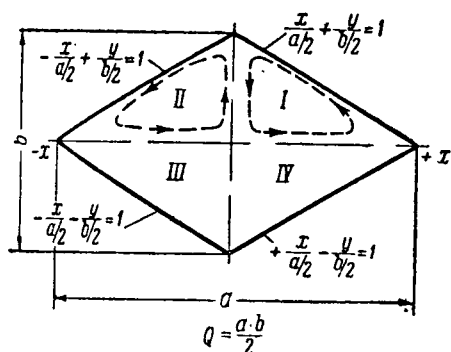


Рис. 5.

подставляя значение операторной функции Φ в уравнения (XII), (XIII), получим:

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{1 - (\sigma - 1) \frac{T_0}{T_s} q^2 - 2 \frac{T_0}{T_s} \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q}} \quad (12)$$

$$= \frac{2 \frac{q \sin q + \cos q - 1}{q^2 \cos q}}{1 - (\sigma - 1) \frac{T_0}{T_s} q^2 - 2 \frac{T_0}{T_s} \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q}} \quad (13)$$

числение временных функций может быть введено по формуле

$$f(t) = \frac{Y(0)}{Z(0)} + 2 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{Y(q_v)}{q_v Z'(q_v)} e^{-q_v^2 \frac{t}{T_s}} \quad (14)$$

которая является модификацией формулы разложения для случая, когда изображение выражено через переменную q , связанную с операторным соотношением (11).

Подставив в (14) значения $Y(q)$ и $Z(q)$ из (11) и (13), получим следующие выражения для тока возбуждения и потока в функции времени:

$$i = 1 - \frac{T_s}{T_0} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{e^{-q_v^2 \frac{t}{T_s}}}{q_v \left[(\sigma - 1) q_v + \frac{q_v - (1 - \cos q_v) \sin q_v}{\cos^2 q_v} \right]} \quad (15)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = 1 -$$

$$\left(\frac{T_s}{T_0} \right)^2 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\left[1 - \frac{q_v^2 (\sigma - 1)}{T_s / T_0} \right] e^{-q_v^2 \frac{t}{T_s}}}{q_v^3 \left[(\sigma - 1) q_v + \frac{q_v - (1 - \cos q_v) \sin q_v}{\cos^2 q_v} \right]} \quad (16)$$

$$\gamma_v = \frac{q_v^2 \sigma}{T_s / T_0}; \quad (17)$$

$$T = \sigma T_0. \quad (18)$$

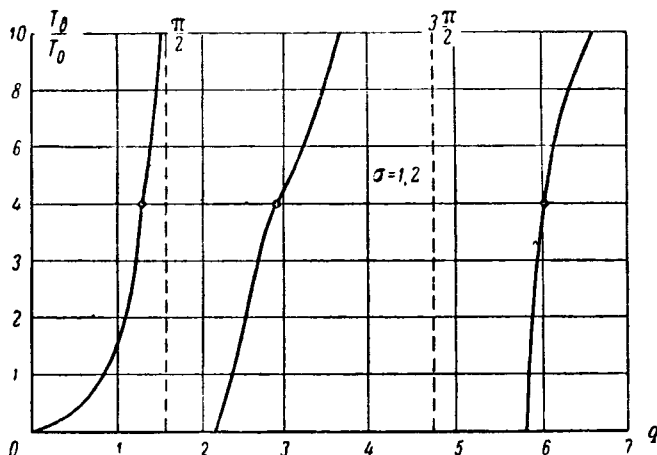


Рис. 6. Графическое решение определяющего уравнения

$$T_s / T_0 = (\sigma - 1) q^2 + 2 \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q}.$$

Значения q_v должны быть найдены из определяющего уравнения $Z(q) = 0$, которое в соответствии с уравнениями (12) и (13) может быть записано в виде:

$$(\sigma - 1) q_v^2 + 2 \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q} = \frac{T_s}{T_0}. \quad (19)$$

Графическое определение первых трех корней уравнения (19) при $\sigma = 1,2$ представлено на рис. 6.

Величина $\frac{T_s}{T_0}$ легко может быть найдена по конструктивным данным исследуемой магнитной цепи.

Так как постоянные времени имеют значения

$$T_s = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{l_m}{\delta} \cdot \frac{Q}{2 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)} \text{ и } T_0 = \frac{\mu_0 \omega^3 Q}{\delta' R},$$

то их отношение оказывается равным:

$$\frac{T_s}{T_0} = \frac{l_m R}{2 \omega^3 \rho \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)}. \quad (20)$$

Для инженерных целей обычно наиболее интересной является зависимость общего потока Φ от времени. Согласно уравнению (16) эта зависимость может быть записана в виде:

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = 1 - \sum_{v=1}^{\infty} C_v e^{-\gamma_v \frac{t}{T_s}}, \quad (21)$$

где

$$C_v = \left(\frac{T_s}{T_0} \right)^2 \frac{1 - \frac{q_v^2 (\sigma - 1)}{T_s / T_0}}{q_v^3 \left[(\sigma - 1) q_v + \frac{q_v - (1 - \cos q_v) \sin q_v}{\cos^2 q_v} \right]}. \quad (22)$$

Изложенные выше методы расчета рассматривали процессы включения при нулевых начальных условиях. В более общих случаях, когда начальные условия отличаются от нулевых, расчет можно вести по формуле:

$$\frac{\Phi - \Phi_{\kappa}}{\Phi_{10} - \Phi_{\kappa}} = 1 - \sum_{v=1}^{\infty} C_v e^{-\gamma_v \frac{t}{T}}, \quad (23)$$

где Φ_{κ} — значение потока при $t=0$.

Процесс гашения поля описывается уравнением (23) при $\Phi_{10}=0$. В этом случае

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\kappa}} = \sum_{v=1}^{\infty} C_v e^{-\gamma_v \frac{t}{T}}. \quad (24)$$

Выражения, аналогичные (22), (23) и (24), также имеют место для тока возбуждения и других переменных.

Зависимость между коэффициентами первых трех членов ряда в формулах (22), (23) и (24) и величиной T_{κ}/T_0 представлена кривыми рис. 7. Пользуясь этими кривыми, инженерные расчеты можно выполнить с минимальной затратой времени. Для этого необходимо по формуле (20) подсчитать соотношение T_{κ}/T_0 и по кривым рис. 7 найти соответствующие значения C_v и γ_v .

В заключение рассмотрим случай, когда электрическая инерция обусловлена только вихревыми токами. Положив в формуле (22) $T_0=0$ и раскрыв неопределенность, получим:

$$C_{v0} = \frac{32}{\pi^3} \cdot \frac{\left[(2v-1) \frac{\pi}{2} - (-1)^v - 1 \right]}{(2v-1)^3}.$$

Первые шесть коэффициентов при этом оказываются равными: 0,59; 0,218; 0,0568; 0,0362; 0,0186; 0,0141 и их сумма

$$\sum_{v=1}^6 C_{v0} = 0,9337.$$

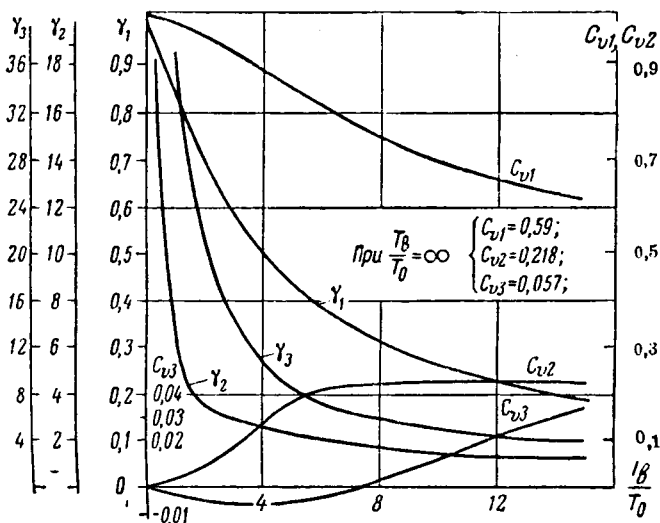


Рис. 7. Определение коэффициента γ и C_{κ} .

Указанные выше значения коэффициентов (при $T_0=0$) для сердечника с сечением в ромба интересно сравнить с значениями C_{κ} цилиндрического сердечника.

Как известно [Л. 2], в этом случае

$$C_{v0} = \frac{4}{q_v^2},$$

где q_v — корни трансцендентного уравнения, вой частью которого является функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Первые шесть коэффициентов при этом имеют значения: 0,691; 0,131; 0,0534; 0,018; 0,0129. Их сумма

$$\sum_{v=1}^6 C_{v0} = 0,9353.$$

Таким образом, сходимость рядов, выражающих поток в функции времени для сердечника с сечением в виде ромба и для цилиндрического сердечника, в первом приближении, одинакова.

Результаты экспериментов. Экспериментальная часть проводилась на изготовленном этой цели дросселе специальной конструкции, что позволило поставить опыты при различных условиях: форма массивной части сердечника

соотношение постоянных времени $\frac{T_{\kappa}}{T_0}$, место размещения обмотки возбуждения (на расслоенной части сердечника или на массивном ярме) и т. д. При опытах снимались осциллограммы тока возбуждения и э. д. с. измерительной обмотки. Зависимость потока от времени определялась физическим интегрированием.

Анализ осциллограмм показал, что характер процессов установления потока в большой мере зависит от места расположения обмотки возбуждения. Если обмотка возбуждения расположена на массивном ярме, то вихревые токи могут оказать существенное влияние на процессы возбуждения и гашения поля. В этом случае качественная сторона явлений может быть описана формулами (21), (22) и (23), которые дают удовлетворительное совпадение с опытом.

Рассматривая влияние места размещения обмотки возбуждения на характер процесса установления потока, необходимо указать, что изложенные в тексте методы расчета, использующие суперпозицию индукций B_1 и B_2 [уравнение (1)], с формальной стороны являются строгими только для случая, когда обмотка возбуждения находится на массивном ярме.

Проведенные эксперименты позволили выявить, насколько это обстоятельство влияет на совпадение данных расчета и опыта в том случае, когда обмотка возбуждения находится на расслоенной части сердечника.

В результате экспериментов, относящихся к последнему случаю, было найдено следующее

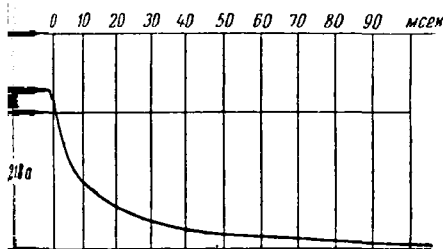


Рис. 8.

1. Если обмотка возбуждения расположена на расслоенной части сердечника, вихревые токи значительно меньше влияют на процесс возбуждения, чем это следует из расчета по формуле (20). В этом случае процесс возбуждения даже при сравнительно больших соотношениях $\frac{T_e}{T_0}$ может быть с точностью до 5—7% описан экспоненциальной зависимостью

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}.$$

Необходимо заметить, что зависимость тока возбуждения от времени во всех случаях значительно резче отличается от экспоненты, чем та же зависимость для потока. Эта особенность рассматриваемых процессов может быть объяснена, исходя из уравнения

$$I = \frac{U - w \frac{d\Phi}{dt}}{R}.$$

Незначительное отклонение от экспоненты в кривой $\Phi(t)$ может сильно изменить значение производной $\frac{d\Phi}{dt}$, что и является причиной того,

что зависимость $I(t)$ значительно сильнее отличается от экспоненты, чем зависимость $\Phi(t)$.

В связи с этим следует признать неверным тот вывод, что влияние вихревых токов на переходные процессы путем сравнения статической и динамической (построенной по осциллограмме) индуктивности. Целесообразнее рассматривать в отдельности кривые $\Phi(t)$ и $I(t)$, сравнивая их с соответствующими экспоненциальными кривыми.

2. Процесс гашения поля независимо от места расположения обмотки возбуждения может быть описан уравнением (23).

Ниже приведен анализ осциллограммы гашения поля (рис. 8), снятой при следующих данных. Возбуждение осуществлено обмоткой из 0 витков, расположенных на расслоенной части сердечника. Ядро — сплошное квадратного сечения $2,9 \times 2,9$ см, сталь с удельным сопротивлением $\rho = 2,61 \cdot 10^{-5}$ ом см²/см. Средняя длина силовой линии в ядре $l_m = 7,7$ см.

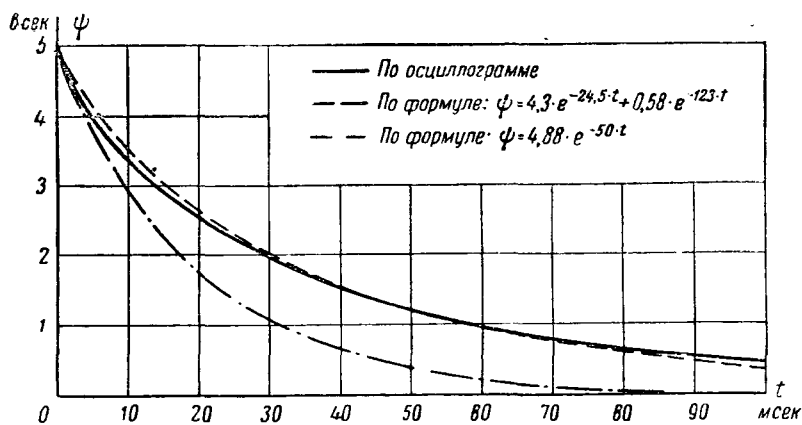


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и расчетных данных.

Ток возбуждения при $t=0$: $I_0 = 0,218$ а. Сопротивления: обмотки возбуждения $R_s = 170$ ом, разрядное $R_p = 950$ ом, суммарное $R = 1120$ ом.

На рис. 9 представлены кривые, построенные по осциллограмме и полученные расчетом, основные данные которого приведены ниже.

Число потокоцеплений при $t=0$ определялось графическим интегрированием и оказалось равным:

$$\Psi_0 = 4,88 \text{ всек.}$$

Электромагнитная постоянная времени

$$T = \frac{\Psi_0}{I_0 R} = \frac{4,88}{0,218 \cdot 1120} = 0,02 \text{ сек.}$$

Следовательно, если пренебречь вихревыми токами, зависимость числа потокоцеплений от времени должна быть записана в виде:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-\frac{t}{T}} = 4,88 e^{-50 t}.$$

На рис. 9 эта кривая показана пунктиром с точкой.

Для расчета $\Psi(t)$ с учетом вихревых токов по формуле (20) находим:

$$\frac{T_e}{T_0} = \frac{l_m R}{2 \cdot w^2 \rho \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)} = \frac{7,7 \cdot 1120}{2 \cdot 4500^2 \cdot 2,61 \cdot 10^{-5} (1 + 1)} = 4,09.$$

По кривым рис. 7 определяем значения коэффициентов

$$\gamma_1 = 0,49; \quad \gamma_2 = 2,45; \quad \gamma_3 = 10,7;$$

$$C_{01} = 0,88; \quad C_{02} = 0,14; \quad C_{03} = 0,007.$$

Таким образом, зависимость числа потокоцеплений от времени может быть записана в виде:

$$\frac{\Psi}{\Psi_0} \approx 0,88 \cdot e^{-0,49 \frac{t}{T}} + 0,14 \cdot e^{-2,45 \frac{t}{T}} - 0,007 \cdot e^{-10,7 \frac{t}{T}}.$$

Третьим членом в виде его малости и быстрого затухания можно пренебречь.

Подставив значение $\Psi_0 = 4,88$ *всек* и $T = 0,02$ *сек* и введя ко второму члену поправку, позволяющую удовлетворить начальным условиям при конечном числе членов ряда, получим:

$$\Psi \approx 4,3 \cdot e^{-24,5t} + 0,58 \cdot e^{-123t}.$$

Из рис. 9 видно весьма близкое соответствие кривой, рассчитанной по этой формуле (показана пунктиром), с данными опыта (сплошная кривая). Из рис. 9 также видно, что расчет методом, не учитывающим вихревые токи (по экспоненте), приводит к значительным ошибкам.

Выводы 1. Предлагаемые методы учета влияния вихревых токов могут быть применены для анализа процессов возбуждения и гашения поля в тех случаях, когда обмотка возбуждения находится на массивной части сердечника, и для анализа процесса гашения поля независимо от места расположения обмотки возбуждения. При определенных соотношениях параметров ($\frac{T_0}{T_0} \geq 3$) влияние вихревых токов на указанные выше процессы установления потока значительное.

2. Влияние вихревых токов на процесс возбуждения в случае расположения обмотки возбуждения на расслоенной части сердечника незначительное и в инженерных расчетах можно принять, что в этом случае поток изменяется по экспоненте.

Приложение. Решение уравнения (7) может быть найдено в виде суммы одного из решений однородного уравнения и частного интеграла. Принимаем, как обычно, что решение однородного уравнения является функцией оператора и координат, а частный интеграл от координат не зависит.

Решение однородного уравнения ищем в виде:

$$B'_2 = B(p) \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right), \quad (I)$$

где B'_2 — решение однородного уравнения, выраженное в функции координат и оператора;

q и $B(p)$ — коэффициенты, которые являются функциями только оператора (от координат не зависят);

q — безразмерная величина;

$B(p)$ — имеет размерность индукции;

$\varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right)$ — функция координат и оператора. В прямоугольных координатах эта функция должна удовлетворять условиям

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) = - \left(\frac{q}{a/2} \right)^2 \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right); \quad (II)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) = - \left(\frac{q}{b/2} \right)^2 \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right). \quad (III)$$

Подставляя значение B'_2 и ее производных в однородное уравнение, находим, что коэффициент q должен

удовлетворять уравнению

$$q^2 = - \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{l_m}{\delta'} \cdot \frac{ab}{4 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)} \cdot p.$$

Выражение

$$T_0 = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{l_m}{\delta'} \cdot \frac{a \cdot b}{4 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)},$$

являющееся множителем при операторе в правой (IV), характеризует именно те свойства массивной сердечника, которые определяют электрическую индукцию системы, обусловленную вихревыми токами. На это нововведение T_0 называют постоянной времени реальных токов.

Возвращаясь к уравнению (7), запишем его рекуррентно в виде суммы решения однородного уравнения и частного интеграла

$$B_2 = B'_2 + F(p) = B(p) \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) + F(p).$$

Контур сердечника не охватывается вихревыми токами и граничные условия определяются в виде: $B_2 = 0$ и, следовательно, на контуре

$$0 = B(p) \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) + F(p).$$

на контуре

Учитывая (VIa) и наше исходное предположение независимости частного интеграла от координат замечаем, что при граничных условиях $B_2 = 0$ значение функции $\varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right)$ также не должно зависеть от координат.

Обозначим $\varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) = \varphi(q)$, и на основании (VI) найдем:

$$B_2 = F(p) \cdot \left[1 - \frac{\varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right)}{\varphi(q)} \right]. \quad (V)$$

Частный интеграл теперь может быть найден уравнения (7) путем подстановки в него значений частных производных индукции B_2 и интеграла $\int_Q B_2 dQ$.

После преобразования найдем:

$$F(p) = - \frac{B_{10}}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)}, \quad (VI)$$

где

$$A(p) = \frac{\int_Q \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) dQ}{Q \varphi(q)}.$$

Далее на основании уравнений (VII), (3), (5) и легко определяются все остальные переменные в функции оператора

$$\frac{B_2}{B_{10}} = - \frac{1 - \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) \frac{1}{\varphi(q)}}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)},$$

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_{10}} = \frac{\int_Q B_2 dQ}{\Phi_{10}} = \frac{1 - A(p)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)}, \quad (VII)$$

$$\frac{B_1}{B_{10}} = \frac{I}{I_0} = \frac{\Phi_1}{\Phi_{10}} = \frac{1}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)}, \quad (\text{XII})$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = \frac{A(p)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)}, \quad (\text{XIII})$$

$$\frac{B}{B_{10}} = \frac{\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)} \cdot \frac{1}{\varphi(q)}. \quad (\text{XIV})$$

становимся на некоторых свойствах операторных

$$A(p) \text{ и } \varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right).$$

Из видно из (IX), $A(p)$ является соотношением сред- значения функции, удовлетворяющей однородному ению, и значения этой функции на контуре. Если не токи отсутствуют, то

$$\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right) = \text{const} = \varphi(q).$$

и, следовательно, $A(p) = 1$, $B_2 = 0$ и $\varphi_2 = 0$, а остальные переменные принимают форму, соответствующую экспоненциальным функциям:

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = \frac{I}{I_0} = \frac{B}{B_{10}} = \frac{1}{1 + \sigma T_0 p}.$$

В общем случае $A(p) \leq 1$.

Литература

1. Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках. ГИЗ, 1931.
2. Т. Г. Сорокер. О переходных процессах в цепях с массивными сердечниками. Электричество, № 5, 1941.
3. E. Weber. Field Transients in Magnetic systems. Tr. of AIEE, vol. 50, p. 1234—1247, 1931.
4. G. Wagner. Transients in Magnetic Systems. El. Eng., vol. 52, 1934.

[27.2.1950]



Расчет индуктивностей проводов способом численного интегрирования

Кандидат техн. наук, доц. Л. А. ЦЕЙТЛИН

Ленинград

ление. Расчет соб- и взаимных ин- дуктивностей проводов и ров сложной формы н со значительными ястями. Общее реше- ной задачи известно для прямолиней- роводов и для кон- составленных из прямолинейных участков

2].
Собственные и взаимные индуктивности кривых проводов, как правило, не выража- в конечном виде через геометрические ве- определяющие их размеры и взаимное ожение. Но даже в тех случаях, когда не формулы для индуктивностей могут получены, эти формулы большей частью сложны, и расчет по ним требует значи- времени. Особенно неудобны формулы асчета взаимной индуктивности проводов курор, размеры которых значительно мень- стояний между ними. В этом случае от- е члены, через которые выражается вза- индуктивность, обычно во много раз : результата, так что весь расчет прихо- вести со степенью точности, значительно

Показано, что расчет собственной индуктивности криволинейного провода приводится к двукратному численному интегрированию, а определение взаимной индуктивности двух проводов, один из которых является прямолинейным или представляет собой замкнутое круговое кольцо, может быть сведено к однократному численному интегрированию. Статья показывает путь от формулы к числу в важной задаче, встречающейся на практике.

превышающей степень точности, требуемую от результата.

В настоящей статье рассматривается вопрос об определении индуктивностей способом численного интегрирования.

Этот способ может быть

применен как в тех случаях, когда иное решение задачи невозможно, так и в тех случаях, когда расчет способом численного интегрирования приводит к результату проще и быстрее, чем расчет по соответствующим конечным формулам. Мы будем рассматривать только «линейные» провода, т. е. провода, осевые размеры и взаимные расстояния которых значительно больше размеров их поперечных сечений. Кроме того, будем предполагать, что магнитная проницаемость проводов и окружающей их среды одинакова и равна μ_0 .

Расчет взаимной индуктивности проводов. Общее выражение для взаимной индуктивности двух линейных проводов имеет вид:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{\cos \vartheta dl_1 dl_2}{D}, \quad (1)$$

где D — расстояние, а ϑ — угол между элементами длины dl_1 и dl_2 , причем интегрирование производится по оси l_1 одного и по оси l_2 другого провода.

Продemonстрируем вычисление M способом численного интегрирования на примере, причем для возможности оценки результата рассмотрим случай, допускающий решение в конечном виде. Пусть требуется определить взаимную индуктивность криволинейного провода, изогнутого по полуокружности, и прямолинейного провода, совпадающего с диаметром этой полуокружности (рис. 1). Точное решение этой задачи может быть получено с помощью формулы, данной в одной из статей автора [1. 3]. Полагая в формуле (5) этой статьи $\alpha = \pi$, удваивая результат и умножая его на $\frac{\mu_0}{4\pi}$ для перехода от нерационализованной формы к рациональной, получим $M = \frac{\mu_0 a}{\pi}$.

Пользуясь обозначениями рис. 1, представим (1) в виде:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^{+a} dx \int_0^{\pi} \frac{a \sin \vartheta d\vartheta}{D} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^{+a} F(x) dx, \quad (2)$$

где

$$D = \sqrt{a^2 + x^2 - 2ax \cos \vartheta}$$

и

$$F(x) = \int_0^{\pi} \frac{a \sin \vartheta}{D} d\vartheta = \int_0^{\pi} f(x, \vartheta) d\vartheta$$

причем

$$f(x, \vartheta) = \frac{a \sin \vartheta}{D}.$$

Вычислим значения $f(x, \vartheta)$ для всех значений x от $-a$ до $+a$ через $0,2a$ и для всех значений ϑ от 0 до π через $\pi/18$. Сведем результаты вычислений в таблицы, каждая из которых соответствует определенному значению x (см. например, табл. 1, для которой $x = 0,4a$).

Таблица 1

ϑ°	$f(x, \vartheta)$	ϑ°	$f(x, \vartheta)$
0	0,000	90	0,928
10	0,285	100	0,863
20	0,535	110	0,783
30	0,733	120	0,693
40	0,868	130	0,592
50	0,952	140	0,483
60	0,992	150	0,367
70	0,998	160	0,247
80	0,975	170	0,125
90	0,928	180	0,000

Имея таблицу значений $f(x, \vartheta)$, можно найти значение функции $F(x)$ для того значения x , для которого эта таблица составлена. При этом можно пользоваться любой из формул механических квадратур. Применяя первую формулу Симпсона, для $x = 0,4a$ найдем $F(0,4a) = 0,636\pi$.

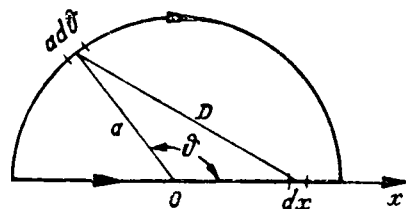


Рис. 1.

Определяя таким же путем $F(x)$ для значений x , получим таблицу 2.

Таблица 2

$\pm \frac{x}{a}$	$\frac{F(x)}{\pi}$
1,0	0,650
0,8	0,638
0,6	0,636
0,4	0,636
0,2	0,636
0,0	0,636

Применяя к интегралу (2) от $F(x)$ формулу Симпсона, найдем $M = 1,003 \frac{\mu_0 a}{\pi}$, т. е. значение весьма близкое к истинному¹.

Приведенный пример достаточен для иллюстрации рассматриваемого способа. Следовательно, отметить, что в случае кривых форм расчет связан с более длительными численными вычислениями.

Заметим также, что в случаях, не требующих значительной точности, расстояние D можно определять графически по надлежащим образом выполненному чертежу обоих рассматриваемых проводов.

Расчет взаимной индуктивности произвольной формы и прямолинейного провода. Для определения взаимной индуктивности двух проводов в общем случае требуется выполнить двойное интегрирование. В случае, когда один из проводов является прямолинейным, второе интегрирование может быть выполнено в конечном виде и тем самым объем вычислений весьма существенно сокращается.

Пусть необходимо определить взаимную индуктивность провода произвольной формы и прямолинейного провода (рис. 2). Уравнение оси прямолинейного провода будем считать заданной. Совместив прямолинейный провод с осью x и учитывая, что в данном случае $dl_1 dl_2 = dx dz$, где dx — проекция элемента длины dl на ось x , можем написать:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int dx \int_0^a \frac{dz}{D} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int dx \int_0^a \frac{dz}{\sqrt{(z-x)^2 + y^2}}$$

где x, y, z — переменные координаты элемента длины dl . После первого интегрирования

¹ Все расчеты выполнены на логарифмической машине.

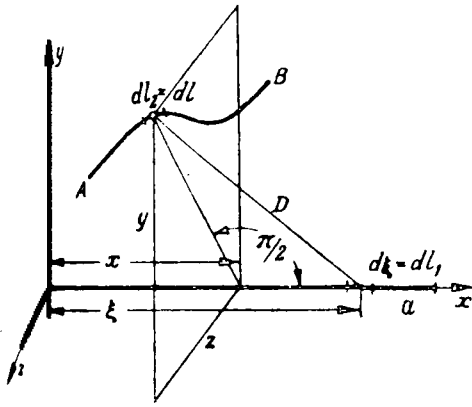


Рис. 2.

получаем:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int f(x, y, z) dx, \quad (3)$$

$$f(x, y, z) = \operatorname{arsh} \frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}} + \operatorname{arsh} \frac{a - x}{\sqrt{y^2 + z^2}}.$$

Если второе интегрирование в конечном виде невозможно, то для определения M достаточно интегрировать выражение (3) одним из методов механических квадратур. Задача, таким образом, требует лишь однократного численного интегрирования.

Расчет взаимной индуктивности провода произвольной формы и кругового контура. Рассмотрим круговой контур I радиуса R и провод 2 произвольной формы (рис. 3). Выберем произвольную систему координат с центром в центре кругового контура и с осью z , перпендикулярной плоскости. Рассмотрим элемент длины dl провода 2 , расположенный в точке $P(x, y, z)$. Разложим dl на составляющие: dz по оси z , $d\rho$ по прямой QP , перпендикулярной оси z , и $d\lambda$ по дуге окружности λ , проходящей через точку P и имеющей центром точку Q . Видно, что взаимная индуктивность элемента контура I равна нулю в силу того, что dz перпендикулярен к плоскости этого контура, а взаимная индуктивность элемента $d\rho$ и контура I равна нулю вследствие симметрии контура относительно направления $d\rho$. Следовательно, взаимная индуктивность dM элемента dl и контура I равна взаимной индуктивности dM_λ элемента $d\lambda$ этого контура. С другой стороны, вследствие симметрии окружности λ и контура I и имеющей отсюда симметрии, можно написать:

$$\frac{dM_\lambda}{M_\lambda} = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d\lambda}{2\pi R},$$

где M — взаимная индуктивность контуров 2 и I .

На рис. 3 непосредственно видно, что

$$d\lambda = dy \cos \varphi - dx \sin \varphi = (\cos \beta \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi) dl,$$

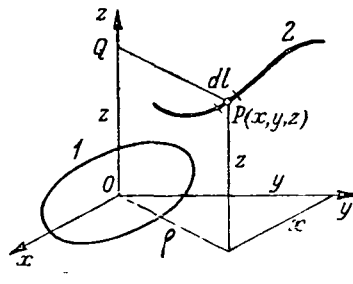


Рис. 3.

где $\cos \alpha$ и $\cos \beta$ — направляющие косинусы элемента dl по осям x и y , а $\varphi = \operatorname{arctg} y/x$. Поэтому

$$dM = dM_\lambda = M_\lambda \frac{(\cos \beta \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi)}{2\pi R} dl$$

и, следовательно,

$$M = \frac{1}{2\pi} \int M_\lambda \frac{\cos \beta \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi}{R} dl. \quad (4)$$

Взаимная индуктивность M_λ двух коаксиальных кругов может быть определена по общим формулам [Л. 4, 5] или же по соответствующим таблицам [Л. 5] и кривым [Л. 6], и, следовательно, определение взаимной индуктивности провода произвольной формы и кругового контура может быть сведено к задаче однократного численного интегрирования.

Формулу (4) можно рассматривать как обобщение формул, данных Ф. Гровером [Л. 6] для случая, когда провод 2 также представляет собой замкнутый круговой контур, тем или иным образом расположенный относительно кругового контура I . Пример расчета по формуле (4) дан в приложении 1.

Расчет собственной индуктивности криволинейного провода. Собственная индуктивность криволинейного провода может быть представлена в виде [Л. 7, 8]:

$$L = N - G + A - Q.$$

Здесь G , A и Q — величины, определяемые формой и размерами поперечного сечения провода и характером распределения тока по сечению, но не зависящие от формы оси провода. Так как способы расчета этих величин изучены достаточно хорошо, то в дальнейшем здесь речь будет только о вычислении величины N , которая в отличие от G , A и Q зависит лишь от формы и размеров оси провода и не зависит от формы и размеров поперечного сечения провода и от характера распределения тока по сечению. Общее выражение для N имеет вид:

$$N = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^l W(l_1) dl_1, \quad (5)$$

где l — длина провода,

$$W(l_1) = \lim_{s \rightarrow 0} [V(l_1, l_1 - s) + \ln 2h], \quad (6)$$

$$V(l_1, l_1 - s) = \int_{l_1 - s}^{l_1} \frac{\cos \vartheta}{D} dl_2, \quad (7)$$

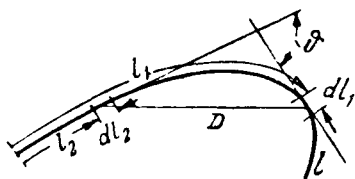


Рис. 4.

l_1 и l_2 — криволинейные координаты, отсчитываемые вдоль оси провода от одного из его концов (рис. 4);

θ и D — соответственно углы и расстояние между элементами длины dl_1 и dl_2 ;

h — хорда, стягивающая малую дугу s , координаты концов которой равны l_1 и $l_1 - s$.

Величина $W(l_1)$ является функцией от l_1 и при невозможности найти предел выражения (6) в общем виде может быть найдена по приближенной формуле:

$$W(l_1) = V(l_1, l_1 - s) + \ln 2h, \quad (8)$$

относительная погрешность которой одного порядка с величиной s^2/R_m^2 , где R_m — наименьший из радиусов кривизны оси провода [Л. 7].

Интегрирование выражений (7) и (5) в конечном виде возможно лишь в некоторых простейших частных случаях. Поэтому мы покажем, каким образом величина N может быть определена методом численного интегрирования. В качестве примера рассмотрим провод, изогнутый по дуге параболы второго порядка, причем будем считать, что один конец провода расположен в вершине параболы (рис. 5). Уравнение параболы напомним в виде: $y^2 = 2px$. Если $p \neq 1$, то, введя новые переменные $\xi = px$, $\eta = py$, получим уравнение $\eta^2 = 2\xi^2$, в котором параметр p равен единице. Таким образом, не сужая поставленной задачи, всегда можно считать, что $p = 1$ и $y^2 = 2x$. Дифференцируя это уравнение, найдем $y dy = dx$, и, следовательно, для элемента dl дуги параболы и для функций угла α между dl и осью x -ов имеем:

$$dl = \sqrt{1+y^2} dy, \quad \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+y^2}},$$

$$\cos \alpha = \frac{y}{\sqrt{1+y^2}},$$

откуда для косинуса угла между элементами длины dl_1 и dl_2 получаем:

$$\cos \theta = \cos(\alpha_1 - \alpha_2) = \frac{1 + y_1 y_2}{\sqrt{1+y_1^2} \sqrt{1+y_2^2}}.$$

Так как расстояние D между dl_1 и dl_2 при $y_1 > y_2$ равно

$$D = \frac{y_1 - y_2}{2} \sqrt{(y_1 + y_2)^2 + 4},$$

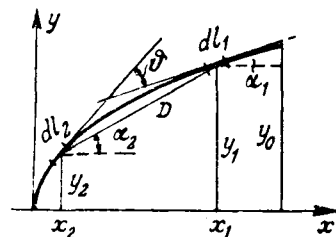


Рис. 5.

то, подставляя значения dl_2 , D и $\cos \theta$ в формулу (7) и интегрируя, получим:

$$\begin{aligned} V(l_1, l_1 - s) = & \ln \frac{2 + 2y_1^2 - y_1 \gamma + \sqrt{1+y_1^2} \sqrt{(2y_1 - \gamma)^2 + 4}}{\gamma} \\ & - \ln \frac{2 + y_1^2 + \sqrt{1+y_1^2} \sqrt{4+y_1^2}}{y_1} \\ & - \frac{2y_1}{\sqrt{1+y_1^2}} \ln \left[2y_1 - \gamma + \sqrt{(2y_1 - \gamma)^2 + 4} \right] \\ & + \frac{2y_1}{\sqrt{1+y_1^2}} \ln (y_1 + \sqrt{y_1^2 + 4}), \end{aligned}$$

где γ — разность ординат, соответствующих концам малой дуги s . Подставляя (9) в (6) и учитывая, что $h = \frac{\gamma}{2} \sqrt{(2y_1 - \gamma)^2 + 4}$, после перехода к пределу найдем:

$$\begin{aligned} W(l_1) = & \ln [8y_1 (1 + y_1^2) \sqrt{1+y_1^2}] - \\ & - \ln (2 + y_1^2 + \sqrt{1+y_1^2} \sqrt{4+y_1^2}) - \\ & - \frac{2y_1}{\sqrt{1+y_1^2}} \ln \left(2 \frac{y_1 + \sqrt{1+y_1^2}}{y_1 + \sqrt{4+y_1^2}} \right). \end{aligned}$$

Величина

$$N = \int_0^{y_0} W(l_1) \sqrt{1+y_1^2} dy_1$$

не выражается в конечном виде через ординату y_0 конца провода. Поэтому для определения воспользуемся способом численного интегрирования. Ввиду того, что при $y_1 = 0$ подынтегральная функция в (10) обращается в бесконечность представим ее в виде суммы

$$f_1 = \sqrt{1+y_1^2} [W(l_1) - \ln y_1] \text{ и } f_2 = \sqrt{1+y_1^2}$$

Величина f_1 конечна при всех конечных значениях y_1 и никаких особенностей не представляет. Поэтому, определив f_1 для ряда значений (табл. 3), можно найти интеграл

$$F_1 = \int_0^{y_0} f_1 dy_1,$$

применяя один из способов численного интегрирования.

Значения F_1 , найденные с помощью формулы Симпсона, даны в табл. 4. Обращ

ислению интеграла от f_2 , заметим, что при значениях y_1 можно $\sqrt{1+y_1^2}$ разложить

$$\sqrt{1+y_1^2} = 1 + \frac{y_1^2}{2} - \frac{y_1^4}{8} \dots,$$

чего этот интеграл вычисляется просто.

Таблица 3

f_1	f_2	y_1	f_1	f_2
0,692	—	1,0	1,050	0,000
0,695	—	1,1	1,125	0,143
0,700	—	1,2	1,210	0,284
0,720	—	1,3	1,290	0,429
0,734	-0,985	1,4	1,410	0,578
0,765	-0,775	1,5	1,520	0,729
0,806	-0,595	1,6	1,630	0,884
0,851	-0,435	1,7	1,780	1,050
0,907	-0,286	1,8	1,900	1,212
0,970	-0,143	1,9	2,040	1,375
1,050	0,000	2,0	2,180	1,550

Таблица 4

F_1	F_2	F_1+F_2
0,000	0,000	0,000
0,139	-0,524	-0,385
0,283	-0,781	-0,498
0,436	-0,937	-0,501
0,607	-1,024	-0,417
0,802	-1,053	-0,251
1,027	-1,024	+0,003
1,286	-0,938	0,348
1,589	-0,792	0,797
1,944	-0,582	1,362
2,352	-0,306	2,046

раничившись двумя первыми членами разложения, получим:

$$\int_0^{y_0} \left(1 + \frac{y_1^2}{2}\right) \ln y_1 dy_1 = \left(y_0 + \frac{y_0^3}{6}\right) \ln y_0 - \left(y_0 + \frac{y_0^3}{18}\right). \quad (11)$$

погрешностью, не превышающей 1%, этой формулой можно пользоваться для значений y_0 . При больших значениях можно написать:

$$F_2(y_0) = F_2(0,5) + \int_{0,5}^{y_0} f_2 dy_1, \quad (12)$$

и последний интеграл никаких особенностей не имеет. Значения f_2 при $y_1 > 0,4$ даны в табл. 3, табл. 4 приведены значения F_2 , найденные по формуле (11) при $y_0 \leq 0,4$ и по формуле (12) при $y_0 > 0,4$.

Используя соответствующие значения F_1 и F_2 , найдем величину $N = \frac{\mu_0}{2\pi} (F_1 + F_2)$.

В рассмотренном примере первое интегрирование, т. е. определение $V(l_1, l_1 - s)$, можно было

выполнить в конечном виде. Задача усложняется, если первое интегрирование в конечном виде невозможно. Покажем на том же примере, как следует определять значения величин $V(l_1, l_1 - s)$ и $W(l_1)$ в подобных случаях.

Пусть расчет необходимо выполнить с точностью до величин порядка 0,01. Тогда отношение s/R_m должно быть порядка $\sqrt{0,01} = 0,1$. Радиус кривизны параболы равен $R = (1 + y^2)^{3/2}$ и имеет наименьшее значение $R_m = 1$ в ее вершине, т. е. при $y = 0$. Поэтому малая дуга s должна иметь порядок 0,1. Учитывая сказанное, вычислим для примера значение $W(l_1)$ при $y_1 = 1,0$. Для этого сначала найдем значения функции

$$f = \frac{2(1 + y_1 y_2)}{\sqrt{1 + y_1^2} (y_1 - y_2) \sqrt{(y_1 + y_2)^2 + 4}},$$

стоящей под знаком интеграла в выражении для $V(l_1, l_1 - s)$, при $y_1 = 1$ и при y_2 , изменяющемся от 0 до $y_1 - \gamma = 0,9$ через 0,05 (табл. 5).

Таблица 5

y_2	f	y_2	
0,00	0,632	0,45	1,510
0,05	0,692	0,50	1,695
0,10	0,755	0,55	1,925
0,15	0,830	0,60	2,21
0,20	0,908	0,65	2,57
0,25	1,000	0,70	3,05
0,30	1,102	0,75	3,73
0,35	1,215	0,80	4,73
0,40	1,352	0,85	6,40
0,45	1,510	0,90	9,73

Применяя формулу Симпсона, для $V(l_1, l_1 - s)$ при $y_1 = 1,0$ и $y_1 - \gamma = 0,9$, найдем значение 2,018. Так как при $y_1 = 1,0$ и $\gamma = 0,1$ хорда $h = 0,138$ и $\ln 2h = 1,277$, то $W(l_1) = V(l_1, l_1 - s) + \ln 2h = 0,741$. Умножив $W(l_1)$ на $\sqrt{1 + y_1^2} = \sqrt{2}$, получим число 1,048, которое в пределах точности расчета на логарифмической линейке совпадает с суммой $f_1 + f_2$ соответствующих чисел, содержащихся в табл. 3. Аналогичным образом можно было бы найти значения $W(l_1)$ и для других значений y_1 , после чего второе интегрирование может быть выполнено так, как показано выше.

Приложение

В качестве примера расчета по формуле (4) найдем взаимную индуктивность M двух лежащих в одной плоскости контуров: кругового контура радиуса $R = 1$ м и квадратного контура со стороной $a = 1$ м (рис. 6). В силу симметрии имеем: $M = 8M_{12}$, где M_{12} — взаимная индуктивность контура 1 и провода АВ. Из рис. 6 видно,

что в данном случае $y = \frac{1}{2}$, $\cos \alpha = 1$, $\cos \beta = 0$, $\varphi = \arctg \frac{1}{2x}$, $\sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 4x^2}}$, $d\lambda = -\sin \varphi dx = -\frac{dx}{\sqrt{1 + 4x^2}}$, $\rho = \frac{1}{2\sqrt{1 + 4x^2}}$ и, следовательно,

$$M = 8M_{12} = \frac{8}{\pi} \int_0^{\frac{1}{2}} \frac{M_\lambda dx}{1 + 4x^2}. \quad (13)$$

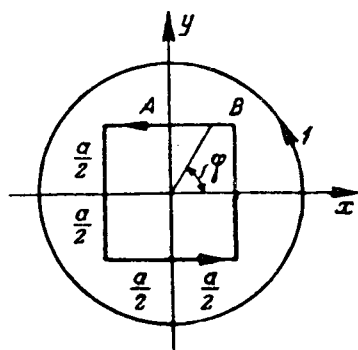


Рис. 6.

Таблица 6

x	$1 + 4x^2$	ρ	$M_\lambda \cdot 10^9$	$\frac{10^9 M_\lambda}{1 + 4x^2}$
x	x^2	x	x	x
0	1,00	0,500	0,546	0,546
0,1	1,04	0,510	0,572	0,550
0,2	1,16	0,538	0,657	0,566
0,3	1,36	0,583	0,778	0,572
0,4	1,64	0,640	0,981	0,598
0,5	2,00	0,707	1,275	0,637

Для выполнения интегрирования составляем таблицу значений M_λ для каждого значения ρ без таблиц [Л. 5].

Имея значения подинтегральной функции (13) и применяя формулу трапеций, находим $\approx 8,84 \cdot 10^{-10}$ гн.

Литература

1. Л. А. Цейтлин. О расчете коэффициентов индукции линейных пространственных контуров, составленных из прямолинейных участков. Труды ВЭТАС, № 1.
2. Л. А. Цейтлин. Параметры систем прямых и криволинейных проводов. Электричество, № 1.
3. Л. А. Цейтлин. О коэффициентах самоиндукции некоторых плоских контуров. Труды ЛИИ, № 1.
4. J. C. Maxwell. Electricity and Magnetism, II.
5. Л. В. Залуцкий. Введение в теорию антенн, § 10, 11, 14, 15, 16.
6. F. W. Grover. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 32, № 10, 1944.
7. Л. А. Цейтлин. Общие основания расчета коэффициента самоиндукции криволинейных проводов. Электричество, № 7, 1946.
8. Л. А. Цейтлин. Общее выражение коэффициента самоиндукции криволинейного провода. Доклады Академии наук СССР, 54, № 1, 1946.



К исследованию фильтров последовательности

Кандидат техн. наук М. Е. СЫРКИН

Энергетический институт Академии наук Узбекской ССР

Представляет интерес исследование возможных способов математического анализа фильтров последовательности. Ниже рассматривается применение к исследованию фильтров последовательности элементов общей теории несимметричных трехфазных цепей [Л. 1], на основе которой дается вывод соотношений между параметрами фильтров положительной и отрицательной последовательности.

Рассматривается приложение к исследованию фильтров последовательности элементов общей теории несимметричных трехфазных цепей. Определяется зависимость между параметрами фильтров последовательности.

получить в фазах, подключенной к ним линейным напряжениям, напряжения, порционные состав

яющим E_{A1} или E_{A2} , и тем самым измерит

Как известно, составляющие положительной и отрицательной последовательности линейных и фазных напряжений жестко связаны:

$$\dot{E}_{A1} = -j\sqrt{3}\dot{E}_{a1}; \quad \dot{E}_{A2} = +j\sqrt{3}\dot{E}_{a2}$$

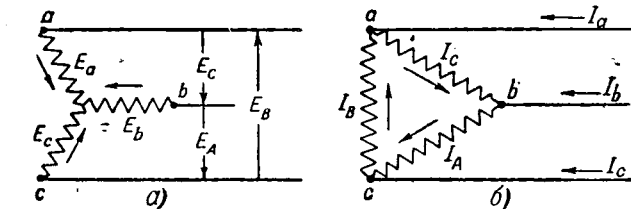
Поэтому измерение E_{A1} и E_{A2} можно заменить измерением E_{a1} и E_{a2} . Выразим фазные напряжения звезды без нулевого провода $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ через их составляющие \dot{E}_{a1} и \dot{E}_{a2} и параметры ветвей искомой звезды.

Из условия

$$\dot{I}_{a0} = \dot{E}_{a0}Y_0 + \dot{E}_{a1}Y_2 + \dot{E}_{a2}Y_1 = 0$$

определяем:

$$\dot{E}_{a0} = -\frac{1}{Y_0}(\dot{E}_{a1}Y_2 + \dot{E}_{a2}Y_1)$$



Принятые обозначения фазных и линейных величин для звезды и треугольника даны на рис. 1, а и б.

Фильтр напряжения. Заданы линейные напряжения \dot{E}_A, \dot{E}_B и \dot{E}_C ; $\dot{E}_{A0} = 0$. Требуется

ставляя в выражения фазных напряжений их симметричные составляющие, полу-

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{Y_0} [\dot{E}_{a1}(Y_0 - Y_2) + \dot{E}_{a2}(Y_0 - Y_1)], \\ \frac{1}{Y_0} [\dot{E}_{a1}(Y_0 - aY_2)a^2 + \dot{E}_{a2}(Y_0 - a^2Y_1)a], \\ \frac{1}{Y_0} [\dot{E}_{a1}(Y_0 - a^2Y_2)a + \dot{E}_{a2}(Y_0 - aY_1)a^2]; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Y_0, Y_1 и Y_2 — симметричные составляющие фазных проводимостей звезды Y_a, Y_b и Y_c (предполагается отсутствие взаимоиндукции между ветвями звезды).

Измерение E_{A1} . Для того, чтобы фазное напряжение E_a было пропорционально E_{a1} (или оно не должно зависеть от E_{a2} . Для этого коэффициент при \dot{E}_{a2} в первом из выражений (2) должен быть равен нулю или должно быть

$$Y_0 - Y_1 = 0,$$

$$Y_a + Y_b + Y_c - Y_a - aY_b - a^2Y_c = 0,$$

откуда

$$Y_b = a^2Y_c.$$

Измерение E_{A2} . Аналогично, чтобы E_a было пропорционально E_{a2} (или E_{A2}), должно быть $Y_0 - Y_2 = 0$ или $Y_b = aY_c$.

Измерение E_{A1} и E_{A2} одновременно. Требуем, чтобы

$$E_b \equiv E_{A1} \text{ и } E_c \equiv E_{A2}.$$

Тогда должно быть:

$$Y_0 - a^2Y_2 = 0 \text{ и } Y_0 - a^2Y_1 = 0,$$

откуда

$$Y_b = Y_c = a^2Y_a.$$

Фильтр токов. Заданы линейные токи I_a , I_b и I_c ; $I_{a0} = 0$. Требуется получить в фазах треугольника, для которого данные токи являются линейными, токи, пропорциональные составляющим I_{a1} или I_{a2} , и тем самым измерить

Как известно,

$$I_{a1} = +j\sqrt{3}I_{A1} \text{ и } I_{a2} = -j\sqrt{3}I_{A2}, \quad (3)$$

т. е. измерение I_{a1} и I_{a2} можно заменить измерением I_{A1} и I_{A2} .

Выразим фазные токи I_A, I_B и I_C через I_{A1} и параметры ветвей искомого треугольника. Пользуясь условием

$$\dot{E}_{A0} = I_{A0}Z_0 + I_{A1}Z_2 + I_{A2}Z_1 = 0,$$

определим из него I_{A0} и, подставляя результат в выражения фазных токов через их симметричные составляющие, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{1}{Z_0} [I_{A1}(Z_0 - Z_2) + I_{A2}(Z_0 - Z_1)], \\ I_B &= \frac{1}{Z_0} [I_{A1}(Z_0 - aZ_2)a^2 + I_{A2}(Z_0 - a^2Z_1)a], \\ I_C &= \frac{1}{Z_0} [I_{A1}(Z_0 - a^2Z_2)a + I_{A2}(Z_0 - aZ_1)a^2]; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

здесь Z_0, Z_1 и Z_2 — симметричные составляющие фазных сопротивлений треугольника Z_A, Z_B и Z_C (предполагается отсутствие взаимоиндукции между ветвями треугольника).

Измерение I_{A1} . Для того чтобы I_A было пропорционально I_{a1} , должно быть ($Z_0 \neq 0$):

$$Z_0 - Z_1 = 0 \text{ или } Z_B = a^2Z_C.$$

Измерение I_{a2} . Аналогично должно быть $Z_0 - Z_2 = 0$ или $Z_B = aZ_C$.

Измерение I_{a1} и I_{a2} одновременно. Потребуем, чтобы

$$I_B \equiv I_{a1} \text{ и } I_C \equiv I_{a2}.$$

Тогда должно быть:

$$Z_0 - a^2Z_2 = 0 \text{ и } Z_0 - a^2Z_1 = 0,$$

откуда

$$Z_B = Z_C = a^2Z_A.$$

Полученные соотношения между параметрами ветвей фильтров выражаются фазовым множителем трехфазной системы $a = \epsilon^{j120^\circ}$ или $a^2 = \epsilon^{j240^\circ} = \epsilon^{-j120^\circ}$. Фильтры с такими соотношениями между параметрами можно назвать „120-градусными“ фильтрами. Для их осуществления необходимы емкости. Применение емкостей может представлять затруднения или встречать те или иные возражения. Поэтому большое практическое значение имеют фильтры, соотношение между параметрами которых выражается фазовым множителем $-a = -\epsilon^{j120^\circ} = \epsilon^{-j60^\circ}$ или $-a^2 = -\epsilon^{j240^\circ} = \epsilon^{-j60^\circ}$. Этим множителям соответствует сдвиг на 60° , который может быть осуществлен без емкостей — с помощью активных и индуктивных сопротивлений. Такие фильтры можно назвать „60-градусными“. Они работают при переключении концов части обмоток измерительных трансформаторов. Получим тем же общим методом соотношения между параметрами „60-градусного“ фильтра токов. Если „нормальную“ систему токов I_a, I_b, I_c можно, пользуясь равенством $I_a + I_b + I_c = 0$, записать как

$$-(I_a + I_c); \quad I_b; \quad I_c,$$

то „опрокинутая“ система токов (опрокинута фаза c) будет:

$$-(i_b - i_c); i_b; -i_c.$$

Составляющие „опрокинутой“ системы таковы:

$$i'_{a1} = \frac{1}{3} [-(i_b - i_c) + ai_b - a^2 i_c] =$$

$$= \frac{1}{3} (a - 1)(i_b + a^2 i_c);$$

$$i'_{a2} = \frac{1}{3} [-(i_b - i_c) + a^2 i_b - ai_c] =$$

$$= \frac{1}{3} (a^2 - 1)(i_b + ai_c).$$

Выразим их через составляющие „нормальной“ системы токов i_{a1} и i_{a2} , которые мы хотим измерить. Подставляя

$$i_b = a^2 i_{a1} + ai_{a2} \text{ и } i_c = ai_{a1} + a^2 i_{a2}$$

и преобразуя, получим:

$$i'_{a1} = \frac{1}{3} (a - a^2)(i_{a1} - 2i_{a2});$$

$$i'_{a2} = \frac{1}{3} (a - a^2)(2i_{a1} - i_{a2}).$$

Переходя с помощью (3) от составляющих линейных токов i'_{a1} и i'_{a2} к составляющим фазных токов i'_{A1} и i'_{A2} и подставляя в первое из

выражений (4), получим для тока i'_A фа при „опрокинутой“ системе токов

$$i'_A = \frac{1}{Z_0} [i_{a1}(Z_0 - 2Z_1 + Z_2) + i_{a2}(Z_0 + Z_1 -$$

Приравнивая коэффициенты при i_{a1} и i_{a2} , получим соотношения между параметрами треугольника, при которых i'_A пропорционален i_{a1} и i_{a2} .

Измерение i_{a1} . Получим условие $Z_0 + Z_1 - 2Z_2 = 0$,

откуда

$$Z_B = -a^2 Z_C.$$

Измерение i_{a2} . Аналогично: $Z_0 - 2Z_1 + Z_2 = 0$, или $Z_B = -aZ_C$. В обоих случаях получаются „60-градусные“ соотношения параметров.

Попутно можно сделать следующий вывод об общих свойствах фильтров по схеме звена и треугольника: такие фильтры могут работать без емкостей только с „вывернутой“ фазой. Поэтому фильтр напряжения без емкостей может работать без трансформатора напряжения в схеме (для фильтра тока всегда требуется трансформатор тока).

Литература

1. М. Е. Сыркин. Некоторые вопросы теории фильтрации в многофазных цепях. Труды Института энергии АН УзССР, вып. 3, Ташкент, 1949.

[19.]



Короткозамкнутый асинхронный двигатель с вставными пусковыми стержнями

Кандидат техн. наук С. С. ИОСИФОВ

Трест Азнефтепроект

предложенный короткозамкнутый асинхронный двигатель имеет статор и ротор

нормальной беличьей клеткой. Его конструктивная особенность — наличие специальных пусковых стержней, служащих для пускового момента и снижения пускового тока двигателя и закладываемых в паз ротора без крепления и поверх стержней клетки.

Конструкция роторного паза и конструкции пусковых стержней представлены на рис. 1. Стержень 1 беличьей клетки размещается в нижней половине паза прямоугольной формы, а верхняя же половина паза занята по всей длине пусковыми стержнями. Пусковой стержень 3 (рис. 1, а и б) представляет собой медный или алюминиевый стержень неравнобокового сечения (прокат). Пусковой составной стержень имеет, кроме того, один (рис. 1, в) или два (рис. 1, г) стальных прямоугольных стержня 4 и 5 различной толщины. При отсутствии проката 3 пусковой стержень может быть сделан из стального прямоугольного стержня 1, г) 6 и охватывающего его контура 7 из ленты толщиной 2—4 мм. Концы медные стержни свариваются внахлестку.

Пусковые стержни вставляются в пазы с торца ротора. Они являются автономными единицами и не имеют никаких механических или электрических связей ни между собой, ни с контактами ротора. Стержни удерживаются от выпадения вдоль паза силой трения от центробежной силы, прижимающей их к усикам зубчатых дисков, а также и внутренними стенками вентиляционных дисков.

Пусковые стержни в зависимости от конструкции и сочетания увеличивают пусковой ток двигателя до 2,5—3 и более кратной номинальной величины и снижают пусковой ток до 3- и менее кратной величины.

Вместе с тем предложены и другие, не показанные здесь конструкции пусковых стержней.

Даны описание, теория и опыт эксплуатации короткозамкнутых асинхронных двигателей с вставными пусковыми стержнями, изготовленных по предложению автора трестом «Кагановичнефть» и др.

На рис. 2 представлен паз ротора с пусковыми стержнями по рис. 1, д, е и схема потокораспределения поперек этого паза.

Действие ротора с вставными пусковыми стержнями можно объяснить следующим образом. Поток Φ , пронизывающий ротор, возбуждает в беличьей клетке некоторый ток I_a , а ток I_b возбуждает поперек паза ротора потоки рассеяния Φ_{ac} , Φ_{a1} , Φ_{a2} , Φ_c и Φ_{z2} (рис. 2), а также поток рассеяния короткозамыкающего кольца Φ_k (на рис. 2 не показан). Потоки Φ_{a1} , Φ_{a2} и Φ_c ,

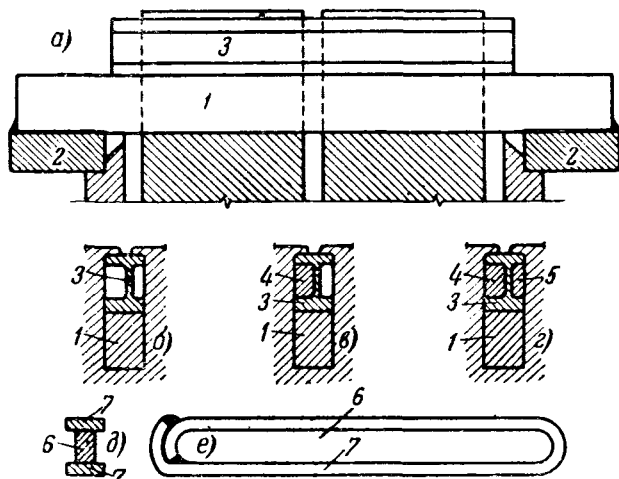


Рис. 1. Различные конструкции пусковых стержней.

а, б, в, г — продольные и поперечные разрезы паза с двутавровым пусковым стержнем; д, е — ленточный пусковой стержень. 1 — стержень беличьей клетки; 2 — короткозамыкающее кольцо; 3 — двутавровый пусковой стержень; 4, 5, 6 — стальные стержни; 7 — медный контур.

сцепленные с пусковым контуром, возбуждают в нем ток I_a , причем $I_{a1} = -I_{a2}$. Сумма токов I_{a2} и I_a есть ток возбуждения I_{Σ} потока Φ_c в пазовой щели:

$$I_{\Sigma} = I_a + I_{a2}.$$

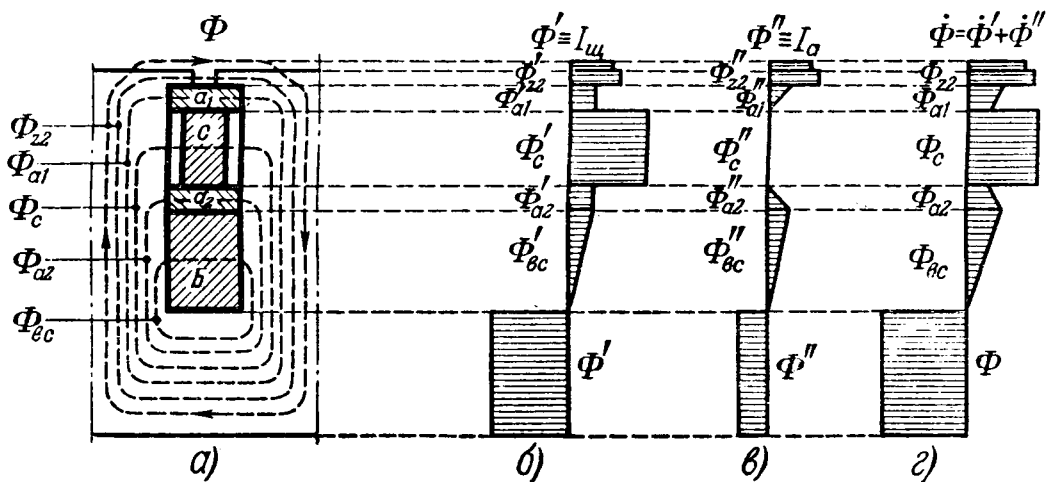


Рис. 2. Схема потокораспределения в роторе с вставными пусковыми стержнями (a_1, a_2 — верхняя и нижняя стороны пускового медного контура; c — стальной стержень; b — стержень беличьей клетки).

Ток беличьей клетки

$$I_B = I_{\text{щ}} + I_{a1}.$$

Этот же ток есть и результирующий ток тора

$$I_2 = I_B + I_{a1} + I_{a2} = I_B.$$

Зная действующие в роторе токи, легко составить диаграмму распределения индукций отных потоков рассеяния по высоте паза рис. 2,б представлена такая диаграмма для чая, когда в роторе действует только $I_{\text{щ}}$ ($I_a = 0, I_B = I_{\text{щ}}$). На рис. 2,в дана ана лная диаграмма для случая, когда в роторе ствует только ток I_a ($I_{\text{щ}} = 0, I_B = I_{a1}$). Нак на рис. 2,г изображена диаграмма распреде результирующих индукций от совместного ствия токов $I_{\text{щ}}$ и I_a .

Токи I_B и I_a , взаимодействуя с пото с ними сцепленными, образуют 2 крутящи мента: момент беличьей клетки и момент п вых стержней. Крутящий момент пуск стержней тем больше, чем толще стальной жень (увеличивается поток Φ_c) и чем бо сечение медного контура (увеличивается I_a). сковой ток двигателя тем меньше, чем т стальной стержень. (уменьшается $I_{\text{щ}}$), и меньше сечение контура (уменьшается I_a). На рис. 3 изображена векторная диаг ротора со вставными пусковыми стерж Diagramma двигателя в части статора стр обычным образом.

На рис. 4,а изображена схема замещ ротора. Для сравнения там же (рис. 4,б) зана схема замещения двухклеточного ра с общими короткозамыкающими колы. На этом рисунке r_k и x_k — сопротивления роткозамыкающих колец; r_a и r_B — акти сопротивления стержней рабочей и пус клеток; $x_{\text{щ}}$ — индуктивное сопротивление с

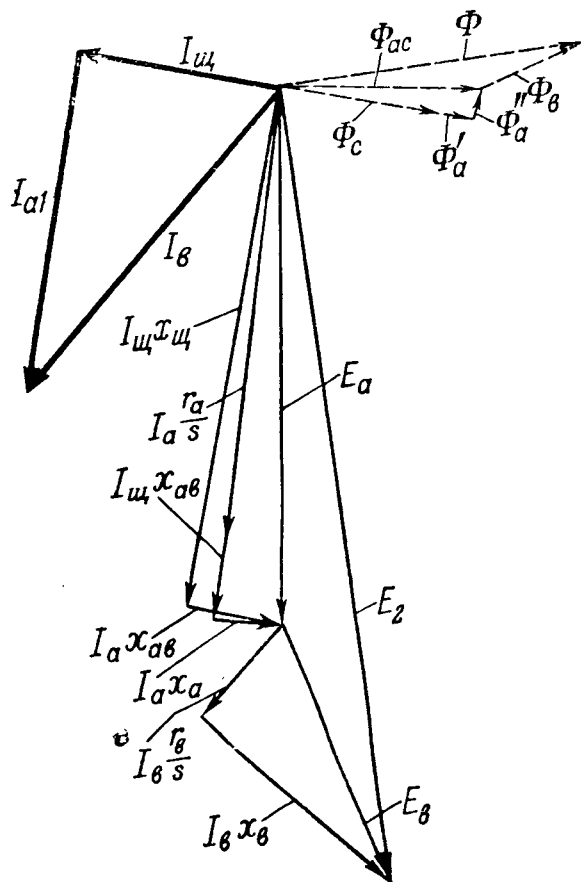
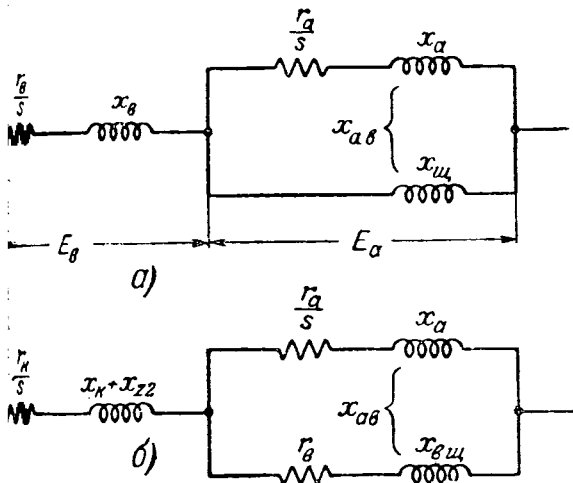


Рис. 3. Векторная диаграмма ротора.

r_a и r_b — активные сопротивления пускового контура и беличьей клетки; x_a — индуктивное сопротивление пускового контура, обусловленное потоком рассеяния $\Phi_a = \Phi_{a1} + \Phi_{a2}$ (рис. 2); x_B — индуктивное сопротивление беличьей клетки, обусловленное потоками рассеяния Φ_{BC} , Φ_{22} и Φ_K ; $x_{\text{щ}}$ — индуктивное сопротивление беличьей клетки, обусловленное потоком рассеяния $\Phi_{ac} = \Phi_a + \Phi_c$; $x_{AB} = 1,5 x_a$ — сопротивление взаимной индукции пускового контура и беличьей клетки; E_a — э. д. с., индуцируемая в пусковом контуре потоками Φ'_{a1} , Φ'_{a2} и Φ_c ; E_B — э. д. с., индуцируемая в беличьей клетке потоком Φ_B ($\Phi_B = \Phi_{BC} + \Phi_{22} + \Phi_K$); $E_2 = E_a + E_B$ — полная э. д. с. ротора; s — скольжение ротора.



Схемы замещения ротора с вставными пусковыми стержнями (а) и двухклеточного.

рабочей клетки, обусловленное потоками линии, пронизывающими рабочие и пусковые стержни и пазовую щель. Остальные обозначения те же что и выше.

Сравнение схем а и б рис. 4 показывает, что замещения ротора может быть получена путем замещения двухклеточного ротора, сопротивление r_k , $x_k + x_{r2}$, $x_{a\omega}$ заменить соответственно сопротивлениями r_g , x_g , x_{ω} и r_a кить равным нулю. На этом основании выражения токов и аналитические зависимости двигателя с вставными пусковыми стержнями могут быть получены посредством подстановки соответствующих построений и зависимостей для двухклеточного двигателя с общими короткозамыкающими кольцами.

Используя известные соотношения для двухклеточного двигателя с общими короткозамыкающими кольцами и указанными подстановками, получаем нижеследующие аналитические выражения для сопротивлений, токов и моментов двигателя с вставными пусковыми стержнями.

Результатирующие активное и индуктивное сопротивления беличьей клетки совместно с пусковыми стержнями:

$$r_2 = \frac{s^2 r_a (x_{\omega} - 1,5 x_a)^2}{r_a^2 + s^2 (x_{\omega} - 2 x_a)^2} + r_g,$$

$$= \frac{r_a^2 x_{\omega} + s^2 (x_{\omega} - 2 x_a) (x_{\omega} - 2,25 x_a) x_a}{r_a^2 + s^2 (x_{\omega} - 2 x_a)^2} + x_g.$$

в пусковом контуре

$$I_a = I_2 \frac{s (x_{\omega} - 1,5 x_a)}{\sqrt{r_a^2 + s^2 (x_{\omega} - 2 x_a)^2}}.$$

в возбуждения потока Φ_c в пазовой щели

$$I_{\omega} = I_2 \sqrt{\frac{r_a^2 + 0,25 s^2 x_a^2}{r_a^2 + s^2 (x_{\omega} - 2 x_a)^2}}.$$

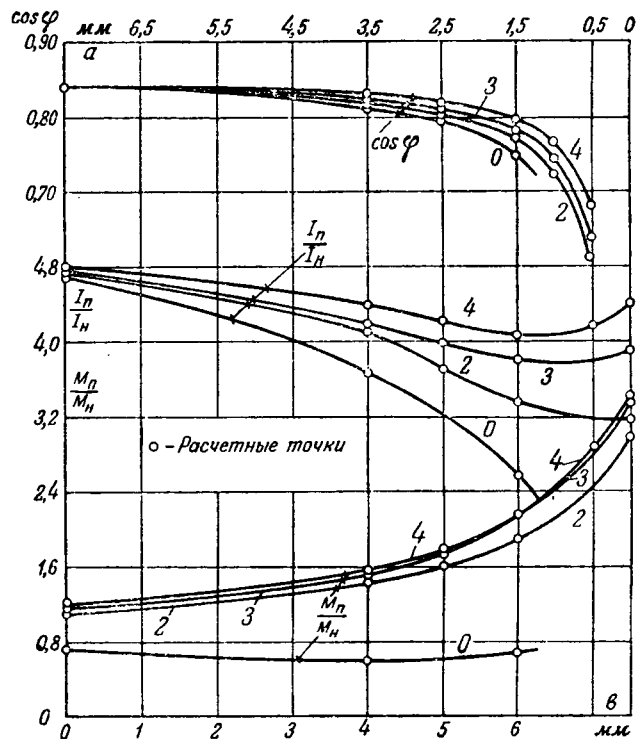


Рис. 5. Пусковые токи $\frac{I_n}{I_n}$, пусковые моменты $\frac{M_n}{M_n}$ и $\cos \varphi$ двигателя с вставными пусковыми стержнями; $P = 200 \text{ кВт}$, 735 об/мин в зависимости от толщины стального стержня b , ширины пазовой щели a и толщины медной ленты (0; 2; 3 и 4 мм).

Крутящие моменты беличьей клетки пусковых стержней и двигателя в целом

$$M_g = 0,975 \frac{m_2}{n_1} \frac{r_g}{s} I_2^2, \quad M_a = 0,975 \frac{m_2}{n_1} \frac{r_a}{s} I_a^2,$$

$$M = M_a + M_g = 0,975 \frac{m_2 r_2}{n_1 s} I_2^2;$$

здесь m_2 — число стержней беличьей клетки;
 n_1 — синхронное число оборотов в минуту.

Как видно из выражения для I_a , пусковые стержни в нормальном режиме работы почти никакого участия не принимают (при $s = 0$ $I_a : I_2 = 0$).

На рис. 5 представлены кривые пусковых токов, моментов и $\cos \varphi$, определенных автором расчетным путем для двигателя с вставными пусковыми стержнями, переделанного из двигателя с фазным ротором типа АМО-138-8, 200 кВт , 2000 б , 735 об/мин . Кривые построены в зависимости от толщины a стального стержня (или ширины b пазовой щели; ширина паза равна $a + b = 7,5 \text{ мм}$) для трех пусковых стержней по рис. 1 д, е с медными лентами толщиной 2, 3 и 4 мм (кривые 2, 3 и 4) и для стального стержня без медной ленты (кривая 0).

В табл. 1 представлены рабочие и пусковые показатели некоторых наиболее характерных вариантов двигателя с вставными пусковыми

Таблица 1

Рабочие и пусковые показатели двигателей с вставными пусковыми стержнями (ВПС) и двигателей других типов

Тип ротора и пусковых стержней	$\cos \varphi$	$\eta, \%$	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	Вес меди, кг
M_0C_0 (без пусковых стержней)	0,838	92,9	4,70	0,67	2,4	—
A_3C_0	0,838	92,9	4,75	1,01	2,4	4
A_3C_4	0,826	92,8	4,10	1,20	2,3	4
$A_3C_{5,5}$	0,801	92,5	3,70	1,43	2,0	4
M_3C_0	0,838	92,9	4,79	1,17	2,4	11
M_3C_4	0,826	92,8	4,19	1,53	2,3	11
$M_3C_{5,5}$	0,801	92,5	3,90	1,93	2,0	11
M_4C_0	0,838	92,9	4,81	1,20	2,4	15
M_4C_4	0,830	92,9	4,40	1,54	2,3	15
$M_4C_{5,5}$	0,811	92,6	4,14	1,95	2,1	15
Глубокопазный, $h=50$	0,830	92,9	5,52	1,75	2,3	—
Такой же и автотрансформатор $E_2=75\%$	0,830	92,9	4,40	1,32	2,3	50
Такой же и реактор $E_2=75\%$	0,830	92,9	4,40	1,11	2,3	—
Двухклеточный	0,830	92,9	4,40	1,59	2,3	21
Двухклеточный	0,811	92,6	4,14	2,0	2,1	21
Фазный ротор	0,836	92,2	—	—	2,4	—

стержнями. В таблице пусковые стержни различной конструкции обозначены буквами А, М и С и цифровыми индексами при них. Индекс при букве А обозначает толщину (мм) горизонтальной полки двухтаврового алюминиевого пускового стержня по рис. 1, а, б (толщина вертикальной полки составляет около 1 мм). Индекс при букве М указывает толщину медной ленты пускового стержня по рис. 1, д, е, индекс при букве С — толщину стальных стержней одного паза. Например, M_3C_5 означает составной пусковой стержень из медной ленты толщиной 3 мм и стального стержня толщиной 5 мм. При прочих равных условиях пусковые токи и моменты двухтавровых пусковых стержней по рис. 1, а, г на несколько процентов больше соответствующих значений ленточных пусковых стержней по рис. 1, д, е. Как видно из кривых рис. 5 и данных табл. 2, применяя тот или иной тип пусковых стержней, можно придать двигателю весьма гибкую пусковую характеристику. Можно увеличить его пусковой момент до величины, 2,5–3 кратной номинальному, и снизить его пусковой ток до 3 и менее кратной величины.

Для сравнения в табл. 1 приведены расчетные показатели того же двигателя, но с роторами с глубоким пазом, в двухклеточном и фазном исполнениях. Пусковой ток двигателя с глубоким пазом даже при очень глубоких пазах ($h=50$ мм) больше пускового тока двигателя с вставными пусковыми стержнями на 15–50%. При одинаковых $\cos \varphi$, к. п. д. и пусковых токах при пуске глубокопазного двигателя через автотрансформатор или реактор при $E_2=75\%$ пусковой момент рассматриваемого двигателя на 16–40% больше. Конструктивно ротор со вставными и угловыми стержнями без пусковых стержней также прост, как с глубоким пазом, даже

проще его ², а вес и стоимость пусковых стержней составляют незначительную долю от веса и стоимости автотрансформатора или реактора.

Теоретические исследования показывают, что двухклеточный двигатель и двигатель с вставными стержнями имеют практически одинаковые рабочие и пусковые показатели. При одинаковых $\cos \varphi$, к. п. д. и пусковом токе пусковой момент рассматриваемого двигателя меньше на 1–3%, а при одинаковых пусковых токах и моментах $\cos \varphi$ двигателя меньше всего лишь на 0,001–0,002. Но двигатель с вставными стержнями имеет то преимущество перед двухклеточным, что он универсален, имеет гибкую пусковую характеристику, позволяющую каждый раз устанавливать такие значения пусковых токов и моментов и $\cos \varphi$, которые технически и экономически наилучшим образом отвечают условиям заданной сети и заданного рабочего механизма.

Конструктивно беличья клетка двигателя с вставными стержнями тождественна рабочей клетке двухклеточного двигателя. Пусковые стержни двигателя проще, легче и по изготовлению дешевле, чем стержни двухклеточного двигателя. В двигателе с вставными стержнями отсутствуют два короткозамыкающих кольца пусковой клетки с десятками отверстий, каждое и исключена трудоемкая операция пайки пусковых стержней к кольцам. Пусковые стержни по рис. 1, а, г изготавливаются из проката путем только одной операции — резки.

При одинаковых пусковых моментах, материалах и сечениях нагрев пусковых контуров меньше нагрева пусковой клетки двухклеточного двигателя в несколько раз. Объясняется это следующими причинами.

Длина, а следовательно, и масса пусковой контуры больше длины пускового стержня двигателя в два раза. Выделение тепла в пусковых контурах меньше, чем в стержнях пусковой клетки двухклеточного двигателя по расчетам на 20–30 и более процентов (сравните схемы замещения а, б рис. 4). В двухклеточных двигателях места сварки или спайки стержней к кольцам являются источником дополнительного нагрева пусковой клетки. В двухтавровых пусковых контурах вертикальные полки, сами почти не участвуя в образовании пускового момента и слабо нагреваясь, отсасывают часть тепла от активных сторон пускового контура. По этим причинам пусковые контуры не требуют применения специальных сплавов с высоким удельным сопротивлением и могут быть изготовлены из чистой меди и даже алюминия. Расход цветного металла на пусковые контуры меньше дополнительной траты цветного металла на пусковые стержни двухклеточного двигателя, изготовленных из латуни ($\rho_{\text{лат}}=0,080 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ в среднем в 1,5–2 раза по табл. 1).

² Фрезеровка короткозамыкающих колец под вставные стержни и их пайка — операция более трудоемкая и менее удобная.

Двигатель с вставными пусковыми стержнями проверен экспериментально и в длительной эксплуатации. На различных нефтепромыслах и шахтах работает более 100 двигателей суммарной мощностью свыше 15 000 кВт, переделанных существующих двигателей с фазным ротором. Для них имеются: двигатель типа АМС-15-6-8, 190 кВт, 2 000 в, 1 470 об/мин; 8 двигателей типа О-136-4, 270 кВт, 2 000 в, 1 475 об/мин; двигателя типа АМО-138-8, 190 кВт, 2 000 в, 1 475 об/мин, остальные — различных марок мощностью, от 50 до 180 кВт.

Рабочие и пусковые показатели одного переделанного двигателя типа АМО-138-8, 190 кВт, 2 000 в, 1 475 об/мин, определенные по данным испытаний и расчетным путем (для сравнения), введены в табл. 2. В табл. 2 приняты следующие обозначения: $O + M_{2,1}C_{5,2}$ — ротор с пусковыми стержнями типа $M_{2,1}C_{5,2}$, заложенными в паз; $M_0C_{5,2} + M_{2,1}C_{5,2}$ — ротор с чередующимся через паз пусковыми стержнями типов $M_0C_{5,2}$ и $M_{2,1}C_{5,2}$. Остальные обозначения

те же, что и в табл. 1. Пусковые контуры испытанного двигателя изготовлены из медной ленты толщиной 2,1 мм. Пусковые и рабочие показатели такого же типа двигателя с пусковыми стержнями толщиной 3 и 4 мм, определенные расчетным путем, приведены в табл. 1. Коэффициенты полезного действия, приведенные в табл. 2, определены в части потерь в стали статора непосредственно по данным испытаний, а в части потерь в фазной обмотке — по величине потерь в стержнях пусковых стержнями расчетным путем. Мощности определены при одном и том же токе статора $I_{\text{н}}$. Однако, если исходить из условия равенства максимальных температур нагрева, то действие улучшения вентиляции после переделки мощность двигателя возрастает по данным испытаний на несколько процентов по сравнению со значениями, приведенными в табл. 2. Видно из таблицы, данные испытаний весьма хорошо совпадают с расчетными. Некоторое превышение пусковых токов по данным испытаний по сравнению с расчетными объясняется насыщением зубцовых усиков ротора в момент пуска. Двигатели с вставными пусковыми стержнями работают на ответственных производственных участках. На крупных компрессорных, водоперекачивающих и нефтеперекачивающих станциях и других установках. Они работают надежно, бесперебойно и находятся в эксплуатации, начиная с мая 1947 г. За все это время не было ни одного случая продольного смещения свободных концевых стержней в пазы пусковых стержней. Все двигатели запускаются в ход непосредственно от

конструктивные данные переделанных роторов: пусковые стержни — ленточные по

Таблица 2

Сравнительные данные испытаний и расчета двигателя с вставными пусковыми стержнями (ВПС), 190 кВт

	Тип пусковых стержней	Р, кВт	cos φ	η, %	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$
Двигатель с фазным ротором до переделки	—	190	0,800	92,0	—	—	2,47
Двигатель ВПС по данным испытаний	M_0C_0	190,5	0,799	92,4	4,78	0,73	—
	$M_{2,1}C_0$	190,7	0,800	92,4	4,93	1,20	—
	$M_{2,1}C_{5,2}$	182,2	0,766	92,2	4,06	1,91	—
	$M_0C_{5,2}$	179,0	0,754	92,1	3,50	0,67	—
	$O + M_{2,1}C_{5,2}$	186,0	0,782	92,3	4,42	1,32	—
	$M_0C_{5,2} + M_{2,1}C_{5,2}$	180,8	0,760	92,2	3,78	1,29	—
Двигатель ВПС по расчету	$M_0C_{5,2}$	190,5	0,799	92,4	4,59	0,70	2,40
	$M_{2,1}C_0$	190,5	0,799	92,4	4,70	1,18	2,40
	$M_{2,1}C_{5,2}$	180,5	0,758	92,2	3,72	1,91	1,97
	$M_0C_{5,2}$	178,0	0,749	92,1	3,30	0,68	1,83
	$O + M_{2,1}C_{5,2}$	185,4	0,779	92,3	4,15	1,30	2,18
	$M_0C_{5,2} + M_{2,1}C_{5,2}$	179,0	0,754	92,2	3,51	1,29	1,90

рис. 1, д—е, толщина медной ленты 2—3 мм, толщина стальных стержней 3—5 мм. Пусковые стержни вставлены либо во все пазы, либо через паз, либо все пазы свободны (в случае центробежных насосов); стержни беличьей клетки выполняются преимущественно из стержней выбранной фазной обмотки, короткозамыкающие кольца из шинной меди толщиной 5—10 мм, сварка стержней и колец — автогенная либо электродная по способу Бенардоса.

Переделка фазного ротора по типу ротора с вставными пусковыми стержнями по имеющимся опытным данным дешевле перемотки поврежденной фазной обмотки в 2—3 раза, а стоимость одного комплекта ленточных пусковых стержней по рис. 1, д—е, для двигателя 190 кВт составляет в условиях ремонтных мастерских около 200 руб.

Переделка существующих двигателей с фазным ротором по конструкции двигателей с вставными пусковыми стержнями согласно имеющимся отзывам упрощает обслуживание и эксплуатацию, увеличивает надежность работы, сокращает расход на ремонт и увеличивает к. п. д. двигателя.

Литература

1. Рихтер. Электрические машины. Гостехиздат, т. IV, стр. 236—286, 1939.
2. Пунга и Райт. Двигатели трехфазного тока с глубоким пазом. Гостехиздат, 1934.

[9.6.1950]



О применении системы два провода — земля в горных условиях

Кандидат техн. наук Л. М. ВИЛЬЧУР, инж. Н. С. КАЗАРЯН

Лаборатория электротехники Академии наук Армянской ССР

Летом 1949 г. Лабораторией электротехники Академии наук Армянской ССР было проведено обследование трех систем сельской электрификации, работающих по схеме два провода — земля (ДПЗ). Цель обследования состояла в выявлении особенностей систем ДПЗ, находящихся в условиях горных грунтов с пониженной удельной электропроводностью. Обследованию подвергались сельские сети напряжением 6 кв, питающиеся от трех гидроэлектростанций мощностью менее 300 квт каждая. Магистральные участки сетей и ответвления выполнены стальными проводами и смонтированы на стандартных деревянных опорах со штыревыми изоляторами на крючках. Все понизительные трансформаторные подстанции выполнены в виде открытых столбовых киосков. Часть подстанций (35%) имеет смешанную нагрузку, силовую и осветительную. На остальных подстанциях нагрузка только осветительная. Все обследованные сети находятся на высоте более 1000 м над уровнем моря.

Почти на всех повысительных и понизительных подстанциях рабочие заземления совмещены с защитными. Только в 2—3 случаях рабочие заземления осуществлены на концевых опорах линий электропередачи. Рабочие заземления обследованных сетей находятся в естественных грунтах и выполнены в виде трубчатых углубленных заземлителей. Отсутствие актов закладки заземлений не позволило установить конфигурации последних. Сопротивления заземлений измерялись с помощью измерителя заземления типа МС-07 завода «Энергоприбор» МЭС. Измерения производились при ясной погоде, которой предшествовал длительный засушливый период.

Результаты измерений показали, что во всех случаях отсутствия искусственного или естественного увлажнения грунтов величина сопротивления рабочего заземления достигает 26—28 ом, т. е. значительно превосходит сопротивле-

Приводятся результаты обследования сельских электросистем ДПЗ, работающих в условиях горных грунтов с пониженной удельной электропроводностью. Сравниваются по капитальным затратам системы ДПЗ с трехпроводными системами. Даются пределы применимости систем ДПЗ в зависимости от горных грунтов различной удельной электропроводности. Даются соображения о возможности расширения пределов применимости систем ДПЗ в горных районах путем соответствующего выбора места для понизительных подстанций.

ние (4 ом), требуемое «Правилами устройства сельских электроустановок» [Л. 2] для подстанций напряжением до 35 кВ. Наоборот, при наличии увлажнения грунта в месте заземления или в близости от него величина сопротивления

рабочего заземления оказалась очень близкой к нормальной. Удельная электропроводность увлажняемых горных грунтов была в $1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$.

Нами было проверено соответствие измеренных сопротивлений требованиям безопасности людей и животных, а также требованиям к защитному действию заземления при двухфазном установившемся коротком замыкании. Проверка показала, что во всех случаях отсутствия увлажнения грунтов величина сопротивления заземления не удовлетворяет требованиям защитного действия. На подстанциях, мощность которых превышает 30 квт, величина сопротивления заземления определяется рабочим током (условия безопасности). На повысительных подстанциях величина сопротивления заземления, определенная по рабочему току, оказалась меньше 4 ом. На понизительных подстанциях мощностью до 30 квт наименьшая допустимая величина сопротивления заземления, определяемая из условий безопасности, получается в случае, когда расстояние между подстанцией и ГЭС менее 2 км. При расстоянии 2 км и более наименьшая допустимая величина сопротивления определяется из условий защитного действия заземления с высокой стороны подстанций.

Последний результат проверки очень важен. Он означает, что на понизительных подстанциях мощностью до 30 квт допустима величина сопротивления рабочего заземления, значительно превышающая 4 ом, требуемых Правилами [Л. 2]. Это облегчит осуществление заземления систем ДПЗ в горных условиях.

По показаниям работников районных контор никаких мешающих влияний сетей ДПЗ линии связи не наблюдается.

Измерения асимметрии напряжения в сетях производились посредством схемы фильтрационной и прямой последовательности [Л. 4]. В сравнения были проведены контрольные измерения асимметрии в обычной трехпроводной системе. Измерения показали, что коэффициенты асимметрии в сетях ДПЗ мало отличаются от коэффициентов трехпроводной системы и находятся в допустимых пределах. Включение силовых нагрузок во всех случаях способствовало уменьшению коэффициентов асимметрии. Так, одной из обследованных систем ДПЗ коэффициент асимметрии при осветительной нагрузке составил 5,5%, а при смешанной — 3,5%. Как показала проверка, наличие ненормально высоких коэффициентов асимметрии в части сетей было связано со свойствами схемы ДПЗ.

Исследования, проводившиеся до настоящего времени [Л. 1, 5 и 7], подтвердили экономичность применения сетей ДПЗ в условиях равнинной местности. Удельная проводимость горных грунтов значительно ниже проводимости равнинных грунтов. Поэтому требуемые нормами рабочего заземления системы ДПЗ в горных условиях являются крайне тяжелыми и дорогостоящими. На первой Всесоюзной сессии по оборудованию сельской электрификации в 1948 г. была выдвинута сомнению экономическая целесообразность применения ДПЗ в горных условиях. В связи с этим нами выполнена работа по изучению условий, при которых применение систем ДПЗ в горных условиях Армении являлось экономически оправданным.

Основу работы легли многолетние исследования Лаборатории электротехники Академии Армянской ССР по определению удельных проводимостей горных грунтов Армянской ССР [8]. Согласно этим исследованиям наихудшей по проводимости отличаются скальные породы, удельная проводимость которых лежит

делая от $0,04 \cdot 10^{-4}$ до $0,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$. Задают грунты, образовавшиеся в результате эрозии и наносов (делювии и аллювии), с удельной проводимостью $0,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$. Только

удельная электропроводность горных почв, образовавшихся в результате раздробления коренных горных пород, оказалась очень близкой к удельной проводимости равнинных грунтов ($1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$).

Нами проведено сравнение по капитальным затратам систем ДПЗ различной протяженности с трехпроводными системами. Для сравнения были рассмотрены системы, имеющие напряжение 6 кв и выполненные стальным проводом марки Ж-35. Величина сопротивления рабочего заземления (совместного с защитным) систем ДПЗ принята равной 4 ом. Величина сопротивления защитного заземления на подстанциях трехпроводных

систем принята равной 10 ом, так как мощность подстанций ниже 100 кв. Величины заземлений гидроэлектростанций в сравнение не вводились, так как они легко осуществимы и от характера горных грунтов не зависят.

При сравнении рассматривались три варианта конструкций рабочих и защитных заземлений: 1) трубчатые заземлители, расположенные кольцеобразно и соединенные между собой полосой; 2) кольцевые заземлители в виде кольцеобразной полосы вокруг подстанции; 3) протяженные полосовые заземлители, представляющие собой две радиальные полосы, отходящие от кольца, охватывающего подстанцию. Во всех трех случаях заземлители углублены на 0,5 м ниже уровня земли. Такая глубина выбрана, исходя из имеющихся сведений о просыхании и промерзании грунтов в Армянской ССР [Л. 9]. Расчет заземлений произведен по известным формулам [Л. 12] с учетом коэффициентов экранирования.

Следует отметить, что сделанные подсчеты не претендуют на конструктивную разработку рационального типа заземления для горных грунтов. Они должны лишь наметить пути, по которым в дальнейшем можно вести исследование нового типа заземлений. Стоимости рабочего и защитного заземлений подсчитаны на основании единичных расценок по сметным данным Проектного отдела Армянского строительно-монтажного греста Главсельэлектро и Армянского отделения гидроэнергопроекта. Стоимость строительной части принята одинаковой как для линий ДПЗ, так и для трехпроводных линий. Стоимость электрической части линии ДПЗ принята равной двум третям аналогичной стоимости трехпроводной линии. Стоимость варианта передачи, включающая стоимость линии определенной длины и заземления на понизительной подстанции, выражается в виде уравнений:

1) для трехпроводной системы

$$A_{3\phi} = B_{3.3} + C_{3\phi} l; \quad (1)$$

2) для системы ДПЗ

$$A_{2\phi} = B_{p.3} + C_{2\phi} l, \quad (2)$$

где $A_{3\phi}$ — полная стоимость трехпроводного варианта;

$B_{3.3}$ — стоимость защитного заземления;

$C_{3\phi}$ — стоимость 1 км трехпроводной линии;

l — длина линии электропередачи в километрах;

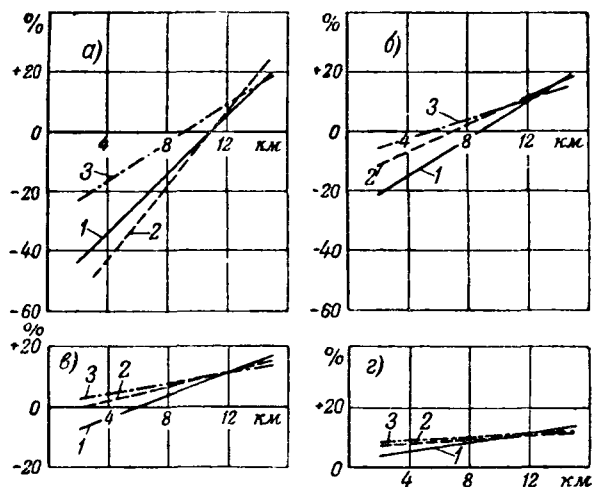
$A_{2\phi}$ — полная стоимость электропередачи ДПЗ;

$B_{p.3}$ — стоимость рабочего заземления;

$C_{2\phi}$ — стоимость 1 км электропередачи ДПЗ.

Относительная экономия от применения варианта ДПЗ может быть выражена следующим образом:

$$\frac{A_{3\phi} - A_{2\phi}}{A_{3\phi}} \cdot 100\%. \quad (3)$$



Изменение относительной экономии в зависимости от длины электропередачи: а — скальный грунт с удельной проводимостью $0,04 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$; б — скальный грунт с удельной проводимостью $0,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$; в — скальный грунт с удельной проводимостью $0,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$; г — грунт типа делювий и аллювий с удельной проводимостью $0,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$.

1 — трубчатые заземлители; 2 — кольцевые заземлители; 3 — протяженные полосовые заземлители.

На основании выражения (3) построены графики (рисунок). При построении графиков по оси абсцисс откладывалась длина электропередачи в километрах, а по оси ординат — относительная экономия в процентах. Во всех случаях, когда прямая относительной экономии проходит ниже оси абсцисс, применение ДПЗ невыгодно, так как удорожает передачу.

Графики (рисунок) показывают, что в скальных грунтах с удельной проводимостью от $0,04 \cdot 10^{-4}$ до $0,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ при длинах передачи, характерных для горных районов, трехпроводная

система оказывается экономичнее системы ДВ в горных грунтах с удельной проводимостью от $0,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ и выше, система ДПЗ экономичнее трехпроводной системы. Наиболее экономичным типом заземлителя является протяженный полосовой заземлитель.

Область применения системы ДПЗ в горных условиях может быть расширена. Для этого следует избегать устройства понизительных станций на скальных не увлажняемых грунтах. Горные селения, как правило, размещаются вблизи рек и родников, а территория селения покрывается искусственным орошением. Следовательно, всегда есть возможность выбрать для понижающей подстанции или выносного заземлителя участок с постоянной влажностью.

Литература

1. П. С. Орешкин и др. Передача энергии фазным током по системе „Два провода — земля“. Азия наук СССР, 1935.
2. Правила устройства электротехнических установок. Сельские электроустановки. Госэнергоиздат, 1950.
3. Л. П. Подольский. К устройству заземления плохопроводящих грунтов. Электричество, № 6, 1938.
4. Изготовление фильтров напряжения отрицательной последовательности для блокировки релейной защиты качаниях. Информационное письмо ОРГРЭС № 1, Госэнергоиздат, 1944.
5. Л. Е. Эбин и Ш. М. Алу кер. Руководство электрическому расчету трехфазных сетей с использованием земли в качестве одного из проводов. Госэнергоиздат, 1940.
6. Ш. М. Алу кер. Асимметрия напряжений и токов в сельскохозяйственных сетях. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, № 8, 1938.
7. Н. Н. Кузнецов и А. П. Златковский. Сельскохозяйственные электростанции. Гостехиздат, 1938.
8. Н. С. Казарян. Электропроводность горных грунтов. Доклады Академии наук Армянской ССР, 1938.
9. В. К. Давыдов. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна, ч. IV, Закавказский Севанский комитет, 1938.
10. И. С. Смолько и Н. П. Сеима. Конструктивное выполнение заземлителей в системе ДПЗ. Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 2, 1938.
11. А. Л. Вайнер. Заземления. ОНТИ, 1938.
12. Н. Ф. Марголин. Токи в земле. Госэнергоиздат, 1947.

[167]



Н. М. Алексеев — пионер использования земли в качестве провода при передаче электроэнергии

Кандидат техн. наук М. О. КАМЕНЕЦКИЙ

Ленинград

Использование земли в качестве проводника электричества внедрялось в электротехническую практику уверенно. В технике «сильных» токов применение метода началось лишь в последние годы. Однако использование земли, как электропроводника, культивировалось еще на заре электротехники Николаевичем Алексеевым, родившимся в 1850 г. (ум.

в 1882 г. в Петербурге, в Соляном городке (сейчас оборона Ленинграда). Электротехническим отделом Русского технического общества была организована выставка экспонатов Русского отдела Всемирной электрической выставки, происходившей в Париже. На Петербургской выставке была организована передача на расстояние. В отдельном зале было установлено 17 пар телефонов, которые электрической связью с микрофонами, находившимися на расстоянии 5 км в театрах: Мариинском (ныне оперы и балета Кирова) и Большом (размещавшемся на участке нынешнего Ленинградского консерваторий). По телефону посетители выставки могли слушать оперу [Л. 1]. Такая установка была осуществлена и на упомянутой выставке. Однако электрическая сеть была различна: в Париже каждый телефон состоял из микрофона двумя проводниками, уложенными в чугунных трубах; в Петербурге же один из проводов был воздушным и укреплялся на легких опорах, применявшихся в то время в военно-походном лагере вместо другого проводника (обмотка была использована земля [Л. 1, 2]. Алексеева, входившего по назначению Русского технического общества [Л. 3] в распорядительный комитет выставки, не удовлетворила применявшаяся для провозки система канализации тока. Н. М. Алексеев считал необоснованной боязнь «земных токов» электриков, стремившихся изолировать оба провода от земли. Используя на Петербургской выставке землю, как один из проводников электрического тока, ставив при этом отсутствие каких-либо вредных влияний на человека со стороны протекающего в земле (при условии изолированности человека от проводов), Н. М. Алексеев стал убежденным сторонником использования земли, как проводника электричества.

Впервые в 1882 г. по докладу довольно известного электротехника В. И. Ребикова «О применении прокладок проводников», Н. М. Алексеев высказал: «...что земля может служить безопасным проводником для самых сильных токов... опыт выяснит пол-

нотность использования электропроводности земли была доказана академиком Б. С. Якоби, но осталась незамеченной. Исследовательский запал мин, Б. С. Якоби установил возможность использования морской воды, как проводника, и затем произвел в 1842 г. первый эксперимент прохождения тока в воде и в сырой земле. Этот эксперимент описан Б. С. Якоби 2 декабря 1842 г. в «Обзоре гальванических опытов, произведенных между Кронштадтом и Оранienбау-ру» в архиве А. И. Лурье.

ную безвредность земли в составе гальванической цепи» [Л. 2].

На съезде членов Русского технического общества, состоявшемся в период функционирования в Москве Всероссийской промышленно-художественной выставки 1882 г., было прочитано три доклада на электротехнические темы. Выступая с докладом на тему «О передаче работы на расстоянии электричеством», Н. М. Алексеев наметил четыре основные задачи в этой области, в том числе: «Опыт стоящий менее всего — это испытать землю, как обратный проводник».

Н. М. Алексеев входил в число активных деятелей русской электротехники 80-х годов: при организации VI отдела РТО он был наряду с В. Н. Чиколевым и Д. А. Лачиновым одним из его основателей («непременных членов»); в сентябре 1880 г. он был избран товарищем председателя отдела взамен выбывшего П. Н. Яблочкова [Л. 4] и занимал этот пост более двух лет. В том же году он возглавлял комиссию VI отдела по изучению влияния линий силового тока на линии слабого тока [Л. 5]. Совместно с Н. П. Булыгиным, А. Н. Лодыгиным и Ч. К. Скржинским он наметил в 1881 г. программу исследования наилучших условий передачи механической работы на расстоянии и определил это исследование, как важнейшую задачу VI отдела [Л. 6]. В 1882 г. по его настоянию Русское техническое общество возбудило ходатайство о разрешении беспрепятственно пролагать воздушные и подземные проводники в том размере, в каком это окажется необходимым для электротехники [Л. 6].

В докладе на первом съезде Русского технического общества в 1882 г. Н. М. Алексеев предлагал: «попробовать землю как ...проводник».

Недавно исполнилось 100 лет со дня рождения этого талантливого русского электротехника, о котором широким кругам читателей известно еще очень мало. Пусть настоящая короткая заметка о Николае Матвеевиче Алексееве привлечет внимание историков отечественной техники и послужит началом более обширной работы о его жизни и творчестве.

Литература

1. О. Струс. Электрическая выставка VI отдела Русского технического общества. Электричество, № 2, 1882.
2. Труды съезда членов Русского технического общества в Москве в 1882 г., М., 1883.
3. Протокол заседания совета общества 11 марта 1881 г. Записки Русского технического общества (РТО), вып. 4 и 5, 1881.
4. Протоколы заседаний VI отдела Русского технического общества. Записки РТО, вып. 3 и 5, 1880.
5. Протокол комиссии VI отдела РТО. Электричество, № 2, 1881.
6. Журнал заседаний VI отдела Русского технического общества. Электричество, № 11, 1881.

[7. 8. 1950]



Об основных принципах стандартизации графических условных обозначений в электрических схемах¹

Кандидат техн. наук, доц. Б. А. ЯГУНОВ

Ленинград

При решении вопроса об единых графических условных обозначениях в электрических схемах следует исходить в основном из следующих положений. Прежде всего не следует забывать, что условное обозначение — это символ, который должен показать принадлежность данного элемента электрической схемы к той или иной группе, имеющей определенные преобладающие физические качества, и ни в коей мере не должен отражать конструктивные особенности аппарата. Это обстоятельство особенно важно, так как позволяет стабилизировать условные обозначения по группам вне зависимости от вводимых в схему новых аппаратов.

Подходя к решению вопроса с этой точки зрения и учитывая опыт большинства организаций, работающих в области схем электрического управления и контроля, следует разделить первичные элементы схемы на следующие основные группы: а) провода и их соединения; б) контакты командо-аппаратов, приводимых в действие от руки или от механизма; в) элементы аппаратов защиты электрических цепей (плавкие предохранители, тепловые реле, максимальные реле и т. п.); г) сопротивления и конденсаторы; д) элементы электромагнитных аппаратов управления (обмотки—реле, контакторов, пускателей и т. п., контакты реле и контакторов; специальные контакты); е) элементы электрических машин и трансформаторов (генераторы, двигатели, электромашинные усилители, трансформаторы и тому подобные устройства); ж) электронные и ионные приборы; з) контрольно-измерительные и сигнальные приборы; и) разные элементы (полупроводниковые выпрямители, аккумуляторные и гальванические элементы и т. д.).

Можно наметить следующие основные требования, предъявляемые к графическим условным обозначениям для принципиальных электрических схем.

1. Графические условные обозначения должны быть просты для изображения.

2. Различные физические качеств отдельных элементов должно определяться отдельными условными обозначениями, как, например, сопротивление омическое (преимущественно), сопротивление индуктивное и т. д.

3. Свойства, присваиваемые отдельным элементам схемы, следует обозначать графическими индексами, не меняя форму изображения основного условного обозначения. Например, нормально разомкнутый контакт реле с выдержкой времени при размыкании ничем, по существу, не отличается от нормального контакта реле. Следовательно, достаточно контакту придать соответствующий графический индекс, чтобы судить о его свойствах.

4. Контакты всех командоаппаратов с механическим (пневматическим или гидравлическим) воздействием должны изображаться одинаково между собой (по группе), но различно с контактами электромагнитных аппаратов.

5. Положение всех элементов в электрической схеме изображается в обесточенном состоянии или в исходном положении (для аппаратов с механическим воздействием).

6. При условном графическом изображении контактов электромагнитных аппаратов или контактов различных командо-аппаратов предполагается, что усилие или движение при рабочем ходе направлено сверху вниз или слева направо, а при возврате — наоборот.

По нашему мнению, условное изображение эле в монтажной электрической схеме ничем не должно отличаться от их изображения в принципиальной электрической схеме. Это можно подтвердить следующими положениями. В принципиальной электрической схеме необходимо знать токопрохождение по отдельным элементам и поэтому элементы располагаются в соответствующих монтажных цепях без всякой взаимной конструктивной связи. Наоборот, в монтажной электрической схеме рата или прибора необходимо знать взаимное расположение отдельных элементов одного аппарата или группы аппаратов с целью осуществления правильной монтажной электрической схемы. Следовательно, в обоих случаях не интересует конструкция аппарата. Таким образом, менять условное графическое обозначение элементов рата в монтажной электрической схеме нет необходимости, а следует только дополнять условное обозначение смонтированных элементов, соответственно их конструктивному размещению в данном аппарате, выходными зажимами или схемой панели в строгом соответствии с их действительным расположением. Рамки данной статьи не позволяют привести графические условные обозначения электрических схем, разработанные автором в соответствии с изложенными выше основными положениями. В заключение необходимо остановиться на книге М. А. Анфилова [Л. 1], посвященной в основном вопросу стандартизации графических условных обозначений в электрических схемах. К сожалению, автор этой книги подошел к вопросу чисто механически или, по терминологии автора, «по методу кооперирования». Он использовал опыт проектирования одной из систем электрооборудования кораблей, совершенно игнорируя опыт проектирования, например, таких систем, как связь, электрооборудование бортовых механизмов и т. п. Единые графические условные обозначения для электрических схем должны охватывать ряд смежных областей, например, радио, электротехнику сильных токов и т. д. Это обусловлено тем, что названные области имеют между собой в целом установок весьма тесную взаимосвязь. М. А. Анфилов необоснованно говорит об универсальности и целесообразности рекомендуемых им условных обозначений, которые могут быть использованы только временно, до разработки соответствующего ГОСТ.

Вопрос об единых графических и буквенных условных обозначениях следует разрешить срочно, в противном случае будут появляться предложения отдельных авторских организаций, которые будут вносить еще большую путаницу в этом вопросе. Многие из предложенных в настоящее время графических условных обозначений не применяются в практике, так как они были оторваны от жизни и работы научных и проектных организаций.

Комитет технической терминологии при Академии СССР должен форсировать свои работы в этой области и создать специальные конференции по данному вопросу в Москве и Ленинграде с привлечением учебных и научно-исследовательских институтов и проектных организаций.

Литература

1. М. А. Анфилов. Составление электрических схем. Оборонгиз, 1949.

¹ В порядке обсуждения.

(статьям К. Б. Карандеева „О классификации методов электрических измерений“ и Е. Г. Шрамкова „О классификации электроизмерительных приборов“¹

Доктор техн. наук., проф.

А. Д. НЕСТЕРЕНКО

Киевский политехнический институт

ГОСТ, а также статья Е. Г. Шрамкова почти повторяют методов измерений. Что касается работы Карандеева, то она вносит значительную ясность в классификации методов и большинство выдвинутых положений может быть принято, в особенности осознание методов, но с их классификацией согласен.

Классификация методов электрических измерений. Основные классификационные признаки для электрических измерений согласно предложению Карандеева следует принять способ сравнения с образцом, способ проведения физического эксперимента. В качестве третьего признака должен быть принят вид связи между измеряемой и известной величинами уравнения, характеризующего измерение. Этот признак определяет точность метода измерения. Методы электрических измерений могут быть разделены на одновременного сравнения и на метод одновременного сравнения.

При одновременном сравнении необходимо разбить признаки технических средств осуществления измерения на эпизодического сравнения градуировкой (результат выражается формулой $X=A$) и методы непрерывного сравнения подстановкой, которые осуществляются при помощи приборов и схем измерения. Результат измерения в последнем случае выражается уравнением $X=N+\Delta Z$.

В дальнейшем приняты следующие обозначения: X — измеряемая величина; A — показание прибора при нулевой оценке; N — известная величина; Z — показание прибора при уравнивании; P — показание прибора в случае.

При одновременном сравнении по признакам способа измерения измеряемой величины с известной могут быть выделены на методы совпадения и методы уравнивания.

Метод совпадения может осуществляться как полным совпадением (нулевой метод), так и неполным (дифференциальный метод).

При этом методе совпадения известная величина метода не будут приведены к совпадению все сигналы сравниваемых величин. Результат измерения выражается равенством $X=N$.

При дифференциальном методе совпадения сравниваемые, но не совпадающие по значению величины, известная величина определяется по разности между известной. Результат выражается формулой $X=N+\Delta Z$.

Метод уравнивания по виду основной связи между измеряемой и известной величиной делится на два типа: метод уравнивания, в котором уравниваются две близкие по значению

величины. Этот метод может осуществляться в двух вариантах: при полном непосредственном уравнивании измеряемой величины известной и при неполном непосредственном уравнивании, т. е. измерением разности между сравниваемыми величинами. В последнем случае метод может быть назван «разностным» или «дифференциальным».

б) Метод, при помощи которого измеряется отношение между измеряемой и известной величинами и который может быть применен для сравнения величин, находящихся в любом соотношении. Этот метод можно назвать «методом измерения отношения» или сокращенно — «методом отношения». Он также может осуществляться в двух вариантах: с полным и неполным уравниванием.

В методе непосредственного уравнивания неизвестная величина уравнивается равной или близкой к ней известной величиной (например, противовключением через гальванометр или при помощи специального уравнивающего устройства).

Если уравнивание достигается полностью, то результат измерения выражается равенством $X=N$. Точность измерения этим методом зависит только от точности образцовой меры и чувствительности указателя равновесия. В схемах и приборах, при помощи которых осуществляется этот метод, образцовая мера должна иметь переменное значение. Такой метод измерения может быть осуществлен при помощи схем, которые должны быть названы компенсационно-нулевыми схемами непосредственного уравнивания.

Если при применении метода непосредственного уравнивания сравниваются две постоянные по значению величины, то полное равновесие схемы не может быть достигнуто. В этом случае значение неизвестной величины может быть определено измерением полной разности между этой и известной величиной. Результат измерения выражается равенством $X=N+A$ или $X=N+Z$ (в зависимости от того, как измеряется разность: показывающим прибором или прибором уравнивания). В этом случае метод может быть назван дифференциальным, так как прибором измеряется разность между X и N . Если прибором измеряется полная разность, а это лежит в основе данного метода, то точность измерения зависит только от точности образцовой меры и точности измерения разности. Если относительная величина разности мала, этот метод позволяет получить высокую точность даже в том случае, когда прибор, измеряющий эту разность, не отличается большой точностью. Эта особенность является отличительной для дифференциального метода.

Так как образцовые меры постоянной величины могут быть изготовлены точнее, чем переменные, то этот метод измерения, в особенности с применением нулевого метода определения разности, является наиболее пригодным для самых точных измерений.

Может быть предложен и другой вариант деления метода непосредственного уравнивания, а именно: обе разновидности его назвать «дифференциальными методами», с общим выражением уравнения измерения $X=N+A+P$ и нулевой метод непосредственного уравнивания рассматривать, как частный случай дифференциального, когда $P=0$.

К основной классификации электроизмерительных схем и приборов. Основными признаками для деления электроизмерительных схем и приборов должен служить метод, положенный в основу их работы, роль экспериментатора в процессе измерения и устройство механизма прибора (особенности схемы).

В соответствии с этим электроизмерительные схемы и приборы могут быть разделены на три основные группы:

1) показывающие приборы с предварительной градуировкой, которые дают значение измеряемой величины без участия экспериментатора, сводя его роль к роли наблюдателя;

2) схемы и приборы уравнивания, в которых измерение ведется при активном участии экспериментатора;

3) схемы и приборы для измерения по методу совпадения.

Остановимся на классификации приборов второй группы.

В основу данной группы приборов положено уравнивание одной величины другой. Эту группу мы называли приборами уравнивания. Применение термина «приборы сравнения», не годится, так как при принятой классификации все приборы осуществляют измерение сравнением неизвестной величины с известной.

Схемы и приборы уравнивания можно разделить на следующие типы: компенсационные непосредственного уравнивания, измеряющие разность или дифференциальные, измеряющие отношение. Последние подразделяются на компенсационные «с внутренним делителем» и мостовые.

Компенсационные и мостовые схемы в зависимости от того, доводится ли уравнивание до конца или не доводится, делятся на:

1) полностью уравненные или нулевые;

2) неполностью уравненные или сокращенно неуравненные. Как разность в дифференциальных схемах, так и остаточное напряжение в неуравненных мостовых и компенсационных (с внутренним делением) схемах может определяться показывающим прибором или при помощи нулевой компенсационной схемы.

В первом случае мы имеем дело с дифференциально-показывающими, неуравненно-показывающими мостовыми и компенсационными схемами и приборами. Во втором случае это будут дифференциально-нулевые (схемы и приборы) и неуравненно-нулевые мостовые схемы и приборы. Дальнейшая классификация нами не рассматривается, так как она может быть построена по принципам, приведенным в статье Е. Г. Шрамкова.

Перейдем теперь к определениям основных схем и приборов уравнивания.

Компенсационные схемы являются схемами сравнения методом уравнивания путем противоявления на указатель равновесия двух или более электрических не связанных между собой напряжений (э. д. с.) либо токов. Они служат для непосредственного сравнения напряжений, э. д. с., тока и косвенно других параметров электрических цепей.

Компенсационные схемы сравнения двух напряжений или э. д. с. можно разделить на два отличающихся друг от друга типа:

а) схемы непосредственного уравнивания, в которых две равные сравниваемые э. д. с. непосредственно включаются друг против друга через указатель равновесия;

б) схемы, в которых применяется делитель напряжения. Наличие делителей вносит добавочные погрешности, что понижает точность этих схем по сравнению со схемами первого типа.

В компенсационных схемах сравнения токов уравнивание осуществляется при помощи устройств с двумя цепями, по которым и пропускаются сравниваемые токи. К этим устройствам относятся приборы, получившие название дифференциальных: многообмоточные трансформаторы, гальванометры, ваттметры и т. д.

Мостовые схемы являются схемами сравнения двух напряжений или двух сопротивлений, в которых сравнение осуществляется методом уравнивания при помощи двух и более вспомогательных сопротивлений, подобранных так, что со сравниваемыми объектами они составляют сложный замкнутый контур, в котором имеются две равнопотенциальные (или близкopotенциальные) точки, наличие

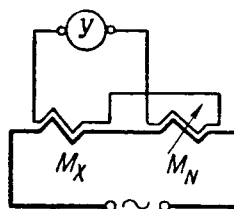


Рис. 1.

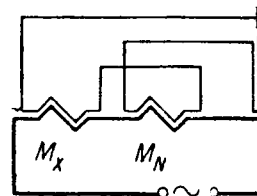


Рис. 2.

которых обнаруживается указателем равновесия. ние между указанными выше вспомогательными с лениями является мерой отношения между сравни величинами.

К дифференциальным схемам должны относит ко те схемы уравнивания, в которых измере прибором оценивается полная разность между ряемой и известной величиной. Поэтому диффе ренциальные схемы получаются из компенсационных, если] вешивание не доводится до конца.

Неуравненные мостовые, компенсационные ференциальные схемы и приборы, с одной стороны, ветствующие уравненные схемы и приборы, с стороны, имеют сходство по внешнему виду. Поэт обходимо указать на признаки, отличающие те и

В полностью уравненных схемах необходи затели равновесия, от которых не требуется коли ной оценки тока или напряжения (телефон, светов затель и т. п.). Поэтому к указателям равнове предьявляется каких-либо требований в отношении сти. В неуравненных компенсационных и м схемах и приборах для измерения остаточной р а в дифференциальных схемах для измерения пол ности должны применяться измерительные прибор деленной точности. Последнее отличие особенно хар для неуравненно-нулевых или дифференциаль ых схем, где измерительной схемой на выходе я самостоятельная компенсационно-нулевая схема. Таи разом, переход полностью уравненной схемы уравненную или дифференциальную определе меной указателя равновесия измерительным пр определенной точности.

В качестве примера можно указать на превр компенсационной схемы непосредственного уравни ния (рис. 1) в дифференциальную (рис. 2), предло автором в 1948 г. В первой схеме образцовая на ность переменна, и в качестве указателя равнове жет служить резонансный гальванометр, телефо любой другой указатель. В схеме рис. 2 разность э. д. с. вторичных цепей сравниваемых катушек с н ной величиной взаимной индуктивности уравнивае при помощи третьей взаимной индуктивности M_3 . ! ния должна иметь градуировку в величинах M_N и с указателем равновесия представляет самостоя: схему нулевого типа.

Инж. А. П. КОЗЛОВА

Богословская ТЭЦ

Концепция, предложенная Е. Г. Шрамковым, б но является шагом вперед и должна быть прин: основа при составлении новых норм и стандартов: троизмерительные приборы. Не упоминая вовсе о ных измерениях, автор, очевидно, подразумевает, ч боры для магнитных измерений не входят в разра боров общего назначения», так как являются ли бинацией обычных электроизмерительных приб: вспомогательных устройств и имеют особое назначе обстоятельство следует оговорить в новом standa как магнитные измерения по традиции рассматр как один из разделов электрометрии, что, конечно всем верно.

Вызывает возражение применение термина для первого, основного, разделения совокупности

альной аппаратуры на приборы непосредственной и приборы сравнения.

Термин «класс» всегда ассоциируется с понятиями, характеризующими качество (точность) прибора. Следовательно, этот термин целесообразнее использовать, как это и делает Е. Г. Шрамковым, в схеме при классификации по вторичным признакам приборов, например, по точности и т. д. Основное же разделение следует осуществлять на группы.

В зависимости, исходящую, ступень схемы, определяющей измерения измерительного механизма, следует классифицировать как вид прибора, и, наконец, для по-ступени оставить старый, но очень удачный термин «система» (приборы магнито-электрической, электро-механической и других систем).

Таким образом, основная классификация будет содержать группы, виды и системы электроизмерительных приборов — «классов», «групп» и «подгрупп».

Вторая классификация, показанная на схеме 1, является в одном дополнении. Речь идет о приборах вышней системы, которым по праву следует отвести свое место среди приборов электромеханического вида — основное обозначение В.

Вспомогательным частям измерительных приборов, обсуждаемой статьи относит «все части электрического прибора, исключая измерительный механизм, например, шунты, добавочные сопротивления и т. п.». Это дает основание предполагать, что определение справедливо в том случае, когда указанные детали не являются в прибор или жестко связаны с ним. Однако не следует ли «вспомогательная часть» прибора не быть жестко связанной с носителем измеряемой электро-вой энергии. Для ряда электроизмерительных при-боров части, т. е. шунты и добавочные сопротивления, являются вне прибора и часто на большом от него рас-стоянии, в силу чего их, конечно, нельзя причислить к вспомогательным частям». Поэтому в разрабатываемых документах материалах необходимо достаточно четко указать принадлежность упомянутых устройств и со-ответственно их классифицировать. Это связано также с тем, что не упомянутым проф. Шрамковым общим призна-ком характеризующим прибор со стороны его «техниче-ской сущности». Имеется в виду способ присоединения из-мерительного элемента к объекту, электрические параметры которого подлежат измерению. Поэтому представляется, что кроме разделения по признакам, использован-ного в параллельной классификации (см. схему 4), все электроизмерительные приборы разбить еще на приборы с прямым включением и приборы косвенного включения.

Приборами прямого включения подразумеваются приборы, которые непосредственно или через вспо-могательные части (шунты, добавочные сопротивления, вы-ходы) присоединены к носителю измеряемой электро-вой энергии.

Приборами же косвенного включения следует называть приборы, которые не имеют жесткой электрической связи с носителем энергии.

Приборы прямого включения, в свою очередь, можно разделить на приборы с встроенными и наружными вспо-могательными частями и без вспомогательных частей. Рав-нозначно, приборы косвенного включения следует под-разделить на приборы с встроенными, наружными вспомо-гательными механизмами и с множителем показаний.

Третью вспомогательную ветвь целесообразно доба-вить к схеме 4.

Основной и неотъемлемой частью большинства при-боров сравнения являются меры (образцовые сопро-тивления, нормальные элементы и т. п.), т. е. материально выраженные единицы измерения. Само собой разумеет-ся, что эти предметы должны классифицироваться особо, и следует указать в стандартах на электроизмеритель-ные приборы.

В заключение статьи попытка построения класси-фикации электроизмерительных приборов, исходящая из ос-новных понятий процесса измерения, представляет боль-шой интерес как с точки зрения построения классификации

электроизмерительных приборов, так и построения курса «Электрические измерения», читаемого в вузах. Попутно с обсуждением вопроса о классификации приборов следует отметить желательность более широкого, чем это делалось до сих пор, освещения следующих разделов курса «Элек-трические измерения»:

1. Единицы и эталоны электрических и магнитных ве-личин.

2. Измерительная аппаратура, включая меры, изме-рительные приборы и практические сведения о применяе-мых при измерениях измерительных приспособлениях — усилителях, стабилизаторах и пр.

3. Методы измерения электрических, магнитных и не-электрических величин электрическими приборами.

4. Обработка результатов и учет погрешности изме-рения наблюдателем.

Возвращаясь к статье Е. Г. Шрамкова, необходимо отметить, что предложенная классификация электроизме-рительных приборов непосредственной оценки по их основ-ному признаку — по принципу действия измерительного ме-ханизма, является строго научной и, безусловно, правиль-но исключающей излишнюю нагроможденность старой классификации.

Однако определение измерительного механизма недо-статочно точно раскрывает взаимосвязь явлений, происхо-дящих в самом измерительном механизме.

В определении не подчеркнуто основное свойство из-мерительного механизма — преобразовывать электромаг-нитную энергию в другие виды энергии и не подчеркнуто основное назначение — осуществлять такое действие, в ре-зультате которого появляется возможность произвести из-мерение соответствующей электрической величины.

В соответствии с этим представляется необходимым пред-ложить следующее определение:

«Измерительный механизм представляет собой устрой-ство, в котором электромагнитная энергия, обусловленная действием измеряемой величины, с помощью преобразова-ний в другой вид энергии (например, в химическую) или с помощью ряда преобразований (например, в тепловую, а затем в механическую), используется для количествен-ного определения измеряемой величины».

Такое определение позволит также уточнить сущность принципа действия соответствующих групп электроизме-рительных приборов.

Так, например, вместо определения, данного в статье группе электромеханических приборов, как таких, «в кото-рых энергия электромагнитного поля системы, характери-зующей устройство измерительного механизма, непосред-ственно используется для перемещения его подвижной части», предлагается дать следующее предложение:

«В измерительном механизме электромеханических при-боров энергия электромагнитного поля преобразуется в ме-ханическую, используемую для перемещения указателя прибора, по величине перемещения которого производят количественное определение измеряемой величины».

Это определение не будет противоречить включению термоэлектрических, фотоэлектрических, ламповых и вы-прямительных приборов в подгруппу магнитоэлектрических приборов, так как во вспомогательных частях этих прибо-ров происходит ряд преобразований различных видов энергии, а в измерительный механизм, как и в остальные приборы электромеханической группы, поступает электри-ческая энергия.

Соответственно можно считать, что:

в измерительном механизме группы электротепловых приборов электромагнитная энергия преобразуется в теп-ловую, а затем в механическую, используемую для пере-мещения указателя, по величине перемещения которого производят количественное определение измеряемой ве-личины;

в измерительном механизме группы электрохимических приборов электрическая энергия преобразуется в химиче-скую, под действием которой происходит выделение хими-ческого вещества из электролита, по количеству которого судят об измеряемой величине;

в измерительном механизме группы электронно-лучевых приборов под действием электромагнитной энергии проис-ходит механическое перемещение электронного луча, по величине перемещения которого производят определение измеряемой величины.

Инж. А. П. КАТЕЦКАЯ
РИГА

Предложенная в статье попытка построения класси-фикации электроизмерительных приборов, исходящая из ос-новных понятий процесса измерения, представляет боль-шой интерес как с точки зрения построения классификации

Нам представляется, что такие определения шире раскрывают диэлектрическую сущность измерительных приборов.

К недостаткам статьи надо было бы отнести непонятное отсутствие фотоэлектрических приборов в приведенной отдельной классификации магнитоэлектрических приборов.

Классификация приборов сравнения, предлагающая введение целого ряда новых терминов (одинарные и двой-

ные мосты, компенсаторы, вместо потенциометра, четко отражает уже принятую измерителями терминологию и вполне соответствует сущности этих приборов.

Параллельная классификация электроизмерительных приборов по признакам, не зависящим от принципа действия, приведенная на схеме рис. 4, на наш взгляд, требует доработки, в ней должны найти отражение еще некоторые технические признаки, такие, как способ защиты прибора от электрических и магнитных полей, защиты корпусов и т. д.



К статье Д. С. Лившица „Расчетные нагрузки электросетей“

(Электричество, № 12, 1949)

Кандидат техн. наук Г. М. КАЯЛОВ
Новочеркасский политехнический институт

В практике проектирования электросетей промпредприятий в настоящее время пользуется наибольшим распространением методология расчетов, принятая Главэлектро-монтажем Минтяжстроя и базирующаяся на предложенной Д. С. Лившицем эмпирической формуле для расчетной нагрузки

$$P_p = aP_{m_1} + bP_{n-m_1} = cP_{m_1} + bP_n. \quad (1)$$

Для обоснования значений коэффициентов формулы (1) предложен специальный метод анализа результатов наблюдений [Л. 1].

В связи с отсутствием в существующей литературе достаточно общей и обоснованной теории нагрузок промышленных сетей формула (1) представляет определенный интерес; ее достоинствами являются простота и удобство пользования при массовых расчетах. Однако вся методология в целом вызывает некоторые замечания, излагаемые ниже.

Об основной расчетной формуле. Расчетный максимум нагрузки группы электроприемников зависит не только от их режима работы и числа приемников n , но и от различия в их индивидуальных мощностях [Л. 3].

Последнее обстоятельство может привести к явно неверным результатам при пользовании формулой

$$P_p = K_c P_n, \quad (2)$$

где $K_c = \varphi(n)$ (или даже $K_c = \text{const}$), хотя формула (2) безоговорочно рекомендуется в справочнике [Л. 2]. Введение в (1) по сравнению с (2) дополнительного слагаемого cP_{m_1} не устраняет возможности получения заведомо неверных результатов расчета.

Пусть $P_n = 20 \times 1 + 1 \times 5 \text{ квт}$, $n = 1 + 5 = 6$, $b = 0,14$, $c = 0,51$ и $m_1 = 5$. Тогда согласно (1) $P_p = 0,51 \times (20 + 4,1) + 0,14 \times 25 = 15,74 < 20 \text{ квт}$. Расчетный максимум нагрузки всей группы из шести электроприемников получился меньше номинальной мощности наиболее крупного из них. Получение такого явно неправильного результата не случайно и объясняется дефектностью эмпирической формулы (1), что нетрудно выяснить.

Если для группы тождественных приемников теоретически или экспериментально получена зависимость

$$P_p = K_c P_n = \varphi(n) P_n = \varphi(n) n p_n, \quad (3)$$

то простое и логически безупречное обобщение этой формулы на случай различных индивидуальных мощностей $p_{n,k}$ группы приемников дается формулой

$$P_p = \varphi(n'_1) n_1 p_{n_1} + \varphi(n'_2) n_2 p_{n_2} + \dots + \varphi(n'_m) n_m p_{n_m}, \quad (4)$$

где $P_n = \sum n_k p_{n,k}$; $n'_k = \frac{P_n}{p_{n,k}}$ — приведенное число приемников $p_{n,k}$;

$\varphi(n'_k) n_k p_{n,k} (< \varphi(n_k) n_k p_{n,k})$ — их парциальный максимум, т. е. отвечающая подгруппе из n_k приемников $p_{n,k}$, слагающая расчетной нагрузки всей группы.

Уместно напомнить, что в свое время Ф. О. Рубина предложена эмпирическая формула для сетей с катных цехов

$$P_p = k_1 P_{m_1} + k_2 P_{m_2} + \dots$$

где $k_1 = \text{const}$, $k_2 = \text{const}$ и т. д.;

P_{m_1} — мощность m_1 наибольших двигателей;

P_{m_2} — мощность m_2 следующих по величине и т.

Формула (1) отличается от (4) и (5) уменьшением числа слагаемых в правой части до двух. Это упущение в некоторой степени оправдывается тем, что если $P_{n_1} > P_{n_2} > P_{n_3} > \dots$, то, очевидно, и $\varphi(n'_1) > \varphi(n'_2)$, т. е. последующие слагаемые в правой части (4) играют меньшую роль в суммарном максимуме. Однако мощность P_{n_1} , сравнимой с мощностью всей группы P_n , возможно получение заведомо неверных результатов подобных приведенному выше. Но этого можно избежать, применяя теоретически обоснованную формулу (4), в которой следует принять [Л. 1]:

$$\varphi(n) = b + \frac{cm_1}{n}.$$

Однако вероятность получения ошибочных результатов делает сомнительным применение формулы тогда, когда результаты расчета не являются явно вильными.

Заметим, что выражение (6) принято для тождественных приемников условно. Вообще же предложенная формула (4) справедлива при любом выражении для найденном теоретически или экспериментально.

Случай малого числа приемников. Формула неприменима для $n < m_1$; формула же (4) позволяет извести расчет и для этого случая, если построить график (6) [Л. 1] на интервал $1 \leq n \leq m_1$. Для

имеем $P_p = \frac{P_n}{\eta_n} \approx 1,15 P_n$ и с достаточной для прак-

тью интерполяция может быть осуществлена пара-

$$K_c = \varphi(n) = 1,15 - \frac{1,15 - (b + c)}{(m_1 - 1)^2} (n - 1)^2, \quad (7a)$$

при относительно большом $(b + c)$, прямой

$$K_c = 1,15 - [1,15 - (b + c)] \frac{n - 1}{m_1 - 1}. \quad (7b)$$

Видно, что при переходе к $n = 1$ известная условная зависимость в силу того, что для $n = 1$ расчетная нагрузка принимается (по эксплуатационным и другим условиям) равной $P_p = \frac{P_n}{\eta_n}$, независимо от величины коэффициента загрузки.

Важное определение коэффициентов. В формуле (1) используются не только значения коэффициентов, но и сама ее структура. Поэтому опытная проверка особенно важна. Между тем, методология проверки изложена в [Л. 1], вызывает некоторые замечания. Согласно [Л. 1] проверка структуры (1) в задаче выбора не включается. Попутно следует отметить, что результаты обследования, повидимому, дают большое количество и могут быть расценены как отрицательные. Анализ данных, полученных в результате обследования, ограничивается выяснением таких значений коэффициентов, при которых провода и кабели, рассчитанные (1), не перегревались бы.

Такой подход к задаче означает, что применение формулы (1) будет приводить в большинстве случаев к завышению расчетных нагрузок. Применение формулы могло бы быть оправдано лишь при выяснении незначительности связанного с ней расхода цветных металлов и не может быть рекомендовано для питательных линий больших сечений.

Согласно [Л. 1] сопоставление результатов наблюдений на различных питательных линиях предлагается

сделать по условной величине $N = \frac{P_n}{P_{m_1}; m_1}$. Очевидно,

такое сопоставление само будет условным и не позволит сделать устойчивых и надежных выводов. Здесь особенно то, что при сопоставлении результатов расчета на питательных линиях с различными сечениями кабелей по опытным данным не учитывается разная постоянная времени нагрева, по которым выполнен расчет.

Выводы. Применение формулы (1) нуждается в рассмотрении случаев ее заведомой неприменимости; в обосновании оценки результатов расчета по ней; в разработке методики опытного определения входящих коэффициентов.

В любом случае, для расчета питательных линий большого сечения, а также в случаях заведомой неприменимости формулы (1), необходима более сложная, хотя бы и более сложная методология расчета.

Литература

1. С. Лившиц. Расчетные нагрузки сетей. Электричество, № 12, 1949.
2. Лившиц. Справочник по электрооборудованию предприятий. М., 1945.
3. М. Каялов. Определение максимума нагрузок производственных электроприемников. Электричество, 9-10, 1937.

Кандидат техн. наук

Б. Н. АВИЛОВ-КАРНАУХОВ

Новочеркасский политехнический институт

Важность работ по методике определения расчетных нагрузок электросетей не вызывает сомнений. Но это требует всестороннего обоснования предлагаемых методов и глубокого анализа исходных показателей.

Изучение статьи Д. С. Лившица показывает, что анализ экспериментального исследования нельзя считать удовлетворительным.

На стр. 62 автор указывает: «При этом наблюдается, что точки, относящиеся к одному и тому же фидеру, но измеренные в разные дни, часто имеют значительный разброс». Причины, вызывающие разброс точек, не установлены.

На стр. 63 отмечается: «При таком положении вещей очевидно, что проверка на нагрев вновь проектируемых установок должна базироваться на наибольших, вероятных для данного режима значениях коэффициента спроса». Чем, какими показателями определяется «данный режим», не указывается.

На той же стр. 63 делается заключение: «Следовательно, на графике рис. 3 и 4 необходимо провести плавные кривые, огибающие подавляющее большинство точек наблюдения, и эти кривые $K_c = f(N)$ можно рекомендовать для определения расчетных нагрузок соответствующей группы потребителей при новом проектировании». Критерия для выбора исходных коэффициентов a и b гиперболической кривой, огибающей «подавляющее большинство точек наблюдения» не дано.

Как следствие такого анализа, выводы, сделанные из материалов экспериментального исследования, нельзя признать обоснованными. Это отчасти объясняется тем, что энергетические испытания были проведены без учета таких важных производственных показателей, как производительность обследуемого участка, пролета, цеха. Связь между общим и удельным потреблением электроэнергии, а значит, и графиками нагрузки, с одной стороны, и производительностью соответствующей части предприятия, с другой, уже несколько лет назад была отмечена в работах В. И. Вейца и других советских ученых.

Установление основных причин, вызывающих «значительный разброс» точек на графике экспериментального исследования, позволило бы применить один из известных математических методов обработки результатов эксперимента — метод средних, метод наименьших квадратов, на основании которых можно получить одну или несколько эмпирических зависимостей, взамен неопределенной кривой, огибающей «подавляющее большинство точек». Результаты такого анализа, несомненно, были бы более обоснованными.

При последующих экспериментальных исследованиях по определению коэффициента спроса промышленных предприятий необходимо, кроме показателей, перечисленных в статье, учитывать также и основные производственные показатели, в первую очередь производительность обследуемого участка предприятия. Такая постановка исследования позволит определить коэффициенты спроса не только для наблюдаемых значений производительности предприятия, но и для будущих, отчего ценность подобных исследований значительно возрастет.



К статье Л. И. Двоскина „Новая схема соединений для мощных электрических станций“

(Электричество, № 5, 1950)

Кандидат техн. наук М. И. СЛАВНИН

Московское отделение Теплоэлектропроекта

Предложенная схема является рациональной для того частного случая, который рассматривает Л. И. Двоскин, а именно станции с шестью турбогенераторами по 50 тыс. кВт и отдачей всей мощности на напряжении 220 кВ. В действительности такие условия являются исключением.

Трудно предположить, чтобы станция, начатая с установки двух генераторов по 50 тыс. кВт, и дальше развивалась посредством единиц такой же мощности. Более правильно предположить, что, начиная с третьего, а может быть с четвертого агрегата будут устанавливаться турбогенераторы по 100 тыс. или 150 тыс. кВт. Если переход на единицы большей мощности начнется с нечетного номера агрегата, то какое-то число пар генераторов могло бы быть скоммутировано по предлагаемой Л. И. Двоскиным схеме. При четном номере первой большей единицы эта схема неприемлема.

При установке единиц мощностью 100 тыс. кВт единственным вариантом схемы в настоящее время является включение генератора в блок с группой из трех однофазных трансформаторов по 40 тыс. кВА в фазе и с расщепленной обмоткой 15 кВ. При установке турбогенератора 150 тыс. кВт группа будет, как правило, состоять из трех однофазных трансформаторов по 60 тыс. кВА и расщепленной обмоткой 18 кВ.

Наличие на мощной станции одного напряжения 220 кВ является весьма редким. Наиболее частыми будут случаи двух повышенных напряжений, например 220 и 110 кВ или 220 и 35 кВ. На отдельных электрических станциях не исключены случаи трех напряжений, хотя этого и стараются избегать.

При двух повышенных напряжениях предложенная схема может быть применена только в случае, если вторым напряжением является напряжение 35 кВ и нагрузки на этом напряжении относительно не велики. Питание их могло бы быть в этом случае осуществлено от отдельных трансформаторов 10/35 кВ, присоединяемых к ответвлениям от выводов генераторов.

Если на станции предполагается иметь напряжения 220 и 110 кВ, то предложенная схема не может быть признана целесообразной, учитывая необходимость более непосредственной связи систем 220 и 110 кВ, а также удельный вес нагрузок системы 110 кВ в общем балансе станции. В этом случае единственно правильным решением является применение групп из однофазных трехобмоточных трансформаторов 10/220/110 кВ, мощностью (при двух генераторах по 50 тыс. кВт) — 3×40 тыс. кВА.

Даже в тех случаях, когда станция проектируется и первая очередь ее сооружается с учетом выдачи всей мощности в систему 220 кВ, следует в большинстве случаев учитывать вероятность появления на станции в дальнейшем повышенного напряжения 110 кВ.

Таким образом, область применения схемы, предложенной Л. И. Двоскиным, несмотря на ее положительные качества, ограничивается редкими случаями тепловых станций с генераторами до 50 тыс. кВт в единице и отдачей всей мощности в систему 220 кВ.

В заключение хотелось бы отметить, что рассматриваемый в статье Л. И. Двоскина первый вариант схемы, основывающийся на группах из однофазных трансформаторов по 20 тыс. кВА в фазе, является в отношении трансформаторов пройденным этапом и вряд ли стоило его в таком виде рассматривать. И в первом варианте речь может идти о трехфазных трансформаторах по 60 тыс. кВА, но тогда он в ряде случаев может оказаться сопоставимым с предлагаемой схемой второго или третьего вариантов. Необходимо считаться с тем, что в целях экономии выключателей 220 кВ приходится прибегать, иногда в качестве временной меры, к первому варианту с одним выключате-

лем на цепь и можно высказать предположение, схема при наличии обходного выключателя может быть в некоторых случаях целесообразной.

Кандидат техн. наук

Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ

Гидроэнергопроект

Л. И. Двоскин предлагает применять в качестве схемы коммутации электрических станций с блоками генератор-трансформатор. В статье не содержится никакого указания на то, что схема предлагается для тепловых станций. Можно думать, что она сится и к гидроэлектрическим станциям. Для установления недоразумений относительно области применения предлагаемой схемы целесообразно дать более подробный анализ, чем это делает автор.

По сравнению с однофазными трансформаторами мощность которых равна удвоенной мощности генератора фазные трансформаторы, спаренные в укрупненные имеют, по мнению автора статьи, следующие преимущества: а) возможность ревизии трансформатора при замене только своего, блочного, генератора; б) уменьшение потерь в трансформаторах при ежегодных ревизиях; в) уменьшение числа трансформаторных групп; г) отсутствие треугольника на генераторном напряжении; д) возможность при аварии одного из трансформаторов блока восстановления нормальной работы второго трансформатора.

Высокая надежность современных высоковольтных трансформаторов сводит на-нет значение преимуществ, указанных в пунктах «а» и «д», так как капитальный ремонт трансформаторов производится один раз в 5 и более лет, а их ревизия возможна при минимальной нагрузке. Особенно это справедливо для гидростанций, работающих в большинстве случаев по пиковому режиму в течение всего года.

Что же касается уменьшения потерь энергии в трансформаторах в периоды ежегодных ревизий генераторов, утверждения автора неправильны. Для трансформаторов 110 кВ согласно заводским данным потери энергии в линиях равны (при $\cos \varphi = 1,0$);

	В стали	В меди	1
Трехфазный трансформатор 60 тыс. кВА	140	295	
Однофазный трансформатор 40 тыс. кВА	84	216	
Группа однофазных трансформаторов 120 тыс. кВА при 50% нагрузки	252	162	

Таким образом, при отключении одного генератора в группе однофазных трансформаторов 120 тыс. кВА будут на 21 кВт меньше, чем в трехфазном трансформаторе 60 тыс. кВА; равенство потерь наступает при нагрузке генератора, равной 90% номинальной. На тепловых станциях переход на трехфазные трансформаторы не уменьшает потерь энергии в периоды ремонта турбин, так как последние обычно работают при нагрузках, близких к номинальной.

Уменьшение числа трансформаторных единиц может иметь практическое значение в случаях отсутствия достаточной площади для их размещения. Но след-

¹ По трансформаторам 220 кВ данные отсутствуют.

то при высокой надежности трансформаторов нет необходимости устанавливать резервную фазу, поэтому число однострановых трансформаторов по схеме рис. 1 (см. статью Л. Двоскина) будет равно 9, а не 13, как ошибочно думает автор.

Включение мощных трехфазных трансформаторов требует иметь кран и тележку большей грузоподъемности, в некоторых случаях повышает капитальные затраты. Включение треугольника на генераторном напряжении не только усложняет монтаж, но и имеет существенного значения не имеет.

В статье совершенно не освещен вопрос с точки зрения работы электрической станции. Для конденсаторных тепловых станций, нормально работающих на графике нагрузок, вывод генераторов из работы

производится при ревизиях и ремонтах. На гидростанциях обычно большая часть генераторов отключается ежедневно в часы минимальной нагрузки. При отключении одного из парных генераторов и нагрузке блока менее 50% эксплуатационный персонал будет всегда стремиться в целях уменьшения потерь энергии отключать и трансформатор. Для этого потребуется отключить сначала оба трансформатора, а затем включить один из них. Во время операций с разъединителями возможны ошибки, а следовательно, и аварии.

Для автоматических и телеуправляемых гидроэлектростанций, на которых все оперативные переключения должны производиться выключателями, предлагаемая схема является неудовлетворительной, но и на тепловых станциях она не дает всех тех преимуществ, о которых говорится в статье Л. И. Двоскина.



Страницам технических журналов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ПРИ ОЧЕНЬ МАЛЫХ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

В 1949 г. Энергетический институт Академии наук совместно с работниками Министерства станко- и электромашинного строительства СССР провел исследование электрических процессов при разряде в очень малых промежутках. В частности, изучалась начальная стадия раз-

ряда. Исследования проводились в промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

В промежутках 300—250 в и ниже и в этом случае разряд происходит в очень малых разрядных промежутках (порядка 10—100 мк).

Были поставлены опыты по искусственному образованию мостиков.

Контрольные опыты проводились с чистыми электродами при начальном напряжении пробоя $U_0 > 400—500$ в, когда исключалась возможность образования предразрядных мостиков (газовый пробой). В этих осциллограммах при разряде напряжение без всякого заметного предварительного изменения своего хода начинает стремительно падать (рис. 1, а, б).

Начало спада отмечено точкой a_1 на осциллограмме а. Замедление спада в точке b_1 обусловлено поверхностными явлениями у электродов. Время спада Δt оценивалось от изменения напряжения U_i от значения U_0 до $0,5 U_0$ (рис. 1, б).

При второй серии опытов электроды посыпались металлическим порошком и в схеме замерялось начальное сопротивление мостика.

Осциллограмма в показывает разряд с искусственно созданным мостиком. Начальное сопротивление мостика составляло около 1 ком. Пунктирная кривая показывает ход напряжения $U_i(t)$ без разряда в промежутке. Видно, что приблизительно за $20 \cdot 10^{-8}$ сек (точка n , рис. 1, б) до быстрого спада в точке а начинается снижение напряжения U_i по сравнению с напряжением $U_i(t)$, действующим на промежутке при отсутствии мостика ($R_i > 100$ ком).

Наблюдаемые изменения U_i (как показали предварительные опыты и расчеты) могут быть обусловлены лишь снижением сопротивления мостика с 1 ком до 2—3 ом, что произошло за время всего около $15 \cdot 10^{-8}$ сек, прошедшего с момента приложения импульса. Быстрый спад U_i в точке а является результатом не пробоя воздушного промежутка, а завершением начавшегося в точке n процесса расплавления мостика.

Аналогичные осциллограммы были получены при разряде в масле, взятом из эрозийного станка. И при этих опытах быстрому спаду напряжения предшествовало плавное изменение напряжения, что подтверждало образование мостиков из проводящих частиц в масле. При величине начального напряжения $U_0 80—100$ в на осциллограммах наблюдается плавное снижение напряжения, а участок быстрого спада ($a_1—b_1$, рис. 1, а) вовсе исчезает. С увеличением U_0 быстрая часть разрядной кривой становится, наоборот, более крутой.

При работе эрозийного станка, где зарядное время измеряется тысячами и десятками тысяч микросекунд, условия благоприятствуют образованию мостиков. На осциллограмме 2 рисунка непосредственно зарегистрирован процесс изменения напряжения при работе эрозийного станка.

сигналов рассогласования в компенсационных схемах измерений.

Условия работы регуляторов еще разнообразнее, чем условия работы контрольных приборов, поэтому основное внимание к регуляторам — это широкая модификация их элементов, в том числе исполнительных органов. Регулятор должен осуществлять разнообразные законы регулирования, т. е. различные зависимости между изменяемым параметром и действием исполнительного органа, необходимые для обеспечения высокой точности регулирования. Регулятор должен обладать дистанционной действенностью. Наконец регулятор в случае необходимости должен обеспечивать «зависимое» регулирование значительностью разнообразных сочетаний отдельных регуляторов и их соединений в общую систему при различных функциональных преобразованиях контролируемых величин.

Анализ показывает, что устройства непрямого действия автоматического контроля и регулирования, построенные по агрегатному принципу, целесообразно разбить на конструктивно независимых элементов. Первый из них — исполнительный орган с первичным преобразователем, вторым элементом является щитовое устройство, содержащее компенсирующий узел и балансный электродвигатель, осуществляющий компенсацию и перемещающий исполнительный прибор. Третий элемент — управляющее устройство. Четвертым элементом является исполнительный механизм (электрический, гидравлический, пневматический). Система автоматических контрольных и регулирующих устройств общепромышленного назначения следует рассматривать как единый комплекс. Объектом научного исследования становится уже не устройство, а система устройств, работающих между собой определенными условиями. С этой точки зрения наиболее актуальные научные задачи в этой области можно подразделить на две группы: первая — повышение комплекса автоматических контрольных и регулирующих устройств на основе агрегатного принципа; вторая — комплексная автоматизация промышленных объектов агрегатной системы.

В первой группе можно отнести следующие задачи: 1) выявление целесообразной структуры автоматических устройств для различных условий контроля и регулирования; 2) методы повышения точности; 3) методы увеличения быстродействия; 4) способы увеличения надежности; 5) способы снижения стоимости аппаратуры. Вторая группа научных задач потребует: 1) изучения сложности комплексной автоматизации технологических процессов и выявления целесообразности их перестройки для широкой автоматизации; 2) проведения классификации промышленных объектов регулирования, выявления наиболее выгоднейших структур регуляторов, обеспечения агрегатной системой; 3) постановки ряда исследований технико-экономического характера по выявлению наиболее эффективных методов автоматизации промышленных объектов; 4) развития методов теоретического и экспериментального анализа переходных процессов в системах, использующих автоматические устройства, в том числе методов моделирования.

В прениях по докладу выступили: академик И. П. Бардин, академик В. Н. Юрьев, член-корр. АН СССР М. П. Костенко и другие.

Резюмируя прения, председательствующий академик Б. А. Введенский отметил, что доклад и развернувшиеся по нему прения показали важное значение доложенной работы и серьезность проблемы построения приборов автоматического контроля и регулирования в виде единого комплекса, отвечающего нуждам всех отраслей промышленности.

(Известия Академии наук СССР, Отд. техн. наук, № 10, 1950, В. А. Трапезников)

ЗА РУБЕЖОМ

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД РОТАЦИОННЫХ ПЕЧАТНЫХ МАШИН

Электропривод современных ротационных машин должен обладать высокими регулировочными качествами. Скорость машины изменяется в довольно широких пределах (диапазон скоростей равен 5:1), разбег и замедление должны быть плавными; кроме того, привод осуществляет заправочное движение со скоростью, равной 2,5% от основной скорости, а также прерывистое наладочное движение.

Описываемая система привода состоит из двух двигателей постоянного тока, питаемых от игнитронного выпрямителя, собранного по схеме Ларионова. Выпрямленное напряжение регулируется от нуля до 550 в с помощью магнитного усилителя, управляющего работой зажигателей игнитронов. В цепь возбуждения двигателей включен электромашинный усилитель, что позволяет получить скорости выше номинальной за счет ослабления поля двигателей. Как разбег, так и замедление осуществляются за время, равное 35 сек. с достаточной плавностью. На любой скорости, превышающей 2,5% от полной, привод обеспечивает необходимое постоянство скорости при колебаниях нагрузки. В схеме предусмотрена также возможность обычного динамического торможения.

Авторы сравнивают эту систему привода ротационных печатных машин с приводом от асинхронного двигателя с фазным ротором и реостатным регулированием. Естественно, что на фоне известных недостатков привода с использованием асинхронных двигателей, описываемая система привода имеет свои достоинства.

Те очевидные выводы, к которым приходят авторы в результате сравнения, не представляются новыми. Преимущества игнитронной схемы питания двигателя по сравнению со схемой питания от генератора не столь очевидны, как явные недостатки привода от асинхронного двигателя и именно в такой плоскости сравнение различных систем привода имеет некоторый интерес.

(El. Eng. № 5, 1950. J. A. Johnson, E. M. Stacey).

Инж. Р. М. СЛАВИН



Михаил Андреевич Шателен

К 85-летию со дня рождения и 60-летию научной, педагогической и общественной деятельности

Лауреат Сталинской премии, член-корр. Академии наук СССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР и Узбекской ССР, доктор техн. наук, проф. М. А. Шателен — один из организаторов в нашей стране высшего электротехнического образования и создатель ряда научных электротехнических школ: электронизмерительной, светотехнической, высоковольтной, электрической тяги, электроэнергетики, электрической сварки, истории науки и техники в области электротехники и ряда других.

Михаил Андреевич Шателен родился 13 января 1866 г. в крепости Анапа Черноморской области. После окончания в 1884 г. Тифлисской классической гимназии с золотой медалью М. А. Шателен поступил на Физико-математический факультет Петербургского университета, который окончил в 1888 г. Практические области применения электротехники настолько привлекли к себе внимание М. А. Шателена, что он решил получить также высшее техническое образование. Одновременно с учебой М. А. Шателен работал на электротехническом заводе и прошел путь от рабочего до шеф-молтера по сооружению электрической станции переменного тока и линии высокого напряжения.

После преобразования в 1893 г. Петербургского технического училища почтово-телеграфного ведомства в самостоятельный Электротехнический институт, М. А. Шателен был приглашен для организации в нем первой в России кафедры и лаборатории электротехники. В этот период он написал руководство к составлению проектов электрического освещения и распределения механической энергии и выполнил ряд научно-экспериментальных исследований в области установившихся и нестационарных явлений в цепях переменного тока, используя сконструированные им оригинальные приборы: «курбограф», фотометр и др.

За проявленное сочувствие к революционно-демократическому студенчеству М. А. Шателен был уволен из Электротехнического института. В 1901 г. М. А. Шателен был привлечен к организации Петербургского политехнического института, в котором он занял пост профессора и первого декана электромеханического отделения. Здесь он организовал ряд электронизмерительных лабораторий: гальванометрическую, магнитную, сетевую, фотометрическую и др., а также эталонную лабораторию. Работая в ЛПИ, М. А. Шателен создал общий курс «Электротехники», выдержавший ряд изданий, а также курсы «Электрических измерений» и «Переменных токов». После Революции М. А. Шателен занимал (1919—1920 гг.) пост ректора Политехнического института.

М. А. Шателен принимал самое близкое участие в подготовке и в проведении всех электротехнических съездов, в руководящей работе электротехнического (VI) отдела Русского технического общества, в деятельности журнала «Электричество» и в организации электротехни-



ческих выставок. Сотрудничать М. А. Шателен в журнале «Электричество» началось давно. Сначала он работал в качестве секретаря редакции, затем члена редакционного комитета и по настоящее время является одним из активнейших нов редакционной коллегии журнала. М. А. Шателен опубликовал в журнале «Электричество» большое количество статей, рецензий, докладов и заметок.

Весьма большое внимание М. А. Шателен уделял все годы электрификации промышленности. С членом Горного ученого комитета он участвовал в составлении проектов электрификации уральских заводов и электрификации тяжелых промыслов. В качестве члена инженерного совета Министерства Путей сообщения М. А. Шателен участвовал в разработке вопросов электрификации железнодорожного транспорта. После начала Первой мировой войны М. А. Шателен,

мобилизованный в армию, провел на северо-западном фронте ряд работ по электрификации проволочных заграждений и по прожекторному и ракетному освещению. В период 1918—1919 гг. М. А. Шателен был председателем Электротехнической секции Высшей коллегии по гражданской обороне Петрограда.

После Великой Октябрьской социалистической революции М. А. Шателен участвовал в работах, связанных с электрификацией страны, в качестве зам. председателя Ленинградского отделения ЦЭС. В 1920 г. М. А. Шателен в качестве члена ГОЭЛРО и уполномоченного по Северному району составил вместе с группой инженеров план электрификации Северного района; этот план был официально отмечен В. И. Лениным. Среди проектов, рассмотренных под руководством М. А. Шателена, можно отметить проекты сооружения гидроэлектростанций Волхове, Свири и Днепре. Под руководством М. А. Шателена было проведено обсуждение вопросов производства фарфоровых высоковольтных изоляторов, гидравлических турбин и генераторов, а также разработаны многочисленные электротехнические правила и нормы. М. А. Шателен принимал участие в экспертизе проекта Днепротранса, в качестве члена правительственной комиссии, в работе этой крупнейшей гзс.

В 1924 г. М. А. Шателен участвовал в работе Первой международной конференции по электропередаче при высоких напряжениях.

Особым этапом в жизни М. А. Шателена явилась многолетняя деятельность в Главной палате мер и весов. В 1926—1928 гг., совместно с П. М. Тиходеевым, им создан основной световой эталон СССР. С 1929 по 1933 г. М. А. Шателен занимал должность президента Главной палаты мер и весов. В этот период им была организована работа по переходу от международных электротехнических единиц к абсолютным.

В 1928—1934 гг. Михаилом Андреевичем была проведена совместно с академиком В. Ф. Миткевичем и др.

А. Толвинским, большая работа по редактированию и подготовке к изданию шеститомного справочника для электротехников — «СЭТ».

В 1931 г. М. А. Шателен был избран членом-корреспондентом АН СССР.

В 1936—1939 гг. бригадой энергетиков ОТН АН Р под руководством М. А. Шателена была проведена важная работа по вопросам электрификации транспорта. А. Шателен возглавляет в Академии наук работу Комиссии по светотехнике.

Следует отметить значительную работу М. А. Шателена в период отечественной войны в Узбекской ССР, когда он был направлен по решению Президиума АН СССР. Он развил большую плодотворную работу по помощи Узбекистану в налаживании работы оборонных предприятий, в развитии энергетики, в развертывании научных учреждений, высших технических учебных заведений и научно-инженерных обществ. Занимая пост заместителя по научной части, М. А. Шателен сделал много для развития Узбекского филиала АН СССР и из центров, в которых решались научно-технические и экономические проблемы Узбекистана. В дальнейшем М. А. Шателен занимал пост заместителя председателя научной части Узбекского филиала АН СССР. Под руководством М. А. Шателена было проведено рассмотрение проекта новой крупной Фархадской гидроэлектростанции и линий электропередачи. В Средне-Азиатском филиальном институте М. А. Шателен состоял профессором и заведующим кафедрой общей электротехники, при

которой им была организована новая учебная лаборатория.

В настоящее время М. А. Шателен возглавляет работу Ленинградской группы Энергетического института АН СССР; под его общим руководством проводятся работы, связанные с развитием энергетики Ленинграда и Северо-Западного района и с передачей энергии на большие расстояния постоянным и переменным токами.

Особо следует отметить замечательные работы М. А. Шателена, посвященные истории электротехники и выдающимся деятелям прошлого русской электротехники: В. В. Петрову, П. Н. Лодыгину, В. Н. Чиколеву, М. О. Доливо-Добровольскому, А. С. Попову и др. Труд М. А. Шателена «Русские электротехники второй половины XIX века» удостоен Сталинской премии.

М. А. Шателен многие годы ведет большую общественную работу в качестве председателя Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков (ВНИТОЭ), почетным председателем которого он является поныне. М. А. Шателен неоднократно избирался в Ленинградский городской Совет трудящихся.

Правительство высоко оценило заслуги М. А. Шателена. В 1936 г. он был награжден орденом Трудового Красного Знамени, а в 1945 г. и в 1946 г. двумя орденами Ленина и медалями.

Член-корр. АН СССР, проф. М. П. Костенко
Доктор техн. наук, проф. Л. Р. Нейман

Редакция журнала «Электричество» и Государственное энергетическое издательство горячо приветствуют старейшего русского электротехника Михаила Андреевича Шателена, — выдающегося деятеля журнала «Электричество», автора многочисленных научно-технических статей и замечательного труда по истории электротехники, удостоенного Сталинской премии, и желают ему многих лет доброго здоровья и плодотворной работы на благо любимой Родины.

**Г. Н. Петров, В. Ф. Миткевич, А. И. Берг, М. П. Костенко,
А. А. Глазунов, Ю. В. Буткевич, И. А. Сыромятников,
Н. А. Сазонов, Д. В. Калантаров, А. Д. Смирнов, Д. Д. Рейн,
И. И. Ратгауз, Б. М. Тареев, Б. А. Протопопов, К. П. Игошин,
М. Г. Башкова**



ОТ РЕДАКЦИИ

На расширенном совещании секции электротермии ВНИТОЭ (председатель секции — инж. Д. Б. Мондрус) состоялось обсуждение книги «Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников» и рецензии на эту книгу, составленной кандидатом техн. наук А. В. Донским (ППИ) и инж. А. А. Фрункимым («Севзаппромэлектротепло»). Редакцией получен от Президиума ВНИТОЭ материал обсуждения вместе с текстом указанной рецензии (печатается ниже).

Книга «Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников» рассматривалась по докладу доктора техн. наук, проф. Н. В. Александрова на совещании секции электротехники и радиотехники НТО ВЗЭИ (председатель секции — доктор техн. наук, проф. Б. М. Тареев) и получила благоприятную оценку. Кроме того редакцией получена рецензия кандидата техн. наук Г. Р. Рахимова (ЭНИН АН УзССР), в которой наряду с положительной оценкой книги высказывается пожелание о выпуске книги, посвященной той же теме, но более подробно освещающей теоретические вопросы, связанные с высокочастотным нагревом диэлектриков и полупроводников.

А. Н. МАЗНИН, А. В. НЕТУШИЛ и Е. П. ПАРИНИ. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ. Под общей редакцией А. В. Нетушила. 236 стр., ц. 13 руб. 75 коп. Госэнергоиздат, 1950.

Книга содержит 10 глав, приложение, указатель литературы и алфавитный указатель.

В ней дается изложение основных явлений, лежащих в основе высокочастотного нагрева диэлектриков и полупроводников. Приводятся элементарные сведения из теории ламповых генераторов высокочастотных колебаний. Рассматриваются схемы генераторов для электрического нагрева и приводится описание некоторых промышленных установок. Даются основные соотношения для расчета ламповых генераторов и указания по его эксплуатации. Книга рассчитана на техников-электриков и инженеров-технологов, мало знакомых с радиотехникой, но имеющих дело с высокочастотными установками для электрического нагрева.

Глава первая посвящена значению высокочастотного нагрева диэлектриков и полупроводников в промышленности. Излагается история вопроса, причем подчеркивается приоритет советских исследователей в области высокочастотного нагрева диэлектриков и диэлектриков. Указываются десятки отраслей народного хозяйства, где находит применение высокочастотный нагрев. Здесь же весьма кратко затрагиваются некоторые технологические особенности высокочастотного нагрева различных материалов (сушка древесины, предварительный разогрев пластмасс, высокочастотный нагрев в резиновой промышленности и др.).

В главе второй даются элементарные сведения из электростатики. Рассматривается электрическое поле плоского конденсатора. Даются определения емкости, напряженности, электрического поля, пробивной напряженности и энергии для воздушного конденсатора; приводятся зависимости между этими величинами. Рассматривается явление поляризации проводников, полупроводников и диэлектриков в электрическом поле. Даются понятия поляризуемых и полярных молекул в диэлектриках. Устанавливается зависимость между величиной поляризации и напряженностью электрического поля. Дается

понятие диэлектрической проницаемости. Приводятся формулы для расчета энергии и плотности энергии электрического поля в диэлектрике. Отмечается различие характера поляризации в диэлектрике и полупроводнике. Приводится картина распределения зарядов в полупроводнике в различные моменты его поляризации.

Глава третья посвящена вопросу нагрева материалов в переменном электрическом поле. Рассматриваются случаи выделения тепла в полупроводниках при протекании через них электрического тока и выделения тепла в проводниках, внесенных в переменное электрическое поле. Приводятся формулы для расчета электрической мощности, переходящей в материале в тепло; на примере показывается, что в проводниках, находящихся в переменном электрическом поле, в силу их весьма малого удельного сопротивления выделение тепла незначительно мало. Излагается картина передачи электрической энергии от источника к нагрузке и в связи с этим дается понятие поверхностного эффекта; приводятся зависимости глубины проникновения тока от удельного сопротивления и частоты.

Далее, в этой главе рассматривается выделение тепла в диэлектриках, находящихся в переменном электрическом поле. Весьма элементарно излагается теория диэлектрических потерь. Указывается, что основной причиной нагрева диэлектрика, находящегося в переменном электрическом поле, является трение полярных молекул одна о другую и о соседние неподвижные частицы. В качестве иллюстрации приводятся графические зависимости $\lg \delta$ частоты, температуры и влажности для различных диэлектриков.

В заключение в данной главе рассматривается выделение тепла в полупроводниках, помещенных в переменное электрическое поле. Поскольку полупроводники обладают свойствами как проводников, так и диэлектриков, то в них проявляются оба вида потерь энергии. В малых частотах полупроводники ведут себя подобно про-

и, а при больших наиболее сказываются их диэлектрические свойства. Вводится представление об эквивалентной электрической схеме полупроводника, исходя из которой даются формулы для расчета удельных активной и реактивной проводимости и сопротивления полупроводника (σ , b , g , r и x). В качестве иллюстраций приводятся расчеты ϵ , $\operatorname{tg} \delta$, g , b , r и x от частоты, влажности, температуры для некоторых полупроводников.

В главе четвертой рассматриваются случаи неравномерного нагрева материалов, при которых эта неравномерность устраняется. В качестве примера приводится распределение температуры и влажности в неоднородных образцах древесины при сушке. Пользуясь кривыми предыдущей главы, авторы показывают, что при поперечном чередовании слоев древесины с различной начальной влажностью большее количество тепла будет выделяться в слоях с влажностью 10%, чем в слоях с влажностью 5%, т. е. в более влажных, а при чередовании слоев с влажностью 15% и 40–50% сильнее будут нагреваться более сухие слои. Это объясняется тем, что при влажности кривая g для ели имеет максимум, и поэтому удельная мощность p пропорциональна g , то и в этой влажности максимальна.

Рассматривается нагрев при продольном расположении материала в электрическом поле. Показывается, что в этом случае удельная мощность пропорциональна удельной активной проводимости и сильнее нагреваются более влажные слои.

Указывается влияние воздушного зазора между материалом и электродом. Путем несложных математических выкладок авторы показывают, что наличие воздушного зазора приводит к неблагоприятным условиям нагрева древесины с влажностью более 15–20% (температура распределяется обратно пропорционально влажности). Поэтому при высокочастотной сушке древесины избегают воздушный зазор между древесиной и электродами.

Рассматривается нагрев анизотропных материалов. Приведены кривые удельной активной проводимости и реактивного сопротивления березы в различных направлениях анизотропии в зависимости от влажности. Дается картина неравномерного распределения температуры древесины при высокочастотном нагреве вследствие неоднородности ее строения.

Рассматривается выделение тепла в материалах, неравномерно заполняющих конденсатор. Иллюстрации показывают характер распределения температуры в телах различной конфигурации при помещении их в различной форме конденсаторах. Выясняется форма конденсатора, дающая равномерный нагрев.

Далее рассматриваются неравномерности нагрева, происходящие вследствие образования стоячих волн. Дается описание явления образования стоячих волн и указываются условия, при которых они появляются. Исходя из этого, авторы рекомендуют, чтобы расстояние между точкой присоединения питания и самой удаленной от этого точкой диэлектрика не превышало $1/20$ длины волны. В выполнении этого условия неравномерность электрического поля не превысит 5%. Приводятся схемы компенсации стоячих волн (путем параллельного питания нагрузки подключением настроенных индуктивностей) в тех случаях, когда по условиям технологии производства требуется высокая частота при нагреве диэлектриков больших размеров.

Заканчивается глава кратким описанием нагрева диэлектрика в полном резонансе, когда приводятся волны метрового и дециметрового диапазона.

Глава пятая рассматривает нагреваемый материал точки зрения нагрузки генератора. Даются формулы для расчета активного и реактивного сопротивления нагрузки в зависимости от удельных характеристик материала и характера заполнения конденсатора нагреваемым материалом. Указываются некоторые схемы компенсации изменения параметров нагрузки в процессе нагрева. Приводятся многочисленные схемы расположения электродов:

при склейке деталей разной формы, при нагреве пленок и нитей, при сушке тонких слоев материала, при оттаивании грунта, при ковевом нагреве материалов и др. Приводятся формулы для расчета теоретически необходимой энергии и мощности для различных случаев тепловой обработки. Даются графики для определения мощности нагрева, плавления и испарения различных материалов в зависимости от требуемой скорости процесса и веса материала. Приводятся формулы для расчета мощности, необходимой для возмещения тепловых потерь в окружающей среде; даются графики зависимости тепловых потерь (конвекционных и лучеиспусканием) от температуры поверхности материала.

В конце главы приводятся примеры расчета необходимой мощности с учетом тепловых потерь.

В главах шестой, седьмой и восьмой даются сведения из теории ламповых генераторов. Рассматриваются свободные колебания в идеальном и реальном контурах и способы получения затухающих и незатухающих высокочастотных колебаний (искровые, машинные и ламповые генераторы).

Даются сведения об устройстве, работе и параметрах электронных ламп. Описываются различные конструкции генераторных ламп (с воздушным и водяным охлаждением) и конструкция магнетрона, применяемого для генерирования колебаний с частотой выше 220 мГц.

Описывается работа генератора с независимым возбуждением в режиме колебаний первого и второго рода. Дается понятие напряженности режима работы генератора. Описываются схемы параллельного и последовательного анодного питания. Дается способ выбора генераторных ламп и технический расчет генератора.

Далее рассматривается работа генератора с самовозбуждением. Приводится условие самовозбуждения и различные схемы обратной связи. Описываются способы подачи отрицательного смещения на сетку лампы. Дается описание двухтактной схемы. Рассматриваются двухконтурные схемы генераторов. Даются различные схемы связи между контурами, понятие о вносимом сопротивлении. Приводятся резонансные кривые двух связанных контуров при различной величине коэффициента связи между контурами и описывается явление двувольности. Дается описание источников питания генераторов, в частности, описывается работа газотронного выпрямителя по схеме А. Н. Ларионова.

В заключение весьма кратко излагаются некоторые особенности работы генераторов на коротких и ультракоротких волнах.

Главы девятая и десятая посвящены промышленным установкам высокочастотного нагрева. Вначале излагаются особенности работы промышленных ламповых генераторов. Описываются способы согласования нагрузки и к. п. д. в генераторах с одноконтурной и двухконтурной схемой. Приводятся схемы автоматического согласования нагрузки и автоматической настройки в резонанс.

Далее приводятся схемы и описания промышленных ламповых генераторов, в частности:

1) схема высокочастотной установки для подогрева пресспорошков, разработанная ЦНИЛЭПС, — на двух лампах ГКЭ-1000 по двухтактной схеме; мощность до 1,5 кВт, частота 25–35 мГц; установка позволяет нагревать 100–120 г типового прессматериала до температуры 120–140°С в течение 30–40 сек;

2) схема и описание установки для сушки древесины, также разработанная ЦНИЛЭПС, — на двух лампах Г-454; колебательная мощность 50 кВт, частота 333; 476 и 666 кГц.

Последняя глава освещает вопрос о наладке и эксплуатации промышленных установок. Описываются операции, которые необходимо выполнить при наладке, опробовании и пуске установки; способы борьбы с паразитными колебаниями. Описываются приборы и способы измерений при наладке установки: измерения тока высокой частоты, напряжения высокой частоты, частоты высокочастотной мощности. Описываются способы борьбы с помехами радиоприему и приводятся нормы допустимых промышленных радиопомех для высокочастотных установок промышленного применения.

Заканчивается глава правилами обслуживания установок и техникой безопасности при их обслуживании.

Вступившие на совещании секции электротермии ВНИТОЭ не согласны с утверждением авторов книги о нежелательности введения воздушного зазора в рабочем конденсаторе при высоковольтной сушке древесины.

В приложении дается пример расчета лампового генератора для нагрева пресспорошка мощностью 1,6 кВт.

Рецензируемая книга, безусловно, представляет интерес, поскольку она является первой попыткой систематизировать теоретический и экспериментальный материал, накопленный к настоящему времени в области диэлектрического нагрева.

Опубликованные в прошлые годы брошюры и статьи по высокочастотному нагреву диэлектриков и полупроводников освещают в той или иной мере лишь отдельные частные стороны этого большого и сложного вопроса. В данной книге делается попытка обобщить имеющийся материал, главным образом материал, касающийся теории вопроса, разработка которой в настоящее время только начинается. Следует указать, однако, что, повидимому в силу ограниченного объема книги она охватывает лишь небольшую часть того материала (главным образом экспериментального), который в настоящее время накоплен работниками различных производственных предприятий и научно-исследовательских учреждений.

Тем не менее задача, поставленная авторами, — в возможно доступной форме изложить основные явления, лежащие в основе высокочастотного нагрева неметаллических материалов и дать представление о работе и простейшем расчете ламповых генераторов высокочастотных колебаний, в значительной степени ими решена.

Вызывает сомнение доступность изложения глав второй, третьей, и четвертой, в которых освещаются явления, лежащие в основе диэлектрического нагрева. Здесь изложение носит несколько схематический и формально-математический характер. Стремясь более элементарно изложить эти явления, авторы весьма сильно упростили их физическую сущность.

Хотя в предисловии и указывается, что технологическим особенностям производства и технико-экономическим показателям высокочастотного нагрева авторы предпола-

гают посвятить специальную работу, однако экономическую сторону высокочастотного нагрева следовало бы в этой книге уделить определенное внимание. В настоящее время наблюдается чрезмерное увлечение диэлектрическим нагревом, и зачастую затрачиваются большие средства исследования там, где это явно бесперспективно. По весьма необходимо было в книге (поскольку она в достаточном большом тираже и, несомненно, найдут широкий круг читателей) объективно оценить различные стороны технологии с применением высокочастотного нагрева с точки зрения технико-экономических показателей.

Описывая генераторы с одноконтурной схемой, авторы утверждают (стр. 182), что общий к. п. д. установок может достигать 60—70%. Такие цифры могут вызвать заблуждение читателей, создав у них ложное представление об истинном к. п. д. установок. В действительности к. п. д. промышленных установок в настоящее время достигает 35—40%. Здесь авторы не учитывают тепловые потери с нагреваемого материала и явно занизили к. п. д. в цепях накала и сетки и в выпрямителе.

При описании схем промышленных ламповых генераторов авторы ограничились разбором установок, разработанных ЦНИЛЭПС, не указав, освоены ли они в производстве.

И вместе с тем, авторы не привели описания установок серийного производства установок ЛГ-3 и ЛГ-4 и выпускаемых в настоящее время заводом им. Ворова установок для сушки древесины типа ГС-48. Сравнение с этими установками было бы, конечно, полезно для читателей.

В заключение необходимо признать, что, несмотря на отмеченные выше недостатки, книга безусловно является полезной не только для лиц, на которых она рассчитана, но и для занимающихся проектированием, конструированием и исследованиями в области диэлектрического нагрева. Издание ее вполне своевременно.

И. И. ГРОДНЕВ и Б. Ф. МИЛЛЕР. КАБЕЛИ СВЯЗИ. Допущено Управлением учебных заведений МЭП СССР в качестве учебного пособия для электромеханических техникумов. 480 стр., 15 руб. 65 коп. Госэнергоиздат, 1950.

Современное развитие техники проводной связи осуществляется на основе калибрования с применением все более широкого ассортимента кабельных изделий.

В книге И. И. Гроднева и Б. Ф. Миллера рассматриваются основы теории кабелей связи, принципы их электрического расчета и конструирования, а также вопросы технологии производства симметричных и коаксиальных кабелей связи. Особое внимание уделяется теории влияния в кабельных цепях, конструированию коаксиальных кабелей и экранированию — вопросам, сравнительно мало освещенным в существующей литературе.

Рецензируемое пособие удачно дополняет недавно изданную Связиздатом книгу В. Н. Кулешова «Теория кабелей связи». Если В. Н. Кулешов для анализа явлений, происходящих в кабеле, прибегает к сложным математическим выкладкам, то И. И. Гроднев и Б. Ф. Миллер дают обширный экспериментальный материал, богато иллюстрированный графиками. Благодаря этому, не снижая научно-технического уровня книги, авторам удалось изложить сложные вопросы высокочастотной кабельной техники вполне доступным для широкого круга читателей языком. Объясняя физическую сущность электромагнитных процессов в кабелях связи, авторы производят их количественную оценку элементарными математическими средствами.

Книга содержит большое количество практических данных о современных кабелях связи, что делает ее полезной для проектировщиков и эксплуатационного персонала кабельных магистралей.

Глава I посвящена назначению и классификации кабелей связи. Там же дается краткий обзор истории развития кабельной техники и отмечается приоритет отечественной науки в этой области.

Глава II, излагающая основы теории кабелей связи, отличается популярностью и ясностью подачи материала широко иллюстрированного полезными графиками.

Главы III, IV, и V посвящены электрическому расчету и конструированию кабелей: симметричных, с повышенной индуктивностью и коаксиальных. Материал изложен с достаточной полнотой, причем особенно подробно авторы остановились на современных конструкциях коаксиальных кабелей.

В формулы для расчета параметров цепи (3-4), (3-10) не введен коэффициент спиральности, хотя, как можно видеть из табл. 3-28, авторами он использован. В табл. от 4-2 до 4-5 приведены данные устаревших типов кабелей. Формулы для расчета кабелей с биметаллическими жилами и с магнитодиэлектриками (стр. 155) даны в форме, не пригодной для практического применения. В формуле (5-36) на стр. 196 следовало дать коэффициент 10^{-3} , а не 10^{-4} .

В разделе 5-12 для определения неоднородности в коаксиальных кабелях использован не совсем удачный метод (с применением «корреляционного расстояния»).

Главы VI и VII посвящены вопросам влияния в цепи от помех в симметричных и коаксиальных цепях; эти вопросы изложены с большой полнотой и держат много свежего материала. К недостаткам: глава следует отнести некоторую схематичность разд. 6-11, недостаточное внимание к симметрированию высокочастотных цепей, а также не совсем ясное изложение (в разделе 7-4) вопроса о том, почему в коаксиальных цепях, «третьи цепи» являются экранирующим фактором в обычных цепях — источником помех.

В главе VIII, излагающей вопросы экранирования

приведены некоторые данные оригинальных исследований авторов.

Книга заканчивается главами IX и X, освещающими материалы и технологии производства кабелей. В главе IX недостаточно освещены частотные и температурные характеристики электроизоляционных материалов, имеющие чрезвычайно большое значение для современного кабелестроения. Глава X отличается изысканностью и чисто обзорным изложением технологии производства.

Вопросы технологии занимают мало места в книге и далеко не исчерпывают основных аспектов современной технологии производства кабелей. Кроме того, в ряде случаев приводится устаревшее оборудование, совершенно обойден вопросы выбора

оборудования и технологических режимов, слабо освещена технология высокочастотных кабелей.

Общим недостатком книги является отсутствие надлежащего технико-экономического анализа различных кабельных систем, что следует учесть при ее переиздании.

Однако и при наличии отмеченных недостатков рецензируемая книга является ценным и своевременным вкладом в отечественную литературу по кабелестроению и, несомненно, будет весьма полезным пособием как для студентов техникумов и вузов, так и для инженерно-технических работников.

**Инж. Э. Ф. УКСТИН, инж. К. А. ЛЮБИМОВ,
инж. Н. И. ВЕНЧУГОВ**
Государственный научно-исследовательский институт кабельной промышленности

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1950 г.)

**ЛЕКСАНДРОВ Н. В., МАГИДСОН А. О., ПРИВЕЗЕН-
В. А., ТАРЕЕВ Б. М.** Аннотированный указатель книг по электроизоляционной и кабельной технике. Под ред. Б. М. Тарева. Спб. беспл. Всесоюзный заочный энергетический институт, кафедра электроизоляционных и кабельной техники.

Ассортиментная выставка отечественного приборостроения. Каталог-справочник лабораторных приборов и оборудования. Вып. 23. Меры защиты для измерения сопротивлений, емкостей и индуктивностей. 83 стр., ц. 14 руб. Машгиз.

ГОРЕВ А. А. Переходные процессы синхронной машины. Спб. стр. 33 руб. 60 коп. Госэнергоиздат.

ГОРЕЛИК Г. С. Колебания и волны. 552 стр., ц. 33 руб. 60 коп. Госэнергоиздат.

Колебательные и волновые процессы, встречающиеся в различных областях физики, подчиняются во многом одним и тем же принципам. При изучении колебаний, характеризующих качественно отнюдь не формы движения материи (звук, свет, механические, электрические явления), обнаруживается сходство, а в некоторых случаях и общность закономерностей, присущих этим колебаниям. Исходя из этого, автор попытается выделить в самостоятельный раздел физики учение о колебаниях и волнах, посвящая отдельную свою книгу. В предисловии он указывает, что единый подход к различным по природе колебаниям играет все большую роль при разрешении ряда научно-технических задач. С этой точки зрения рассматриваются вопросы суперпозиции колебаний, линейные и нелинейные колебательные системы, понятие волны, электромагнитные волны, сложные излучатели, явление дифракции, статистические явления (исследование отклонений от синусоидальности), спектральный анализ. Говоря в последней главе о спектральном анализе, автор исследования, автор признает, что классическая теория колебаний и волн, принятая в книге, бессильна объяснить процессы, происходящие, законы которого в корне отличны от законов классической физики. В связи с этим остается выразить сожаление, что в этой обильной книге соответствующим элементам атомной физики не было уделено надлежащего места. Этот недостаток не исчерпывает, конечно, замечания автора на последней странице, что для перехода к изучению квантовой физики (физики элементарных частиц) было необходимо предварительное усвоение классической теории колебаний и волн, наблюдаемых в макром мире. Построение автором самостоятельного учения о колебаниях и волнах должно было быть завершено достаточно обстоятельными исследованиями закономерностей, наблюдаемых в колебательных явлениях на атомном уровне.

ЗЫБЦОВ Л. Н. Электрическая и ионная эмиссия (Серия «Проблемы физики» под общей редакцией С. И. Вавилова, А. Ф. Иоффе, П. И. ЛУКЕРСКОГО, В. А. ФОКА, Л. Н. ФРЕНКЕЛИ). 275 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Гос. изд-во технико-экономической литературы.

НЕЙМАН С. Научные основы вакуумной техники. Перевод с английского П. Г. ГРИГОРЬЕВА и А. Б. ДРАНИНА под ред. Б. П. Беринга. Спб. стр. 48 руб. 30 коп. Гос. изд-во иностранной литературы. Конденсаторы и сопротивления. Каталог (Министерство промышленности средств связи СССР). 66 стр., ц. 15 руб. Бюро технической информации МПС, 1950.

Каталог содержит описания, технические характеристики, размеры, фотографии и другие данные для выпускаемых предприятиями МПС, конденсаторов: бумажных (типы КБ, КБГ, КБП, КБГ, КБГ и КБМ), слюдяных (КСО, КСГ, КБ, КВ и КР), керамических (КТК, КДК, КГК, КПК, КВГК, КВКЦ, КВКТ и КВК), а также непроволочных сопротивлений (постоянных — типа В и ТО и переменных — Омга, ВК и ТК) и трубчатых проволочных эмиссионных сопротивлений.

ЛУКИН Ф. В. Переходные процессы в линейных элементах электрических устройств. 140 стр., ц. 10 руб. Оборонгиз.

ХАНСУРОВ Н. Н., ПОПОВ В. С. Теоретическая электротехника. Издание третье, исправленное и дополненное. Допущено

Управлением учебными заведениями МЭП СССР в качестве учебника для техникумов электротехнических специальностей. 488 стр., ц. 16 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

Предыдущее 2-е издание этой книги получило в целом положительную оценку (см. Электричество, № 11, 1950 г., стр. 94—95). Значительное число замечаний по поводу недостатков, обнаруженных во 2-м издании, в новом 3-м издании учтено, и авторы внесли в текст соответствующие исправления. Кроме того, новое издание отличается от предыдущих дополнительными разделами, посвященными теории четырехполосника, характеристике постоянных магнитов и др. Насыщенность книги примерами, числовыми пояснениями решений и иллюстрациями значительно облегчает усвоение содержащихся в книге методов электротехнических расчетов.

НЕЙМАН Л. Р. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для высших учебных заведений. 191 стр., ц. 7 руб. Госэнергоиздат.

Книга представляет вторую часть учебного пособия, составленного П. Л. Калантаровым и Л. Р. Нейманом под общим названием «Руководство к лаборатории теоретической электротехники». Первая часть (автор — П. Л. Калантаров) посвящена лаборатории переменных токов. Руководство имеет целью содействовать сознательному и квалифицированному участию студентов старших курсов высшей электротехнической школы в лабораторных занятиях по изучению электромагнитных полей и явлений, с ними связанных. Повысить подготовку студента к лабораторной работе, дать ему правильное направление в выполнении эксперимента, а затем при анализе результатов, — такова задача данного пособия. Ценный педагогический опыт и высокая научная база, на которых основан материал книги, делают ее исключительно полезной также для организаторов и руководителей лабораторной практики вузов по курсу «Теоретические основы электротехники».

ОСНИПОВ К. Д. Электронно-лучевой осциллограф. 64 стр., ц. 2 руб. Госэнергоиздат.

Выпуск популярной и вместе с тем достаточно насыщенной основными техническими данными брошюры об устройстве и применении электронно-лучевого осциллографа следует приветствовать. Брошюра отличается компактностью собранного в ней материала, имеющего строго практическое направление, вследствие чего ее можно рекомендовать не только в качестве пособия для радиолюбителей, но также инженерам и техникам, желающим пользоваться в своей работе таким универсальным и незаменимым измерительным прибором, каковым является в настоящее время электронно-лучевой осциллограф. После изложения элементов схемы и конструкции автор сообщает общие сведения и указания по эксплуатации этого прибора и затем поясняет применение осциллографа в качестве вольтметра постоянного и переменного тока, амперметра, ваттметра, для определения фазового угла, сравнения двух частот, измерения глубины модуляции, наблюдения резонансных характеристик и пр.

Правила технической эксплуатации сельских электроустановок (МСХ СССР. Главсельэлектро). 152 стр., ц. 3 руб. 40 коп. Сельхозгиз.

Сборник, посвященный семидесятилетию академика А. Ф. Иоффе (Академия наук СССР). 557 стр., ц. 40 руб. Изд-во Академии наук СССР.

СКАНАВИ М. И., РЫЖКОВ В. В., СУЛЕЙМАНОВА Х. Л., ЦАФ Л. Я. Элементы операционного исчисления (Конспект практических занятий, в. III). 25 стр., беспл. Всесоюзный заочный энергетический институт.

Справочник по радиотехнике. Под общей редакцией Б. А. СМЕРДИНА. 784 стр., ц. 109 руб. Госэнергоиздат.

Потребность в таком радиотехническом справочнике давно назрела. Государственное энергетическое издательство правильно поступило в выборе основного материала для этого справочника, не

откладывая выпуск такого пособия до создания в будущем аналогичной книги силами другого авторского коллектива. Справочник представляет научное энциклопедическое пособие. Он содержит не только обзорные основные достижения радиотехники и систематизированный свод формул, диаграмм и расчетно-справочных таблиц, но также и все важнейшие научные положения современной радиотехники, освещающей физическую сущность рассматриваемых явлений и помещая в соответствующих случаях математическую сторону вопроса. Назначение книги — облегчить творческую работу широкому кругу инженерно-технических работников в области радиотехнических исследований, конструкторских и технологических разработок. Особенно ценным является снабжение каждой главы справочника обширной библиографической справкой, в которой наряду с иностранной литературой советским авторам заслуженно отведено наибольшее место. Содержание книги охватывает элементы и теорию радиоприемных, электровакуумных приборов, усилители, генераторы, вопросы модуляции и демодуляции, источники питания, радиопередающие и радиоприемные устройства, антенны, теорию распространения радиоволн, измерительную технику, основные математические формулы и др.

ТАРЕЕВ Б. М. Лекции по курсу «Электро материаловедение». Выпуск II — Электрические свойства диэлектриков (Диэлектрическая проницаемость. Угол диэлектрических потерь). 45 стр., беспл. Весоиздательский энергетический институт.

ПАТЕЛЕН М. А. Русские электротехники второй половины XIX века. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. 384 стр., ц. 12 руб. Госэнергоиздат.

Автор, старейший в наше время русский ученый-электротехник, в своем замечательном историческом труде знакомит читателей с эпохой зарождения и развития в России электротехники и освещает славу деятельности первых русских электротехников, внесших крупный и ценный вклад в развитие мировой электротехники. Многие события, о которых сообщается в книге, известны автору, как их очевидцу и участнику. Многих из упоминаемых им выдающихся деятелей отечественной науки и техники автор знал лично. Тираж этой книги, изданной в 1949 г. и удостоенной Сталинской премии, как можно было ожидать, быстро разошелся и в конце 1950 г. выпущено настоящее издание, частично дополненное и переработанное. Следует отметить, что полиграфическое выполнение большинства иллюстраций, а также портретов выдающихся русских электротехников осталось, к сожалению, и в новом издании на весьма низком уровне (Рецензия на издание 1949 г. см. Электричество, № 5, 1949 г.).

ПЕКУРИН Г. П. Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам. 511 стр., 3 вклейки, ц. 16 руб. Военно-морское издательство.

Книга содержит описание 125 типов электроизмерительных приборов и 25 типов радиоизмерительных приборов, производимых в настоящее время в Советском Союзе и находящихся особенно широкое применение в лабораторной практике, на электрических станциях и подстанциях, в радиоустановках и пр. Вступительные главы первой части книги («Электроизмерительные приборы») посвящены вопросам теории измерений, системам единиц электрических величин и классификации электроизмерительных приборов. Описания в первой части книги приборы распределены по системам измерения: электромагнитные, электродинамические и пр. В начале главы, посвященной приборам каждой системы, излагаются общие сведения, характерные для приборов данной системы. Даны технические характеристики приборов, ссылки на стандарты или технические условия, схемы соединений, области применения, приемы работы с приборами, отпускные цены приборов. Каждому прибору дано его изображение (внешний вид), а для некоторых приборов также и габаритно-установочные чертежи. Вторая часть заканчивается описанием вспомогательных измерительных приборов: шунтов, добавочных сопротивлений и измерительных трансформаторов. Аналогично, но более кратко изложена вторая часть книги («Радиоизмерительные приборы»). В приложении к книге текст ГОСТ 1845-42 («Приборы электроизмерительные»), а также краткий библиографический указатель. «Справочник» предназначен для широкого круга инженерно-технических работников, имеющих дело с электрическими измерениями, и помогает выбрать прибор для той или иной конкретной цели приборы и правила пользования ими.

ШТРАУФ Е. А. Электричество и магнетизм. 588 стр., ц. 11 руб. 85 коп. Гос. изд-во технико-теоретической литературы.

Элементы радиотехники. Под редакцией А. М. БРОЙДЕ. Издано отделом учебных заведений МПС СССР в качестве учебного пособия для техникумов. 416 стр., ц. 14 руб. 25 коп. Гос. изд-во.

Читателям, ограничивающим свой интерес к элементам техники их практической стороной и не имеющим целью изучить физическую сторону явлений, с которыми связаны элементы радиотехники, можно рекомендовать эту книгу, представляющую полное и переработанное издание перевода книги Б. (1948 г.). Книга содержит свыше 400 задач практического характера. Следует отметить хорошо написанное «Введение», в котором кратко, но доведенный до последнего времени обзор основных понятий развития в нашей стране радиотехники. После изложения основных сведений из теории постоянного и переменного токов о радиации и распространении радиоволн рассматриваются лампы, использование их в усилительных, генераторных и специальных схемах. Отдельные главы посвящены радиоприемным, радиолокационным, передающим и приемным устройствам.

