

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, ве-
дущих работу в различных областях
электротехники.

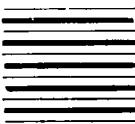
Журнал широко освещает основные
теоретические и практические вопросы,
связанные с развитием электротехники
и электрификации народного хозяйства СССР.

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

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

1951

госэнергоиздат



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-да 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

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 двухмерных 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. Карапеева „О классификации методов электрических измерений“ и Е. Г. Шрамкова „О классификации электроизмерительных приборов“ А. Д. Нестеренко, А. П. Козлова, А. П. Катецкая	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
Живые 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. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-
зунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенин**, 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 Электротехнико
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 группы переходных явлений в трехфазной системе, вызванных включением и выключением однополюсного выключателя, а также возникновением и ликвидацией положений, можно использовать метод симметричных составляющих. В 1940 г. был использован этот метод для аналитического определения восстановливающегося 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 расчетах короткого замыкания, еще следующие: 1) начальные заряды на конденсаторах отсутствуют; 2) постоянная составляющая тока короткого замыкания и затухание периодической составляющей отсутствуют.

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

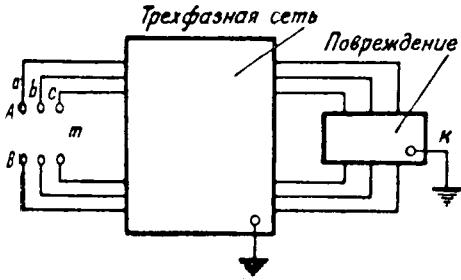


Рис. 1.

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:

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

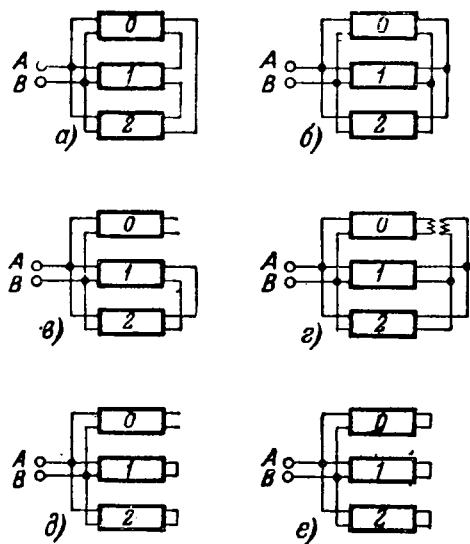


Рис. 2.

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. Заменив в выражениях Y_{ABA} и Z_{ABA} на оператор p , можно найти $Y_{ABA}(p)$ и $Z_{ABA}(p)$.

Ток переходного процесса при включении однополюсного выключателя в точке m определяется 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 последовательности 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 схемы a .

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

$$Y_\Delta = 0.$$

Схема f — для случая замыкания проводов фаз 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 a 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 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 замением 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 с серийными повреждениями соответственно точках m и n (рис. 3).

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

Токи на участке m :

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

на участке k :

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

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

Совместное решение этих уравнений дает возможность найти зависимость $I^m = \dot{E}_{AB} \cdot Y_{AB}$, где Y_{AB} выражается комбинацией проводимостей разных последовательностей. Заменив в выражении проводимости j_{a0} на p , можно найти p и $Z_{AB}(p)$.

Рассмотрим случай выключения однополюсного выключателя при разрыве одного провода шунтовом повреждении. Переходная проводимость или переходное сопротивление определяется, как и в предыдущем случае. Предварительный режим в данном случае будет режимом серийного повреждения в точке n и шунтами 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 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: 1) уравнений (5) и (6); 2) уравнений короткого замыкания в точке k :

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

3) уравнений последовательного повреждения фазы a в точке n :

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

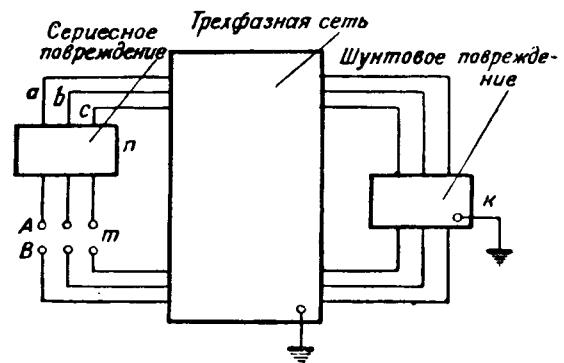


Рис. 3.

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

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

Проводимость для этого случая будет

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

А и В определяются из соотношений:

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

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

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

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 серийных или одно шунтовое и одно серийное) необходимо предварительно определить E_{AB} и I_a из установившегося режима. Для определения этих величин пользуются обычными приемами метода симметричных составляющих.

Переходная проводимость при двух повреждениях может быть определена на основании решения нижеследующих 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 определяется из соотношения $\dot{U}_{a0}^k = A \cdot \frac{1}{3} \dot{E}_{ABA}$:

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

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

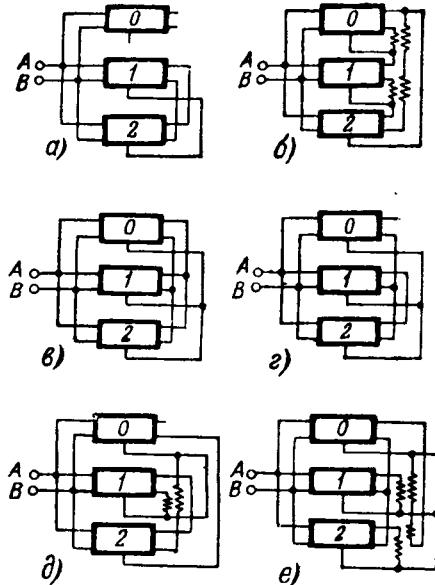


Рис. 4.

разрыв однополюсным выключателем проводов фазы a в точке m . Схемы соответствуют следующим случаям: а) замыкание проводов b и c в точках r и k ; б) замыкание проводов фазы a на землю в точках r и k ; в) замыкание проводов b и c на землю в точках r и k ; г) замыкание проводов фаз b и c в точке r и разрыв проводов фаз b и c на землю в точке k ; д) замыкание проводов фаз b и c в точке r и разрыв 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 восстановившееся напряжение свободной частоты на зажимах A и B однополюсного выключателя, установленного в точке m фазы a , как показано на рис. 5.

Пользуясь приведенными схемами, находим

$$Z_{AB0}^k = Z_{AB0}^m = \frac{1}{Y_{AB0}^k} = \frac{1}{Y_{AB0}^m} = \frac{pL_0}{1 + p^2L_0c_1},$$

$$Z_1^m = \frac{1}{Y_1^m} = \frac{pL_1}{1 + p^2L_1c_1},$$

$$Z_0^m = \frac{1}{Y_0^m} = \frac{pL_0}{1 + p^2L_0c_1}.$$

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

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

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

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

Далее, пользуясь обычной схемой соединения цепей последовательностей для данного типа проктого замыкания, определим эффективное значение установившегося тока замыкания на землю, 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

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

тогда

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

Последовательно, операторное выражение восстанавливающегося напряжения на контактах $A - B$ может иметь вид:

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

В случае, если бы для приведенной схемы необходимо определить переходный ток 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 (сечевое повреждение), пользуясь методом симметричных составляющих. Мгновенное значение ток i_a^m может быть определено из соотношения

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

где

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

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

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

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

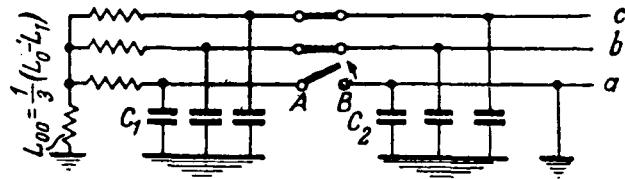


Рис. 5.

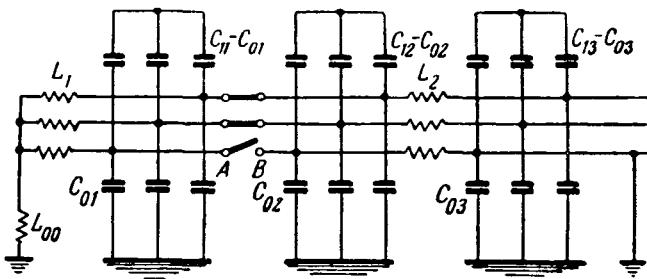


Рис. 6.

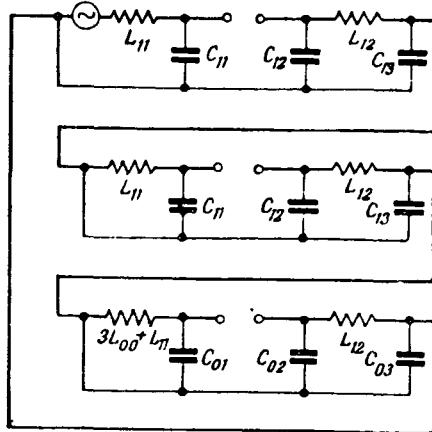


Рис. 7.

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 со-противлением (рис. 8). На шине не ограниченной мощности генераторного напряжения присоединены трансформаторы общее индуктивное со-противление которых $L_1 = 0,0319 \text{ гн}$. К шинам 110 кв присоединена линия передачи с волновым сопротивлением $Z = 500 \text{ ом}$. Емкость шин втулок и обмоток 110 кв $c_1 = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ ф}$. 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).

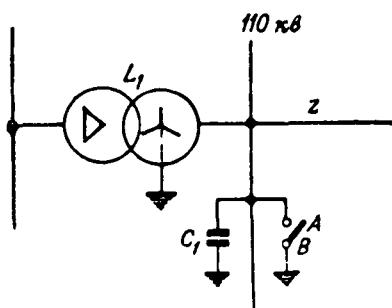


Рис. 8.

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:

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

Тогда

$$v(p) = Z(p) \cdot i(p) = E_m \frac{1}{L_1 C_1 \left(p^2 + \frac{p}{Z C_1} + \frac{1}{L_1 C_1} \right)}.$$

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,

$$A_1 = \frac{1}{L_1 C_1 \left(2p_1^2 + \frac{p_1}{Z C_1} \right)} \quad \text{и} \quad A_2 = \frac{1}{L_1 C_1 \left(2p_2^2 + \frac{p_2}{Z C_1} \right)}.$$

После подстановки числовых значений величин получим:

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

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:

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

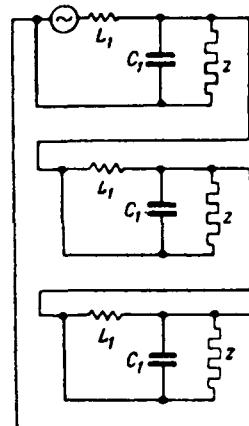


Рис. 9.

Следует отметить, что при расчете переходных процессов при включении и выключении цепях генераторного напряжения, содержащих синхронные генераторы, необходимо более точно учитывать электромагнитные процессы, проходящие в машинах, и распределенный характер параметров обмоток машин. Весьма сложен 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 одних 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. № 1940.
2. Н. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания соковольтных систем. ОНТИ, 1935.
3. В. В. Гусев. Методика расчетов коммутационных переходных процессов в трехфазных сетях. ОНТИ, 1947.
4. W. L. Yoon. Applications of the Method of Symmetric Components. Mc Gray Hill Book, 1937.



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 наименее потребляемой мощности и числа севых 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 проводящих жил кабелей и проводов воздушной сети. 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,

$$s_1 = \frac{\frac{P_m \cdot l}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 10^5}{\gamma \cdot U^2 \cdot \Delta U \%}, \quad (1)$$

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 предлагаются 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

$$s_2 = 0,00082 \cdot l^2 = \\ 0,00082 \cdot P_m^2 \cdot 10^6 \\ = \frac{3U^2}{3U^2}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) P_m — 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

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

откуда

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

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 сечение 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 сечений 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], восстановливающее аргументацию В. М. Хрущева в пользу напряжения 220/127 в. Как известно, все авторы 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 тоже 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 при проектировании новых электросетей. Электротрение жилых квартир при отсутствии бытовой газификации обусловлено главным образом (на 40—60%) нагревательными приборами, а не освещением. Внедрение же люминесцентных ламп еще более снижает расход электроэнергии и освещение. Мощность, потребляемая учреждениями, учебными и лечебными заведениями, торговыми и здравицкими предприятиями, установки 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:

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{S_1 D U^2 n_2^2}{2200 \cdot S_2}}, \quad (4)$$

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 kvt/m 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 $S_1 \approx 30000$ руб., $S_2 = 0,37$, n_2 может быть принято

равным 2, тогда $\frac{S_1 n_2^2}{S_2} = 325000$. Для малых го-

родов и малооживленных районов больших городов S_1 составляет 8000—10000 руб. В этом случае сеть низкого напряжения выполняется воздушной, т. е. $S_2 = 0,23$, а n_2 может быть

принято равным 3; тогда $\frac{S_1 n_2^2}{S_2} = \frac{9000 \cdot 3^2}{0,23} = 352000$.

Как обе эти величины находятся под знаком квадрата третьей степени, разница в конечных результатах почти отсутствует. Таким образом, определения наивыгоднейшей нагрузки сетевого трансформаторного пункта городской электросети 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.

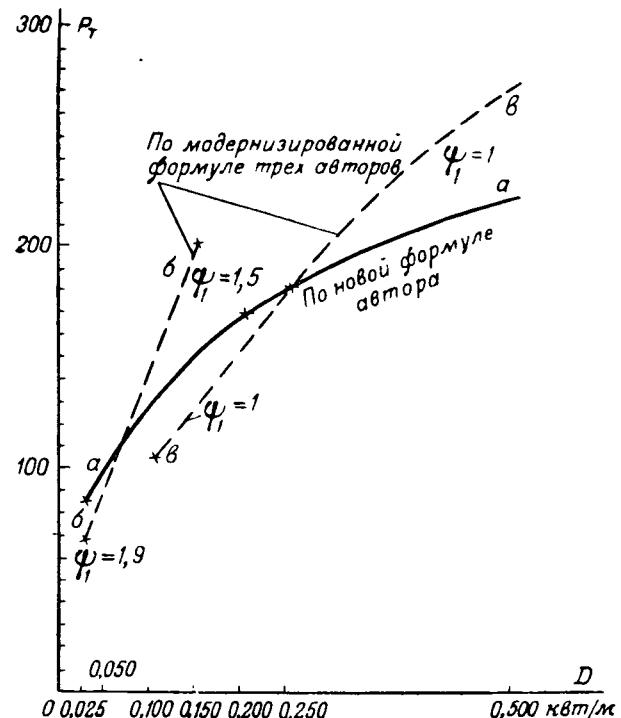


Рис. 1.

Как видно из сравнения результатов расчета, при погонных плотностях нагрузки от 0,200 kvt/m 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 kvt/m значения P_m , определенные по обеим формулам, почти совпадают. При погонной плотности нагрузки, меньшей 0,200 kvt/m , значения P_m , определенные по формуле (5), лежат между двумя значениями P_m , определенными по формуле трех авторов при $\phi = 1$ и при $\phi = 1,5$. 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 bb , а при других — на кривой vv . В этом диапазоне значений D наивыгоднейшую нагрузку трансформаторного пункта правильнее выбирать по формуле трех авторов. При значениях D , меньших 0,100 kvt/m , 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

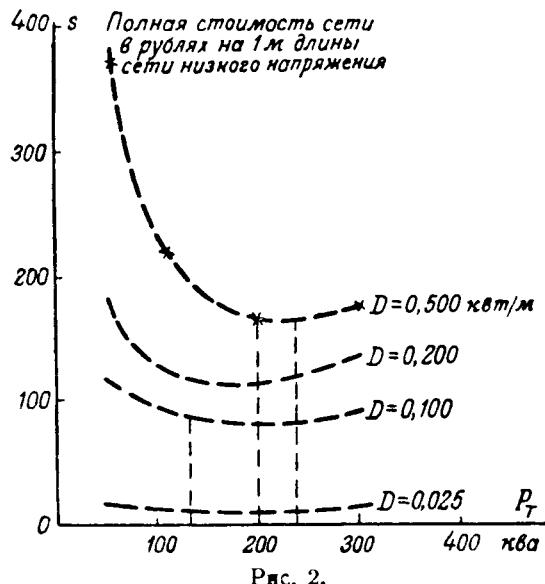


Рис. 2.

большему 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 эксплоатации 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 эксплоатации этого участка показывает, что чем больше число кабелей 6 кв, питающих замкнутую сеть, чем 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

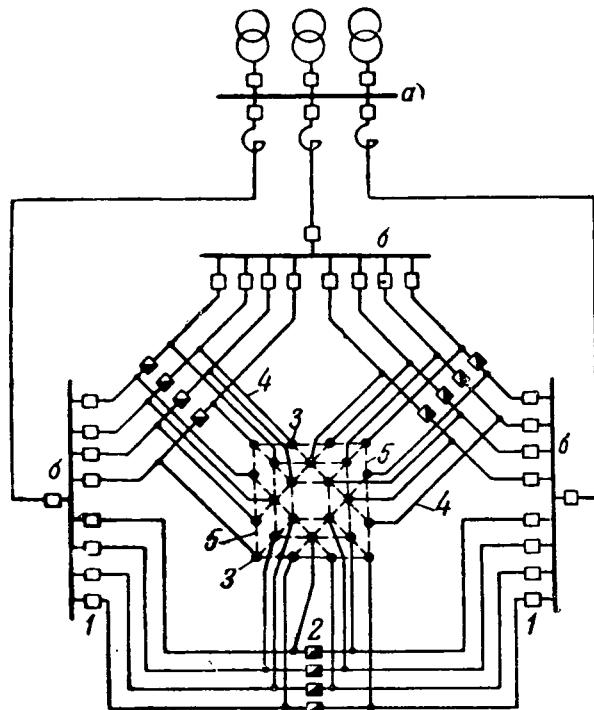


Рис. 3. Рациональная схема построения городской электрической сети.

(Заводка кабелей 6 или 10 кв в трансформаторные пункты условно кванза 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 $\frac{2}{3}$, резервных линий не требуется. В случае повреждения какой-либо из питающих линий нагрузка переходит на две другие через распределительную сеть среднего напряжения и замкнутую сеть низкого напряжения. Величина тока короткого замыкания на шинах распределительных пунктов b 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 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 защищенной сетью низкого напряжения плавкими предохранителями, вставки которых должны создавать замкнутую селективную систему.

2. Расчет сечения проводов современной сети низкого напряжения с двусторонним питанием сети 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÷0,20 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 схем 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. Шеглов. 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 выше начальной точки 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 рабочие 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, управляемые 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. Каноныкиным [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 обусловливает 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 равностороннего 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 подсоленная 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:

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

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 подтвержден.

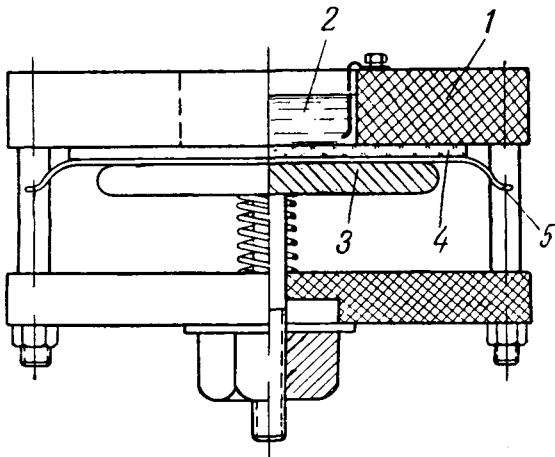


Рис. 1.

1 — текстолит; 2 — подсоленная 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, прилегающего к отверстию.

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	Проводимость, доля единицы, часы
	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	74
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	68

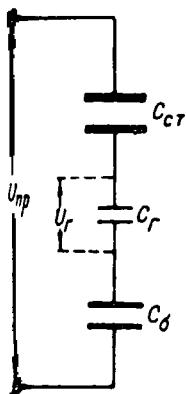


Рис. 2. Схема замещения отверстия, заключенного между электродами.

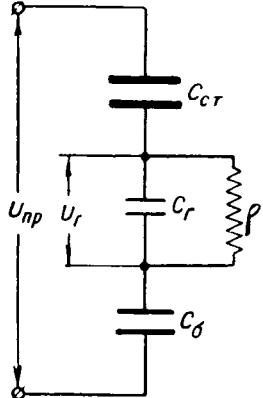


Рис. 3. Схема замещения шунтированной газовой пленки.

полненных в виде тонких ножей, укрепленных текстолитовых изоляторах. Сопротивление периметра отверстия в бумажке изменилось 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 зачесаны.

Данные, полученные в результате измерения сопротивлений (табл. 2), свидетельствуют о закономерном уменьшении сопротивления изоляции поверхности, охватывающей газовый промежуток. Газовые пленки как бы шунтируются понижением сопротивлением изоляции поверхностей. Это 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 взяты образцы с отверстиями диаметром 26 мм и образцы с отверстиями диаметром 6 мм. По методике выше образцы подвергались действию 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

$$\bar{U}_z = U_{np} \frac{Z_z}{Z_{общ}}, \quad (2)$$

где

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

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

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, ϵ_{cm} и ϵ_b получены из опыта, $C_b = 0,37 \cdot 10^{-11}$ ф, $C_{cm} = 0,19 \cdot 10^{-11}$ 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 $E_z = 8,5 \text{ кВ/мм}$. Начальный градиент

Таблица 2

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			до опыта	после опыта
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	до опыта	после опыта
1·10 ⁵	2·10 ⁵	1·10 ⁵	1,3·10 ²	1,5·10 ²	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	1·10 ⁵	1·10 ⁵	1·10 ⁵	0,5·10 ³	1·10 ³	1·10 ³	2,15	2,9
0,6·10 ⁵	0,6·10 ⁵	0,6·10 ⁵	4·10 ²	7·10 ²	5·10 ²	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	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 ²	1,2·10 ²	0,5·10 ⁵	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 $E_i = 6,6 \text{ кВ/мм}$. 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 замедненного перемещения пропиточной массы вдоль слоя 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 втягивается в пространство газовой прослойки, размеры прослойки уменьшаются и градиент ионизации увеличивается.

Литература

1. Шанклин. El. Eng., V. 58, июль 1939.
2. Б. Н. Каноникин. 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 накаленным 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 используются

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

¹ Деложено на секции радиометров 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, 1945. 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, XVII, вып. 7, 809, 1947.

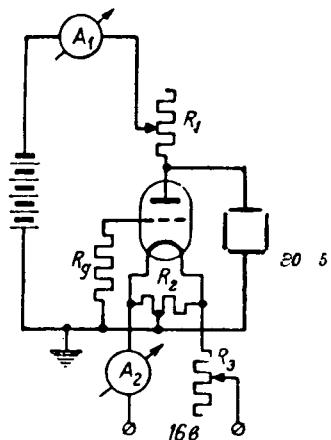


Рис. 1.

ных экспериментальных трубок, имеющих общего с газоразрядными приборами про-ленного типа (газотроны, игнитроны, ти-роны, мощные ртутные выпрямители). Вопрос обзаниях в газоразрядных приборах освещен тературе недостаточно.

Наблюдения в тиаратронах и газотронах. Изучение колебаний в тиаратронах и газотронах отсутствовало на установке, схема которой представлена на рис. 1. Для накала использовался постоянный ток. Переменный ток накала имеет сильную модуляцию изучаемых колебаний. Питание анода осуществлялось от аккумуляторной батареи 114 в. При изучении колебаний в тиаратронах сетка соединялась с землей с сопротивлением $R_g = 10^4$ ом. Это необходимо было при зажигании тиаратрона. После зажигания сетка может быть отсоединенна. Изучение падения напряжения на тиаратроне или газотроне производилось с помощью высоковольтметра. Частоты и амплитуды колебаний измерялись электронным осциллографом с отградуированным при различных значениях усиления и синхронизацией. Частоты колебаний F и амплитуды переменной составляющей напряжения 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 тиаратронах ТГ-8/3000 и КУ-635 и газотроне ВГ-237. Колебания эти в основном, по-видимому, происходят в анодной области. Колебания у сетки тиаратрона незначительны по амплитуде и хаотичны по форме.

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

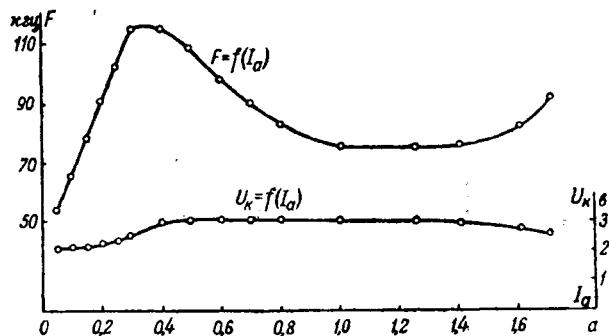


Рис. 2.

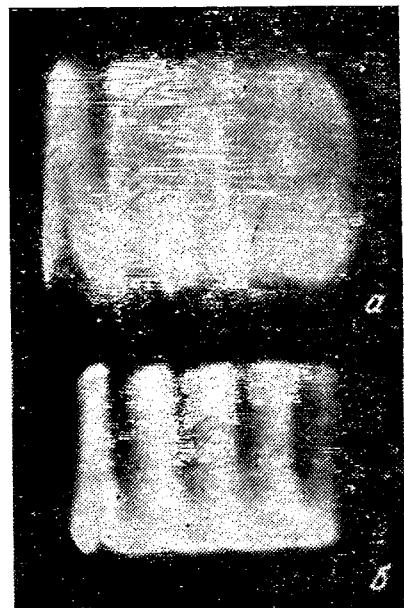


Рис. 3. (ТГ-8/3000; а— $I_a = 250$ ма,
 $F = 102$ кгц; б— $I_a = 1,2$ а,
 $F = 75$ кгц).

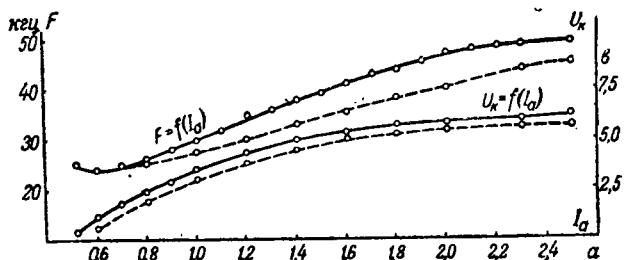


Рис. 4.

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 тиаратрона ТГ-8/3000, колебания в тиаратроне КУ-635 возникают скачкообразно при $I_a = 0,3$ а (рис. 4). Частота колебаний в ин-

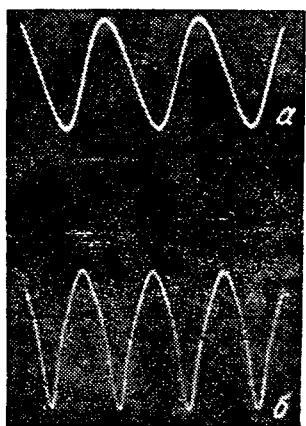


Рис. 5. (КУ-635; $a - I_a = 520 \text{ мА}, F = 25 \text{ кГц}; b - I_a = 1,08 \text{ а}, F = 30 \text{ кГц}$).

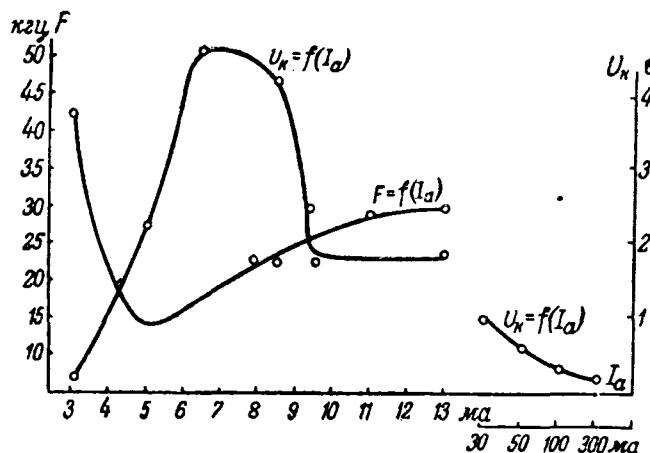


Рис. 6.

тервале изменения разрядного тока от 0,3 до 2,5 а меняется от 24 до 50 кГц. Амплитуда колебаний U_h значительно выше, чем у тиатрона ТГ-8/3000. Характеристики, показанные сплошной линией и пунктирной линией, относятся к двум различным экземплярам тиатрона КУ-635. Незначительное различие в частоте колебаний объясняется неполной идентичностью внутренних параметров тиатронов (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 $I_a = 450 \text{ мА}$ колебания пропадают. Отчетливо наблюдаемые колебания имеют место в интервале 2—13 мА. Частота колебаний имеет резкий минимум при $I_a = 5 \text{ мА}$, а амплитуда — резкий максимум при $I_a = 6—7 \text{ мА}$. Форма колебаний значительно зависит от величины разрядного тока.

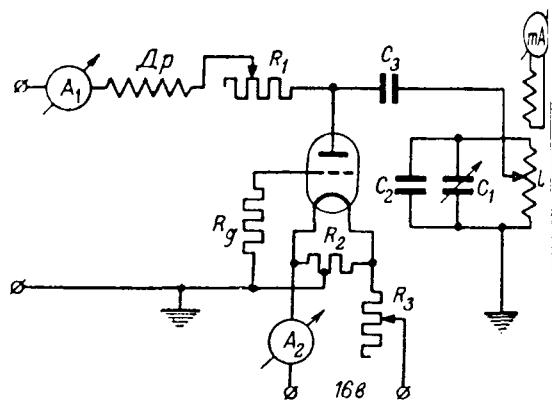


Рис. 7.

Выделение колебаний во внешний колебательный контур. Для выделения высокочастотной составляющей был собран генератор параллельным включением контура (рис. 7). Работа генератора изучалась на двух экземплярах тиатрона КУ-635 при $I_a = 2a$. Резонансная частота при одном экземпляре была $f = 47 \text{ кГц}$, при другом $f = 39 \text{ кГц}$. Наибольшая амплитуда напряжения на контуре была 60 в. Настройка в резонанс производилась изменением одной из трех величин I_a , I_h или $C = C_1 + C_2$ при постоянном значении двух остальных. Грубаястройка осуществлялась изменением C_3 , а точная — изменением C_1 и I_h (в допустимых пределах). Мощность, выделяющаяся в контуре, была порядка 1 вт.

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

Ввиду малого внутреннего сопротивления тиатрона более рациональной оказалась схема последовательным включением контура. Внутреннее сопротивление тиатрона при этом вход в контур. При $R = 20 \text{ ом}$ (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 (тиатрона, 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 жидккий катод с нефиксированным катодом в пятном, не ограничивающим преобразуемый ток. Для экспериментальных целей в качестве газа разрядного 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 деионизация,

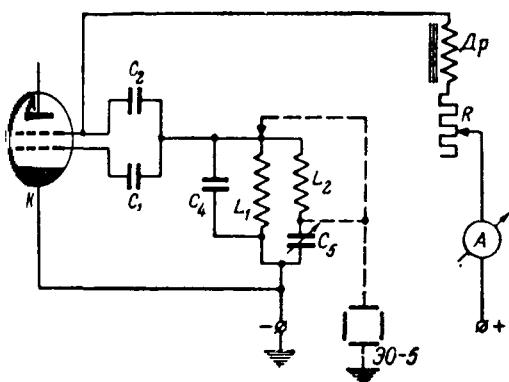


Рис. 8.

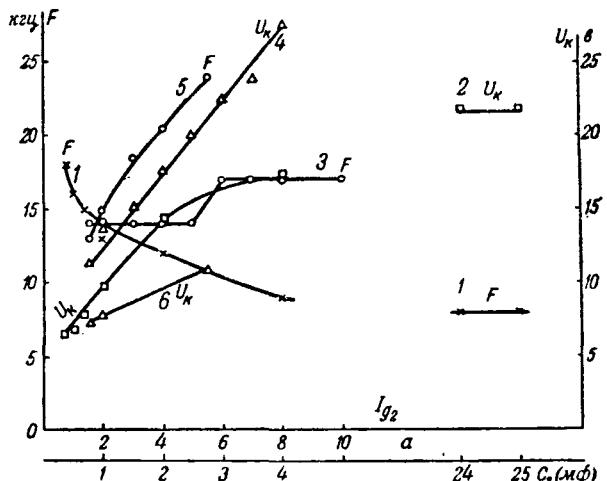


Рис. 10.

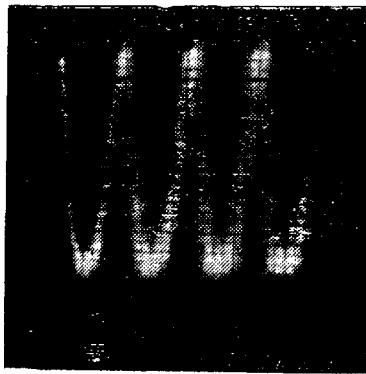


Рис. 9.

та и вставлены на заданном расстоянии
возда два электрода g_1, g_2 (рис. 8). Электроды
единились к электровакуумным вводам,
сенным во фланец анодного узла.

следование колебаний производилось при членном возбуждении. Колебания наблюдались на электронном осциллографе ЭО-5, отградуированном при различных значениях усиления синхронизации. При снятии нагрузочной характеристики $U_{g2} = f(I_{g2})$ измерялись частота F и амплитуда колебаний U_k , как функции нагрузочного тока I_{g2} . С помощью схемы рис. 8 были изучены колебания в интервале от 4 до 112 кгц. Амплитуда колебаний U_k изменялась в интервале 6,35 до 58 в. Колебания частотой $F = 24$ и амплитуды $U_k = 17,4$ в получены при $22,5 \text{ мкф}$, $C_4 = 1,5 \text{ мкф}$, $C_5 = 0$, $C_1 = 0,5 \text{ мкф}$. Постоянная составляющая разрядного тока $0,2 \text{ а.}$

ления частоты $F = 112$ кгц были получены при $C_1 = 1$ мкф, $C_2 = 22$ мкф, $C_4 = 1,5$ мкф, $C_5 = 1600$ пф; постоянная составляющая разряда тока $I_{g2} = 4,5$ а. Колебания амплитуды в 8 получены при следующих условиях: $C_1 = 5$ мкф, $C_2 = 25$ мкф, $C_4 = 1,5$ мкф, $C_5 = 0$, постоянная составляющая разряда тока $I_{g2} = 1$. Форма колебаний $F = 14,8$ кгц, записанная

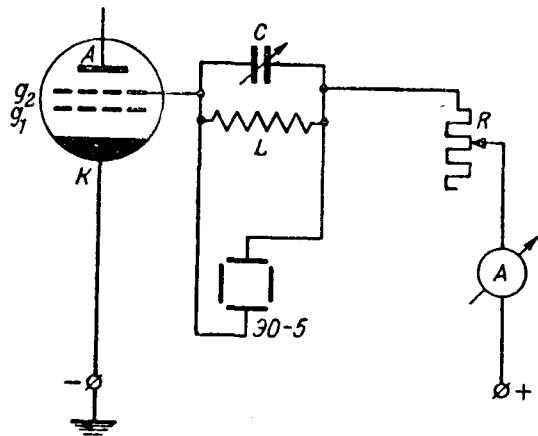


Рис. 11.

электронным осциллографом Э0-5, представлена на рис. 9. Постоянная составляющая разрядного тока $I_{p_2} = 2 \text{ а}, U_{p_2} = 36 \text{ в.}$

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_{x2} .

Изменение C_1 от 0,25 $\mu\text{ф}$ до 2 $\mu\text{ф}$, 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 $F = 21,8 \text{ кгц}$, $U_\kappa = 33 \text{ в}$ для одного из вариантов этих схем (рис. 11; $I_{g_1} = 2,5 \text{ а}$, $C = 3 \mu\text{ф}$) 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



Рис. 12.

I_{g2} , а	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_{κ} , в	30	9	9,75	8,25	16,5	13,5	17

I_{g2} , а	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_{κ} , в	20,3	26,3	25	22,5	35	33	18,6

 $I_{g1} = 1,53$ а

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_{κ} , 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_{κ} , 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_{κ} , в	1,1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

 $I_{g1} = 5,1$ а

C , мкф	0,25	0,5	0,75	1,0	3,0
F , кгц	52	36	25	23	13
U_{κ} , в	1,05	1,35	1,5	1,45	2,1

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.

Заключение. Необходимо дальнейшее изучение возможности увеличения частоты и амплитуды колебаний, генерируемых в газоразрядных приборах. Необходимо также изучать колебания в газоразрядных приборах, как причину аварий и источников помех. Следует выяснить связь обратных зажиганий с колебаниями в газоразрядных приборах. Сопоставление характеристик $F=f(I_a)$ и $U_{\kappa}=f(I_a)$ тиратронов ТГ-8/3000 и КУЧ с значениями их максимальных допустимых рабочих напряжений показывает, что большая амплитуда колебаний (КУ-635) соответствует меньшему допустимому значению обратного напряжения. Это положение надлежит проверить на 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. Свириденко (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 функциональных реле с цилиндрическим ротором диктует необходимость изучения ряда новых задач, не возникавших ранее при применении реле с шаровым ротором, собственное время действия которых велико: в частности, важна задача анализа работы реле при воздействии переходных токов, влиянию которых сильно подвержены реле с цилиндрическим ротором, обладающие малой инерцией движущих частей. Переходные токи, как показано ниже, могут привести к неселективному срабатыванию индукционного однофазного реле направления мощности с цилиндрическим ротором, не принять специальных мер, заключающихся в ведении резонансного контура в цепь катушки 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.

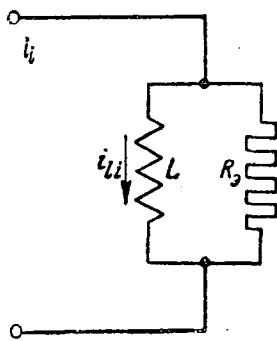


Рис. 1. Схема замещения обмотки реле (i_u —намагничающий ток).

При коротком замыкании в системе ток в обмотке тока¹ реле рассматриваемого типа, как известно, состоит из установившейся и переходной

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

составляющей, соответственно следующему уравнению:

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

где α —фазный угол в момент аварии.

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

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

Ток i_u имеет намагничающую составляющую i_u (рис. 1). Приближенно

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

где

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

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).

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

Тевенена-Гельмгольца:

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

где $U_{\phi, \max}$ — 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:

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

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 установленвшимся током в обмотке напряжения, переходной составляющей в обмотке напряжения с установленвшимся 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 $U_{\phi, \max}$. Образование этого момента имеет место вследствие взаимодействия переменного и постоянного (по направлению) тока; переходный момент знакоперемен и направлен то в сторону размыкания, то в сторону замыкания контактов. Он может быть приближенно выражен так:

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

где

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

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

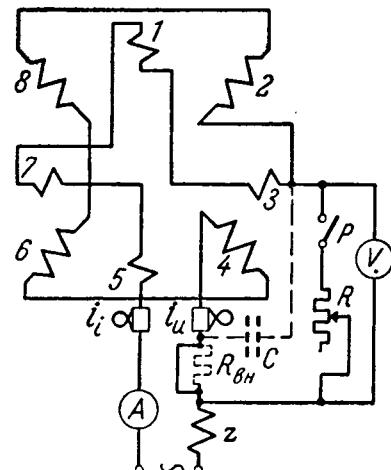


Рис. 2. Схема опыта, иллюстрирующего работу однофазного реле направления мощности при коротком замыкании.

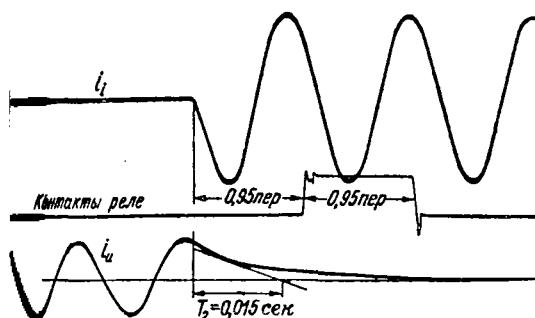
раз превзойти установившийся момент M_y , приводит к неселективному срабатыванию при обратном направлении мощности.

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

При разомкнутом рубильнике P катушки 1, 3, 5 и 7 и напряжения 2, 4, 6 и 8 включены последовательно. При этом катушки напряженеются 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 искому 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% 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_t 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 з



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

жания контактов реле направления мощности (5 периодов) достаточно для прилипания быстрым действующим промежуточного реле, действующего на отключение выключателя.

На рис. 2 (пунктир) приведена схема, позволяющая увеличить чувствительность реле направления мощности с цилиндрическим ротором. Схеме параллельно обмотке напряжения реле включается емкость, настроенная в резонанс с ее индуктивностью. Последовательно с образованым контуром вводится активное сопротивление $R_{\text{ен}}$. 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. Приближенно, намагничивающий ток имеет (приложение)

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

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

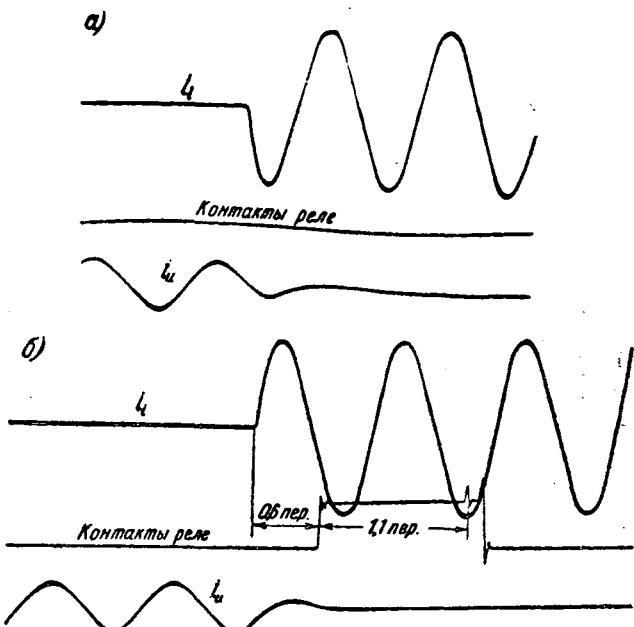
$$T_{2u} = 2C \frac{R_s R_{\text{ен}}}{R_s + R_{\text{ен}}}.$$

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

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

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

Приближенно момент от взаимодействия переходной составляющей тока в обмотке на-



4. Работа реле направления мощности, обмотка которого шунтируется емкостью, при включении обратной мощности (а) и прямой мощности (б). I_t — ток в катушках тока; I_u — в катушках напряжения.

пряжения с установившейся составляющей в обмотке тока

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

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_1 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 $U_{\phi, \text{макс}} \gg U_{\text{макс}}$.

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 уставившийся момент, увеличивает чувствительность защиты,— ликвидируется так называемая «мертвая зона» реле направления мощности.

Приведенные теоретические положения подтверждаются опытом. Осциллограмма *а* 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 *б* 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 $R_{\text{вн}}$ и C .

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

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

Корни знаменателя (10):

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

где

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

Применяя теорему разложения и подставляя вместо U

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

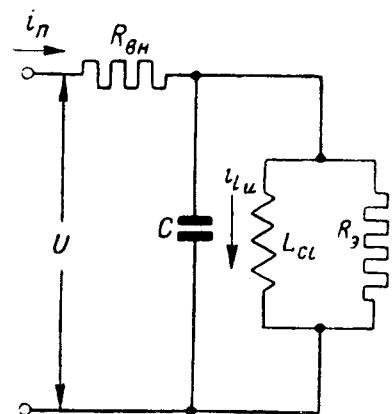


Рис. 5. Схема замещения обмотки напряжения реле шунтированной емкостью (i_{lu} — намагничивающий ток).

получим следующее выражение для переходной составляющей тока:

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

Минимая часть (11) дает формулу

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

где

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

Предположим, что мы выбрали постоянные контура 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 тока ($\gamma_0 = \gamma = \omega$).

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

$$i_{lu} = -\frac{U_{\phi, \text{ макс}}}{\omega L_u} \frac{R_s}{R_s + R_{\text{вн}}} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_\phi) e^{-\frac{t}{T_{2u}}}. \quad (15)$$

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

$$i_{lu} = -\frac{U_{\phi, \text{ макс}}}{\omega L_u} \frac{R_s}{R_s + R_{\text{вн}}} \cos(\omega t + \alpha + \varphi_\phi). \quad (16)$$

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

◊ ◊ ◊

Контроль влажности изоляции по методу „емкость—частота“

Инж. В. Б. КУЛАКОВСКИЙ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Увлажненность — одна из наиболее важных характеристик изоляции. Технике определения влажности изоляции электрических машин и трансформаторов уделяется большое внимание. Ранько внедряются емкостные методы контроля влажности.

Метод емкость — температура [Л. 3, 4, 7], предложенный в 1945 г. Московским трансформаторным заводом им. Куйбышева для решения частных установок вопроса о сушке трансформаторов, транспортируемых без масла, был описан в журнальной литературе. По данным защищенных, 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 электротехники для применения в энергосистемах и получил довольно широкое распространение. Недостаток 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 может объяснить явлением внутрислоевой поляризации [Л. 1]. Внутрислоевая поляризация имеет место в неоднородных диэлектриках, и особенно таких, у которых неоднородность обусловлена различием в толще их вкраплений полупроводящего вещества (например, воды) [Л. 3, 6]. В трансформаторике после наложения на него электрического поля, кроме обычных явлений поляризации и смещения, проходит 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, внутрислоевая поляризация является весьма медленным процессом, длительность которого может составлять десятки и сотни минут. Для того чтобы внутрислоевая 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 внутрислоевая 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 внутрислоевой поляризации в значительной степени зависит от температуры: при повышении

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 влажности изоляции трансформаторов.

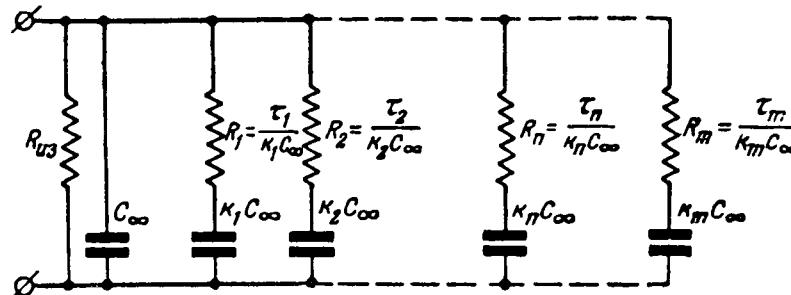


Рис. 1. Схема замещения реального увлажненного диэлектрика.

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

Поэтому при одной и той же частоте внутрислоевая 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 внутрислоевой поляризации.

Этот вывод может быть получен также из аналитического выражения для емкости конденсатора с диэлектриком, в котором наблюдается внутрислоевая 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 внутрислоевой поляризации, зависящая от формы вкраплений и свойств диэлектрика и полупроводящего вещества;
 k — постоянная последействия, 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 действий внутрислоевой поляризации, иначе говоря, показателем неоднородности диэлектрика.

Сумма их

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

(постоянная последействия) должна служить в рошой 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 внутрислоевой 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 измеряемая емкость периодически заряжается от источника постоянного напряжения, затем разряжается гальванометром. Величина емкости может быть вычислена по показаниям гальванометра и параметрам схемы:

$$C = \frac{I}{uf},$$

где I — среднее значение тока, текущего через гальванометр;

u — зарядное напряжение;

f — частота переключений (на заряд или разряд).

Сопротивление утечки в идеальном случае не должно влиять на показания гальванометра. Однако практически переключатель P (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.

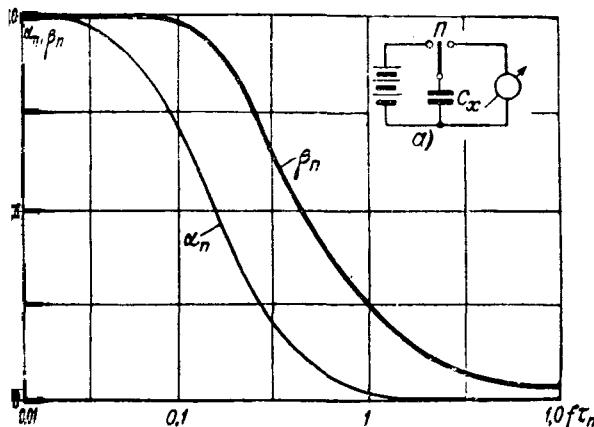


Рис. 2. Зависимость коэффициента возрастания емкости β_n от частоты и постоянной времени (τ — измерение на синусоидальном напряжении; β — по схеме заряд—разряд).

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.

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 получения зависимости емкости от частоты ток заряд—разряд более выгоден, чем измерения мостиками переменного тока. Аппаратура измерения на частотах порядка единиц герц ток методе заряд—разряд к тому же получается гораздо простой и удобной.

На рис. 3 приведены кривые зависимости емкости от частоты для образца прессшпана при данной степени его влажненности и температуре 23° С. В диапазоне 20...20 000 гц измерения велись с помощью моста, в диапазоне 1,32...10 гц — по схеме заряд—разряд. Из кривых

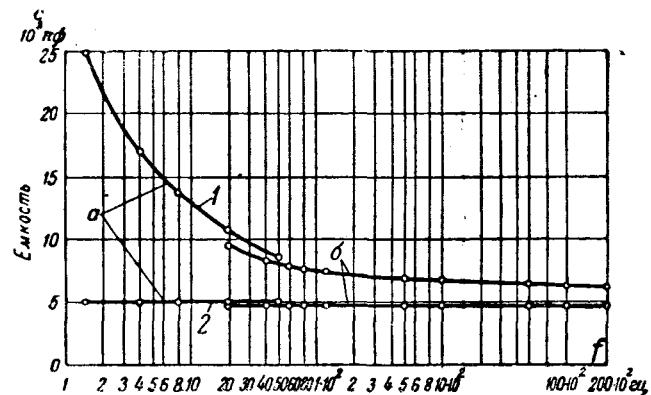


Рис. 3. Емкость в зависимости от частоты для увлажненного при влажности 5,62% (1) и сухого прессшпана (2). a — измерение по схеме заряд—разряд; b — мостиком переменного тока.

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 ($\frac{C_f}{C_{50}}$).

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

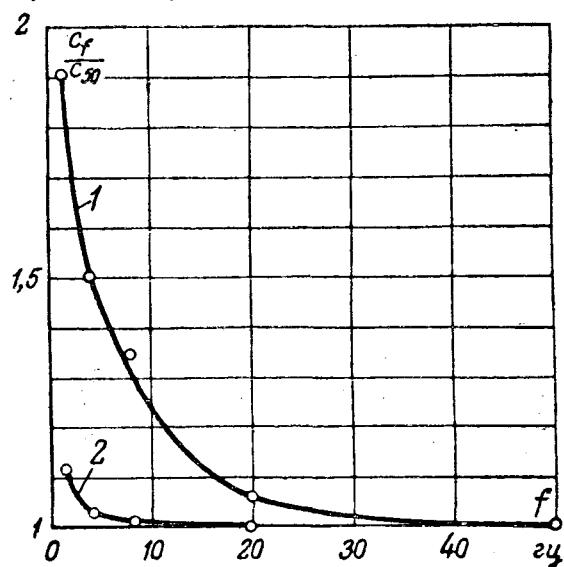


Рис. 4. Отношение емкостей $\frac{C_f}{C_{50}}$ в зависимости от частоты для обмотки 220 kV трансформатора 220/110/10 kV , 40 000 kva до сушки при температуре 23° С (кривая 1) и после его сушки (26° С).

Вывод формулы приведен в приложении.

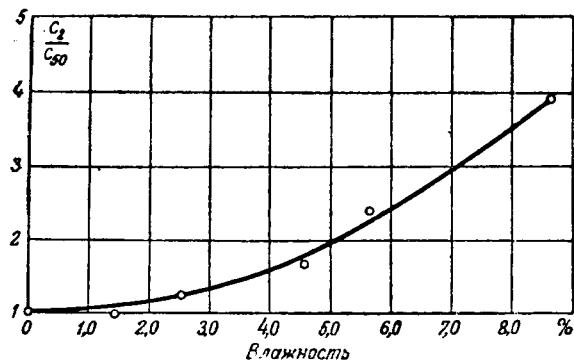


Рис. 5. Отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ в зависимости от влажности для прессшпана при 20° С.

В первом случае значение $\frac{C_f}{C_{50}}$ значительно отличается от единицы, особенно при частотах порядка нескольких герц. Во втором случае $\frac{C_f}{C_{50}}$ при всех частотах весьма близко к единице (например, $\frac{C_{1,32}}{C_{50}} = 1,12$). Эти, равно как и другие опытные данные, позволили сделать вывод, что при температурах порядка 20°C критерием увлажненности может служить отношение емкостей, замеренных при частоте 1—2 гц и при 50 гц. По соображениям удобства измерений в дальнейшем в качестве низшей частоты было выбрано 2 гц.

На рис. 5 приведена зависимость отношения $\frac{C_3}{C_{50}}$ от содержания влаги в образце прессшпана, построенная по тем же экспериментальным данным, что и рис. 3. Из кривой видно, что $\frac{C_3}{C_{50}}$ является достаточно чувствительным показателем, отмечающим наличие нескольких процентов влаги в материале.

Измерительный прибор 2 (рис. 6). Измерение разрядного тока производится по нулевому методу. Измеряемая емкость разряжается на нуль-гальванометр, через который одновременно протекает постоянный компенсирующий ток известной величины, по направлению, обратный зарядному. Нуль-гальванометр не дает отклонений тогда, когда компенсирующий ток равен среднему значению разрядного тока.

Питание всех цепей постоянного тока производится от выпрямителя 1 с газоразрядным стабилизатором напряжения. Заряд измеряемой емкости производится постоянным

² В разработке прибора кроме автора принимал участие Б. А. Алексеев.

напряжением 350 в. Переключение на заряд разряд осуществляет поляризованное реле 6. Для облегчения работы контактов реле в цепи заряда имеется ограничивающее сопротивление. При работе на частоте 50 гц одна из обмоток реле включается через добавочное сопротивление 4 на сердечник и якорь реле начинает колебаться с частотой 50 гц. При работе на 2 гц обмотки реле подключаются к механическому переключателю 2 с двигателем, который обеспечивает срабатывание реле с заданной частотой.

Разряд измеряемой емкости производится с помощью гальванометра 9 через фильтр 7. При работе на 50 Гц вся разрядная цепь шунтируется с таким расчетом, чтобы при неизменной измеряемой емкости ток, протекающий через гальванометр при обеих частотах, оставался бы одинаковым.

Компенсирующий ток снимается с потенциометра 13, включенного на напряжение—70 в (в отношении к заземленной точке). Величина компенсирующего тока определяется по положению ползунка потенциометра. В момент компенсации компенсирующий ток равен разрядному. Шкала потенциометра может быть проградуирована непосредственно в единицах емкости или же между ползунком и заземленной точкой может быть включен вольтметр, проградуированный в тех же единицах. Для изменения пределов измерений служит переключатель, который закорачивает сопротивление 11 в цепи компенсирующего тока. Компенсирующий ток при том же положении движка потенциометра возрастает в 10 раз.

Прибор несложен в производстве и может быть изготовлен в небольших мастерских по ремонту измерительных приборов или радиоаппаратуры.

Измерения на трансформаторах. Были замены емкости 45 новых трансформаторов выпуска Московского трансформаторного завода мощностью от 1 000 до 31 500 кв. Температура обмоток лежала в пределах от 12...25° С, в

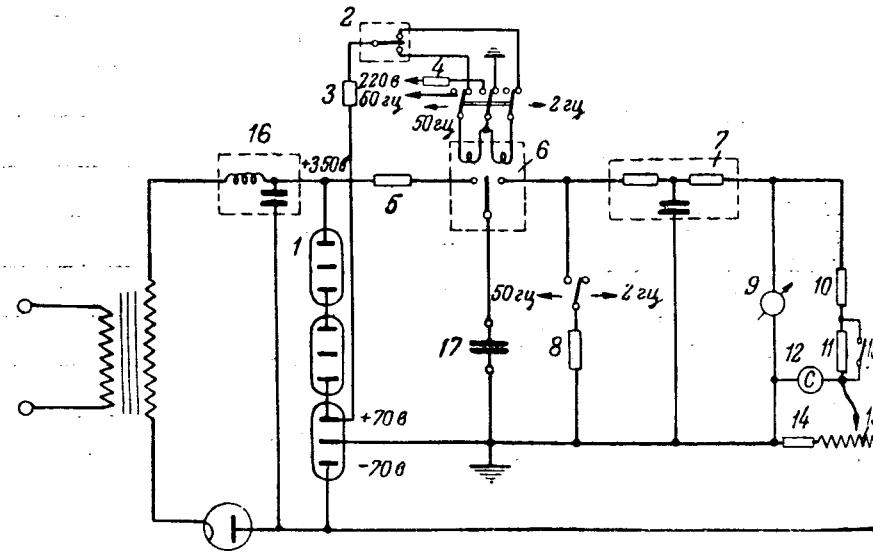


Рис. 6. Схема прибора для измерения емкостей при частоте 2 и 50 гц.
 1 — газоразрядный стабилизатор; 2 — механический переключатель; 3, 4, 5, 6, 10, 11 и 14 —
 противления и шунты; 6 — поляризованное реле; 7, 16 — фильтры питания и гальванометр;
 9 — нуль-гальванометр; 12 — указатель емкости; 13 — потенциометр; 15 — переключатель пределов;
 17 — измеряемая емкость.

в которых случаях в пределах 3...5°C. Замеряется емкость каждой обмотки на землю при земленных 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 сушки, 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	$\frac{C_2}{C_{50}}$	
	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 22% влаги.

На рис. 7 представлены максимальные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для 16 трансформаторов различной мощности, на которых измерения производились twice: 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 пять трансформаторов мощностью от 1000 до 12000 кВа, в течение нескольких лет находившихся 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 кВа, 6/3 кВ производственного 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

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

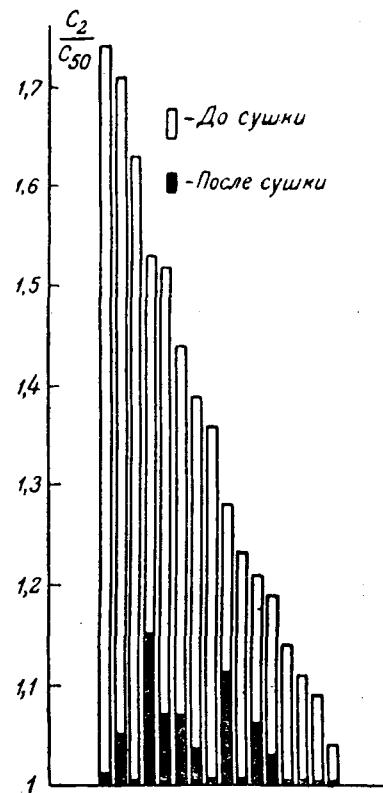


Рис. 7. Максимальные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для шестнадцати различных трансформаторов до сушки и пропитки маслом и — после сушки и заливки.

Схема заряд — разряд

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

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

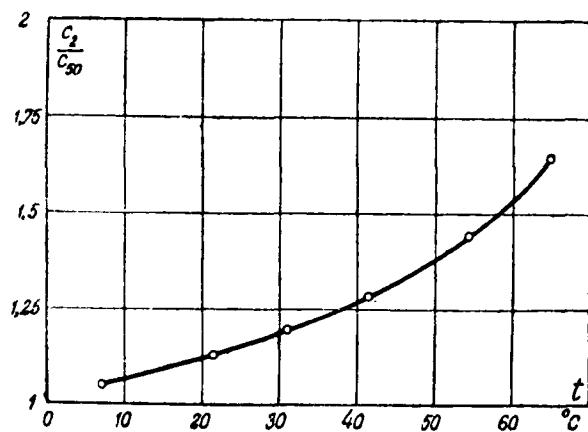


Рис. 8. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ в зависимости от температуры для прессшпана влажностью 3,6%.

увлажненность), 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 сравнительной 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). Несколько меньше температурная зависимость у новых, еще непропитанных трансформаторов в начальной стадии их сушки на заводе.

У трансформаторов, прошедших сушку, еще не пропитанных и не залитых маслом, зависимость 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, темп-

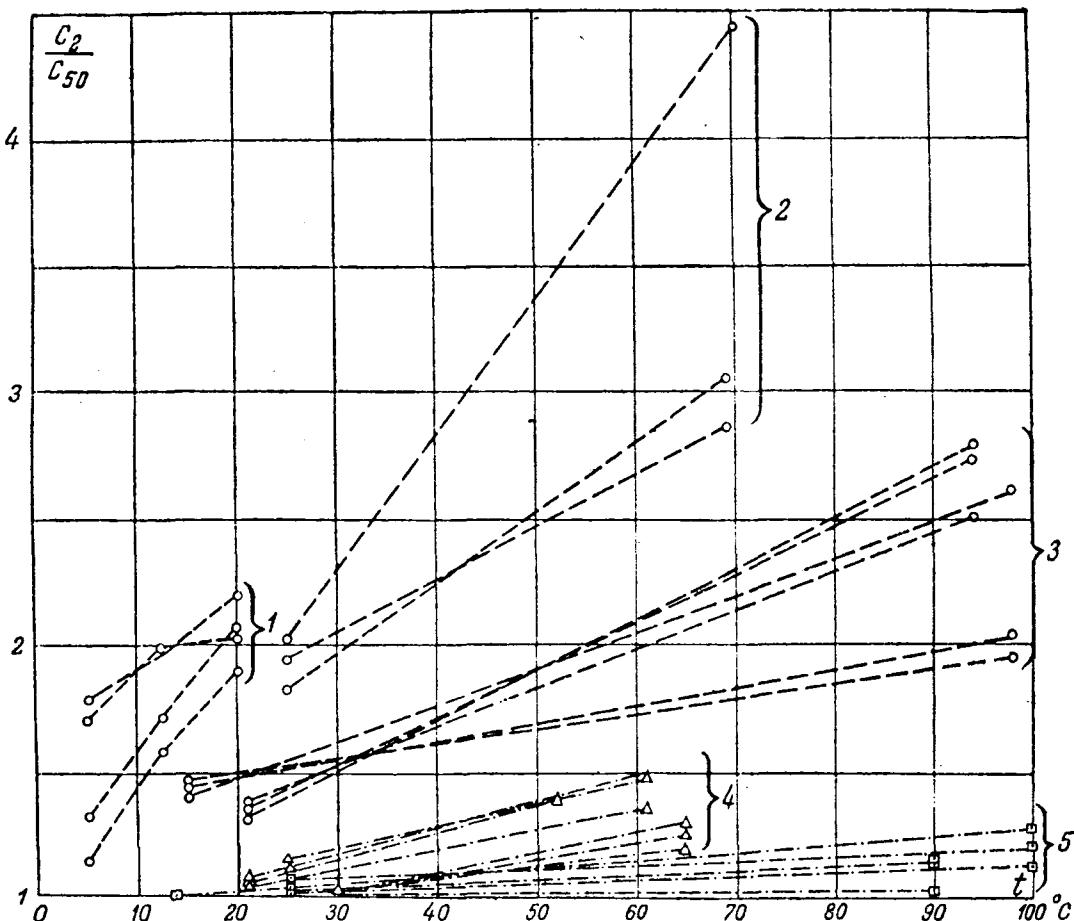


Рис. 9. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ при различных температурах для некоторых трансформаторов.

1 — увлажненные трансформаторы, несколько лет стоявшие ве залитые маслом; 2 — увлажненный трансформатор, несколько лет стоявший не залитый маслом (начала сушки в собственном кожухе); 3 — увлажненные трансформаторы без масла (сушка в шкафу); 4 — после сушки в масле; 5 — 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° 50...60° С.

ким образом, при измерении $\frac{C_2}{C_{50}}$ необходимо изывать 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, изких к нулю и ниже нуля, требуется, видимо, переход к частотам ниже 2 гц. Измерение отношения $\frac{C_1}{C_{50}}$ 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 в неформальном режиме (например, при чрезвычайно низкой температуре).

Пока нет достаточных данных, чтобы указать какие-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 $\frac{C_2}{C_{50}}$ 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 влаги (при температуре 20° С в диапазоне частот 1,32—50 гц по схеме заряд — разряд и 20—100 гц на синусоидальном токе). Тем не менее, не пропитки и погружения в масло какой-либо изоляционной конструкции зависимость емкости конструкции от частоты может значительно отличаться. Объясняется это, видимо, тем, что масло, имеющее сравнительно большую диэлектрическую проницаемость, заполняет различные пустоты в изоляции, вызывая тем самым перераспределение электрического поля. Плотность поля в самом изолирующем материале должна возрасти, и, следовательно, влага в большей степени влияет на емкость конструкции. Таким образом, увлажнение материала и вызванное им изменение зависимо-

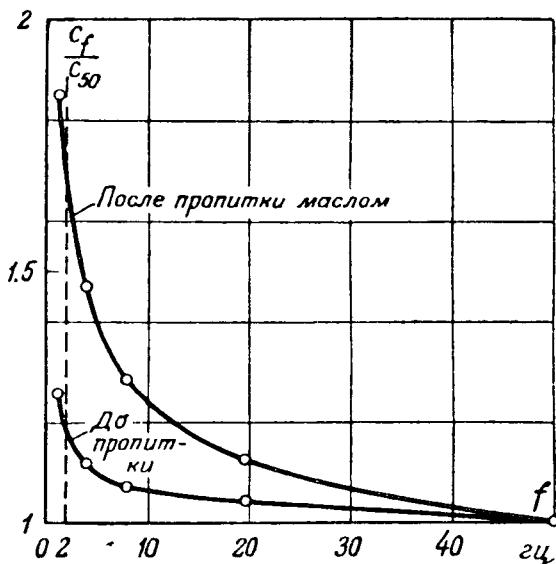


Рис. 10. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ для образца увлажненного прессшпана при 20° С до и после его пропитки маслом.

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 $\frac{C_2}{C_{50}}$ 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 мikanитовой 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 мikanит, имеет другое строение. Мikanит, даже совершенно сухой, не принадлежит к однородным материалам, свойства его склеивающего вещества значительно отличаются от свойств основного вещества (слюды). Присутствие влаги не должно существенным образом влиять на емкость мikanита, 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 мikanитовой изоляции, как это и наблюдается в практике.

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

Метод емкость — температура, применяющийся в настоящее время наряду с другими методами контроля изоляции трансформаторов (измерение сопротивления изоляции, токов утечки, $\operatorname{tg} \delta$), может быть в большинстве случаев заменен (также в сочетании с другими методами) методом емкость — частота, не требующим нагрева трансформатора выше $15-20^\circ\text{C}$.

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 $15-20^\circ\text{C}$ 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 каждого.

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 замещающей 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 изоляции электрических машин и трансформаторов по измерению емкости их обмоток. Электрические станции, № 4, 1948.
4. Б. Б. Гельперин. Новый метод определения влажности изоляции. Электрические станции, № 6, 1948.
5. М. М. Михайлов и Т. Н. Дьяченко. Взрывающееся малополярных органических электронизационных материалов. Электротехника, № 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 называются малые реки. промышленность в этом имеет ряд задач разработке новых видов электрооборудования. Основной из них является задача создания

более экономичной и простой конструкции генератора, на базе которой могла бы быть проектирована серия малых машин на мощности от 500 квт в интервале скоростей 187—250 об/мин для непосредственного соединения с гидротурбинами.

Авторами настоящей статьи в 1948 г. была проведена научно-исследовательская проектная

студия по изысканию экономичной конструкции гидрогенератора, имеющей поставленные требованиям. В процессе работы выяснилось, что целесообразно применения для данного интервала мощностей и скоростей генератора с наружным ротором. В результате разработана типовая конструкция вертикальной машины, представленной на рис. 1. Качественные преимущества этой конструкции в части экономии материала при одновременном увеличении махового момента, повышении трудоемкости и повышении к. п. д. делали ее пригодной замены существующей серии ВГС4-213 на мощности от 160 до 250 квт.

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. Ко-стина [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-

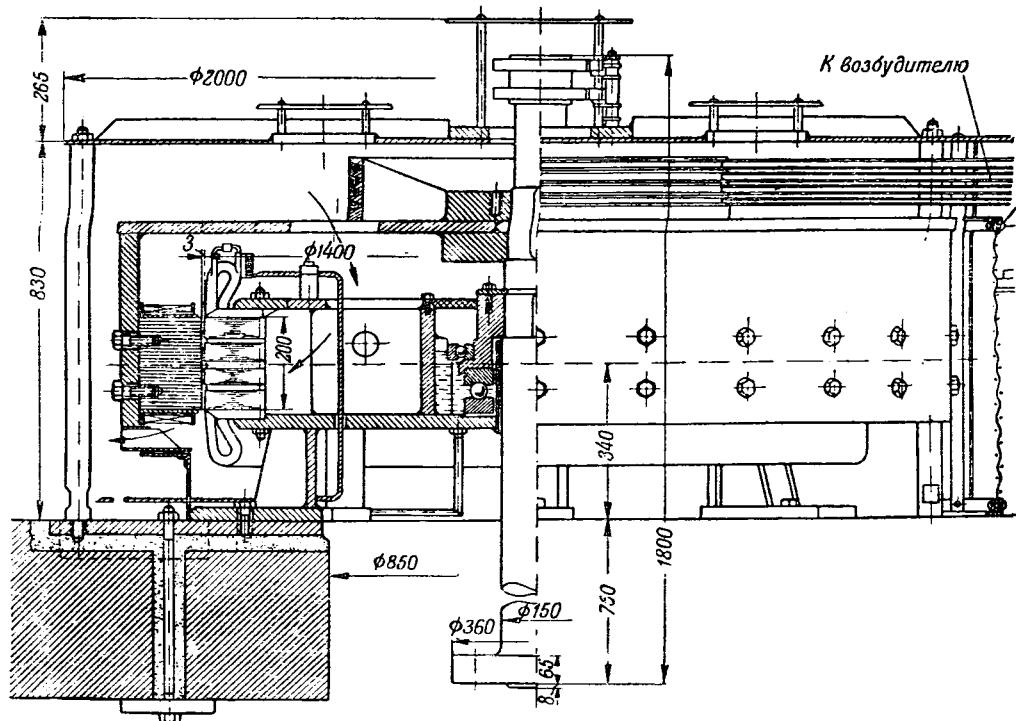


Рис. 1. Гидрогенератор 250 квт, 250 об/мин с наружным ротором, соответствующий рис. 3.

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, kva ;

n — номинальная скорость вращения, $\text{об}/\text{мин}$.

Ввиду большой механической инерции системы регулирования водяных турбин возможные в эксплоатации 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, kva .

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:

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

где P — мощность машины, kva ;

D_i — диаметр расточки, см ;

l — полная длина стали статора, см ;

n — номинальная скорость вращения, $\text{об}/\text{мин}$;

c — коэффициент использования

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

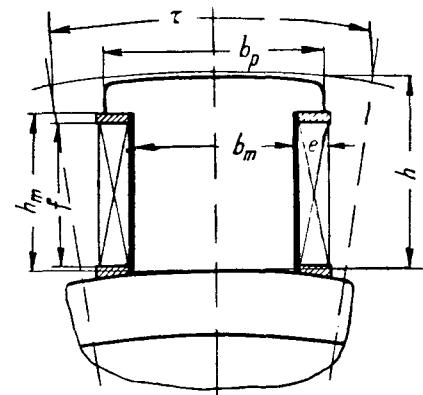


Рис. 2.

При легких сварных ободах маховой момента ротора создается преимущественно весом активной зоны (рис. 2). Без большой погрешности каждый из размеров, показанных на рисунке, можно принять пропорциональным полюсно 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:

$$G = \frac{k \pi^2 P}{2pcn}.$$

Эквивалентный диаметр для расчета махового момента

$$D = \gamma D_i$$

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

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

$$GD^2 = \sqrt{\frac{k^3 \pi^4 P^5 \gamma^6}{2pc^5 n^5 \left(\frac{l}{\tau}\right)^2}}.$$

Выясним, какие ограничения накладывает выбор величины $\frac{l}{\tau}$ условие минимального махового момента (2). Приравнивая 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

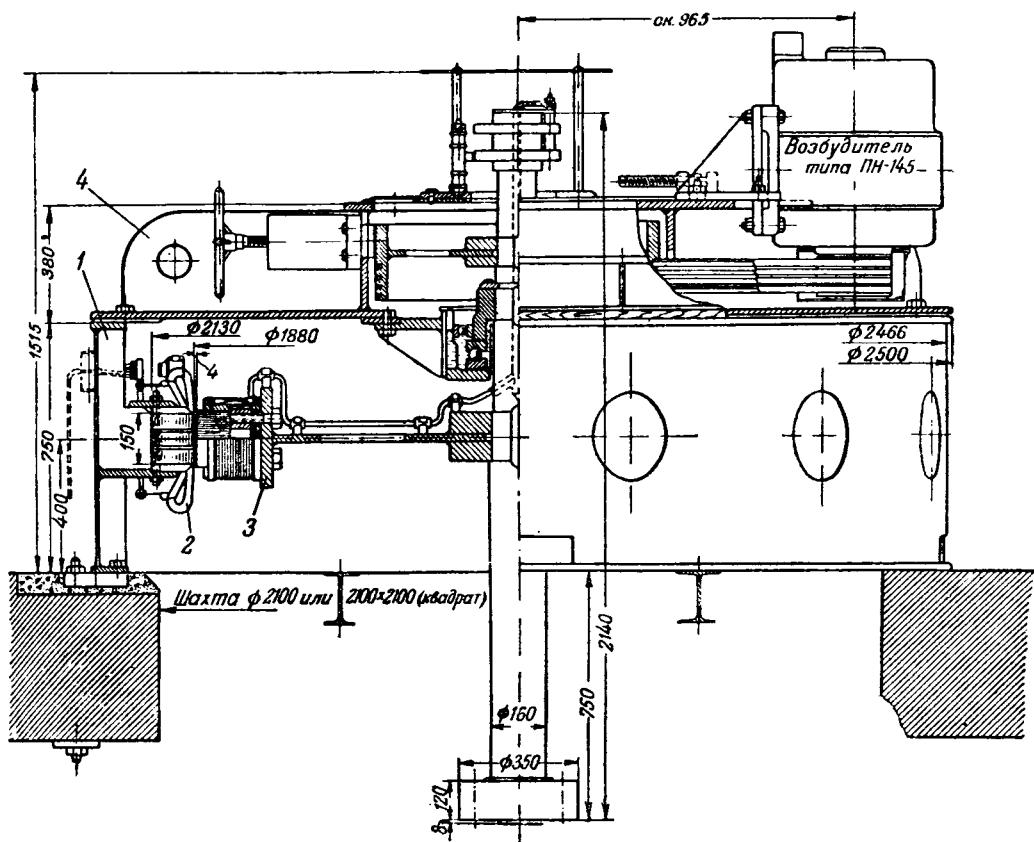


Рис. 3. Гидрогенератор 250 ква, 250 об/мин, существующее исполнение.

следует также, что при проектировании малых генераторов малой мощности возникают затруднения (мало Pn), так как при этом представляется возможным удержать $\frac{l}{\tau}$ в экономически разумных пределах, которые обычно принято считать величины $1 \div 1.6$.

В качестве примера выясним, какого наибольшего значения $\frac{l}{\tau}$ можно достичь для генератора с мощностью $P = 250$ ква, $n = 300$ об/мин. Для машины подобной мощности на основе численных данных спроектированных машин можно принять в качестве средних значений: $l = 7500$ кг/м³ (при гнуемых ободах); $\tau = 2,2$ ква/м³ об/мин; $\gamma = 1300 \cdot 10^3$; $\mu = 0,8$.

Считывая 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 является увеличенный габарит, что приводит к утяжелению конструктивных элементов и грузонесущей крестовины за счет большей массы лап, а также увеличение окружной скорости, усложняющее конструкцию крепления

полюсов, в особенности при высоких угловых 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 примере, какой результат может быть достигнут применением

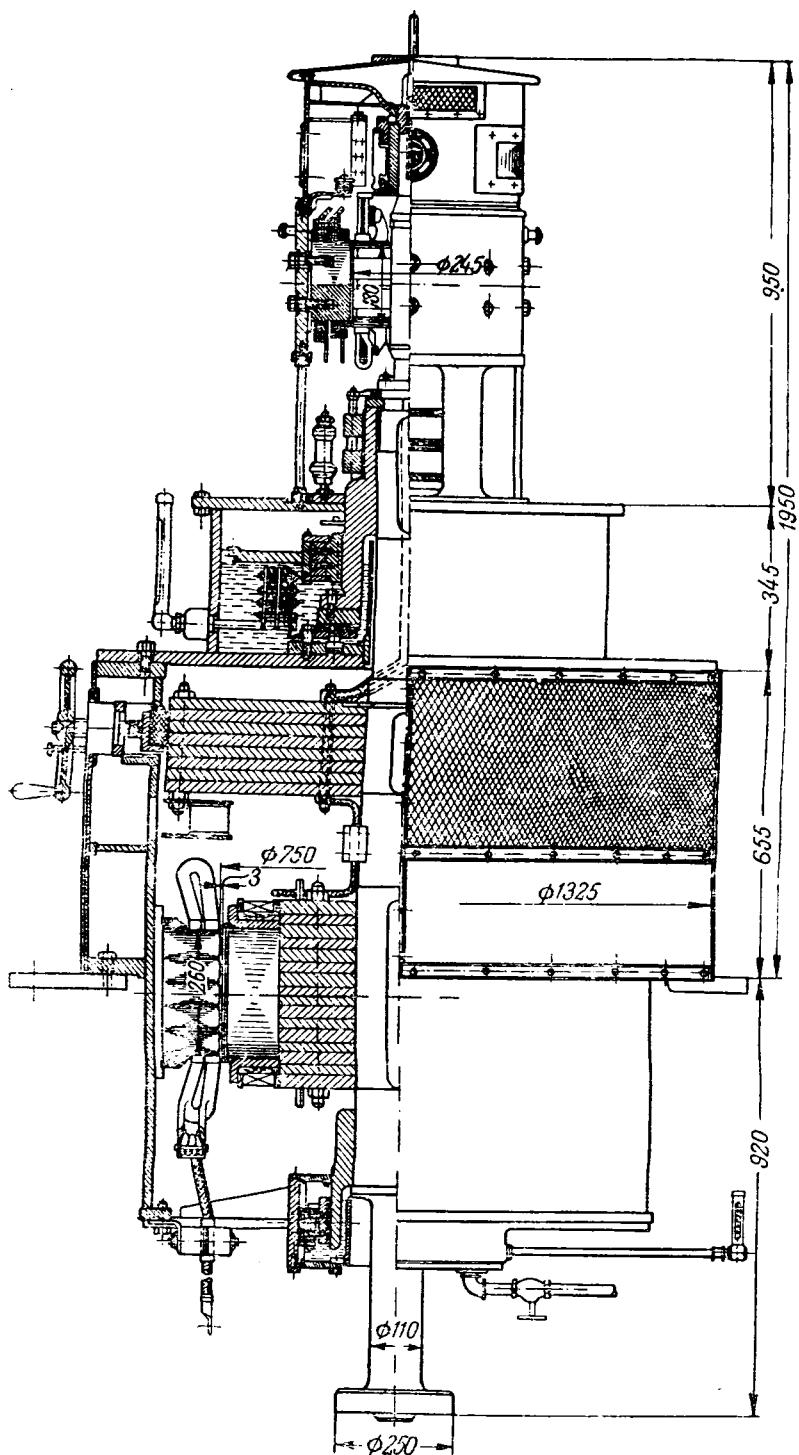


Рис. 4. Гидрогенератор 250 ква, 600 об/мин, существующее исполнение.

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 $\frac{t}{\tau}$ может быть увеличено соответственно до практически приемлемого значения

$$\frac{t}{\tau} = \frac{1,2}{0,8}^3 \cdot 0,3 = 1.$$

Описание конструкции. Необходимо прежде всего указать, что идея такого ротора не нова. Попытки принять ее имели место в машинах зонтичного исполнения [Л. 2]. Основное обстоятельство, что неподвижная часть оказывалась при этом в машине, затрудняло осуществление конструкции машины в целом. Но в вертикальных машинах такой мощности, у которых связь с фундаментом осуществляется тем естественной постановки его пуска на фундамент, оказалось возможным беспрепятственно применить ротор, причем внутреннее положение статора дало возможность объединить функции механических лопастей статора, несущих магниты с обмоткой, и грузонесущей крестовины, получив, таким образом, крестовинную конструкцию гидрогенератора.

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

Статор, нижняя крестовина и ляная ванна представляют собой механически цельную сварную конструкцию большой жесткости и большой устойчивости. В основании статора находится опорный лист, который не воспринимает осевую нагрузку подшипника и передает ее на фундамент и удерживает в спрессованном состоянии активные стали статора. К этому листу в центральной части варивается цилиндр масляной ванны. Подпятник и направляющий подшипник шариковые, как это и принято в гидрогенераторах подобных мощностей и исполнения.

Технология обработки статора обеспечивает получение при сборке машины равномерного фиксированного воздушного зазора подобно горизонтальным машинам со щитовым исполнением подшипников, так как обработка посадки стали статора и центрирующей заточки для направляющего подшипника производится с одинаковой установкой.

Возможность получения равномерного воздушного зазора позволяет сколько уменьшить его абсолютную величину вследствие того, что в малых гидрогенераторах величина воздушного зазора диктуется не зафиксированным 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 ст

приводится к диску. Установка полюсов ротора обращенной машины значительно упрощается благодаря тому, что центральная сила прижимает полюсы к ободу.

В качестве возбудителя используется, как обычно в малых гидрогенераторах, машина постоянного тока серийного изготавления типа ПН, которая приводится во вращение от вала генератора клиновременной передачи.

Срываение обращенного гидрогенератора производится ручным тормозом. В качестве тормозной поверхности используется наружная поверхность обода ротора.

Для предотвращения личных прикосновений работающего персонала вращающимся ча-

стично генератор закрыт легким защитным кожухом.

Основная конструкция обладает следующими преимуществами и с точки зрения вентиляции:

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

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

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

Конструкция ротора предусматривает удобное место для установки центробежного вентилятора. Такая возможность создает предпосылки для дальнейшему повышению существующих норм магнитных нагрузок.

Необходимо отметить, что, несмотря на некоторое повышение вентиляционных потерь в гидрогенераторах с наружным ротором, общий вес таких генераторов несколько повышается из-за более рациональной геометрии активных размеров машины.

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

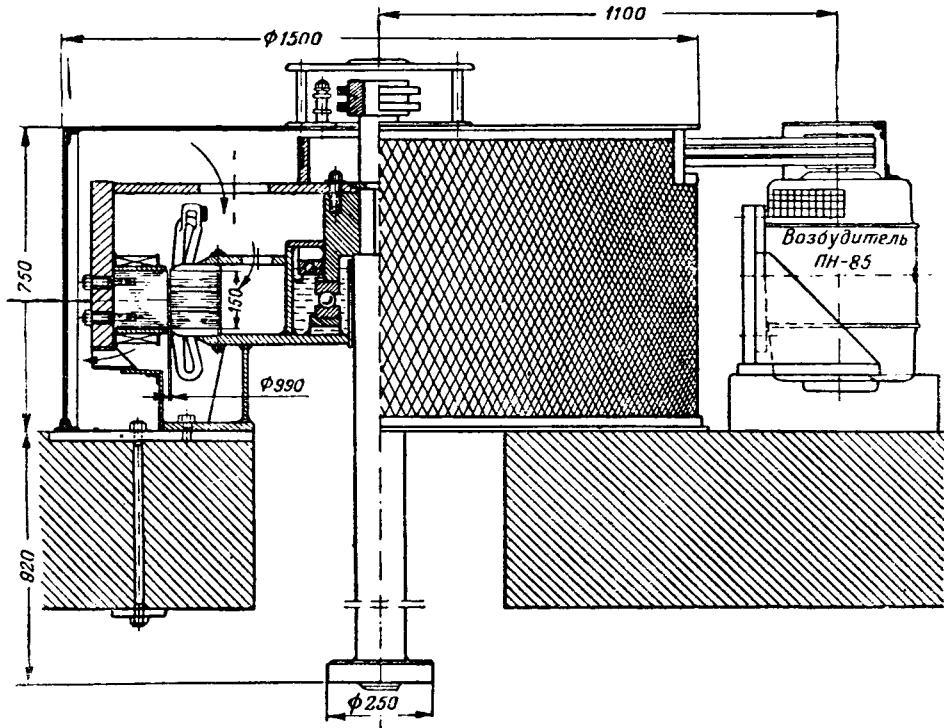


Рис. 5. Гидрогенератор 250 ква, 600 об/мин с наружным ротором.

Характеристика генератора	250 ква, 250 об/мин		250 ква, 600 об/мин		
	Исполнение	ВГС-213/15-24	Обращенное	СВ-99/24-10	Обращенное
Показатели					
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 $\frac{I}{r}$ 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 ква затруднения, связанные с обеспечением рациональных соотношений, исчезают.

8. При мощностях, меньших, 200 ква, может оказаться более целесообразным применение быстроходных 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 использована в интервале мощностей 150—1 000 ква и в первую очередь для модернизации серий генераторов, выпускаемых заводом «Уралэлектропарат» для сельского хозяйства.

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

Литература

1. З. Б. Нейман и К. Ф. Костиц. Гидрогенераторы для сельской электрификации. Электричество, 1950.

2. Е. А. Алексеев. Конструкция электрических машин. 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 на- зрела 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. Решениедается 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 вращаю-

ся 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. Электродвижущая сила, создаваемые в системе вращающимися роторами обмотками, образуют в установившемся режиме при независимом возбуждении систему 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 создающие синусоидально распределенные в пространстве н. с.

4. Насыщение в стали элементов системы учитывается только выбором соответствующих параметров.

5. Потери в стали элементов системы не учитывается.

6. Скорость вращения роторов в тех случаях, когда это специально не оговаривается, принимается постоянной.

7. Статические элементы системы создают статическую нагрузку. Это значит, что все собственные активные и реактивные сопротивления в фазах a , b , c являются одинаковыми, а элементов, расположенных в разных фазах друг на друга является одинаковым.

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

2. При записи операторных уравнений обобщения для операторных эквивалентов токов, напряжений и потокосцеплений не отличаются от обобщений оригиналов, являющихся функциями времени, как это принято в современной теории электрических машин. Несмотря на известную возможность подобной записи, применение ее целесообразно, так как она существенно упрощает записи уравнений, а возможность ошибки, связанной с такой записью, практически исключена.

3. При преобразовании операторных уравнений в различные системам вращающихся осей в символьически записанных уравнениях могут появляться коэффициенты, являющиеся функцией времени.

Такие символические операторные уравнения, несмотря на ограниченный смысл их с точки зрения непосредственного раскрытия в функции времени, дают удобную запись и в ряде случаев могут быть решены путем преобразования переменных, благодаря определенным условиям симметрии в машине.

4. Для удобства пользования символьической обработкой дифференциальных уравнений начальные условия рассматриваемого процесса всегда считаются нулевыми. Учет начальных условий проводится методом наложения.

5. Короткие замыкания могут быть просто считаны по предлагаемой методике при пользовании принципом наложения для случаев, когда параметры статических элементов системы постоянны во всех фазах. Несимметричные короткие замыкания также могут быть рассчитаны, рассматривая точку короткого замыкания как оператор напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности. При этом раскрытие операторных выражений может быть в общем виде представлено в функции времени только сходящегося ряда.

6. Система напряжений нулевой последовательности создает токи, не зависящие от роторных параметров машин и от скорости вращения, как при принятых допущениях н. с. нулевой последовательности в воздушном зазоре машин тока равна нулю.

Некоторые определения и обозначения

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

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

3. Система осей, вращающихся с положительной скоростью, равной единице, называется синхронной системой осей.

4. Величины в собственной системе осей характеризуются индексом s , в неподвижной системе осей — индексом σ , в синхронной системе осей — индексом u .

5. Реальная и мнимая оси в собственных осиях характеризуются индексами d и q , в неподвижных прямоугольных осиях — индексами a и b .

6. При отсутствии специального указания под системой осей понимается система прямоугольных осей.

7. Сопряженные комплексные величины обозначаются звездочками.

8. Под операторным изображением $f|p|$ функции $F|t|$ подразумевается изображение, соответствующее преобразованию

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

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

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

Основные положения. 1. Токи, потокосцепления и напряжения электрической машины, соответствующие вращающимся синусоидально распределенным 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, вращающихся с выбранной произвольной скоростью.

2. Решение дифференциальных уравнений, связывающих токи и напряжения в машине, существенно упрощается, если ввести понятия комплексных операторных сопротивлений.

При пользовании операторными комплексными сопротивлениями электрические системы, содержащие вращающиеся машины переменного тока, могут быть представлены эквивалентными схемами, изображенными на рис. 1, 2.

В этих схемах операторные сопротивления являются, как правило, комплексными величинами и получаются преобразованием исходных комплексных операторных уравнений к единой системе вращающихся осей, как указано ниже.

¹ В статье везде принято аргумент функции заключать в прямые скобки.

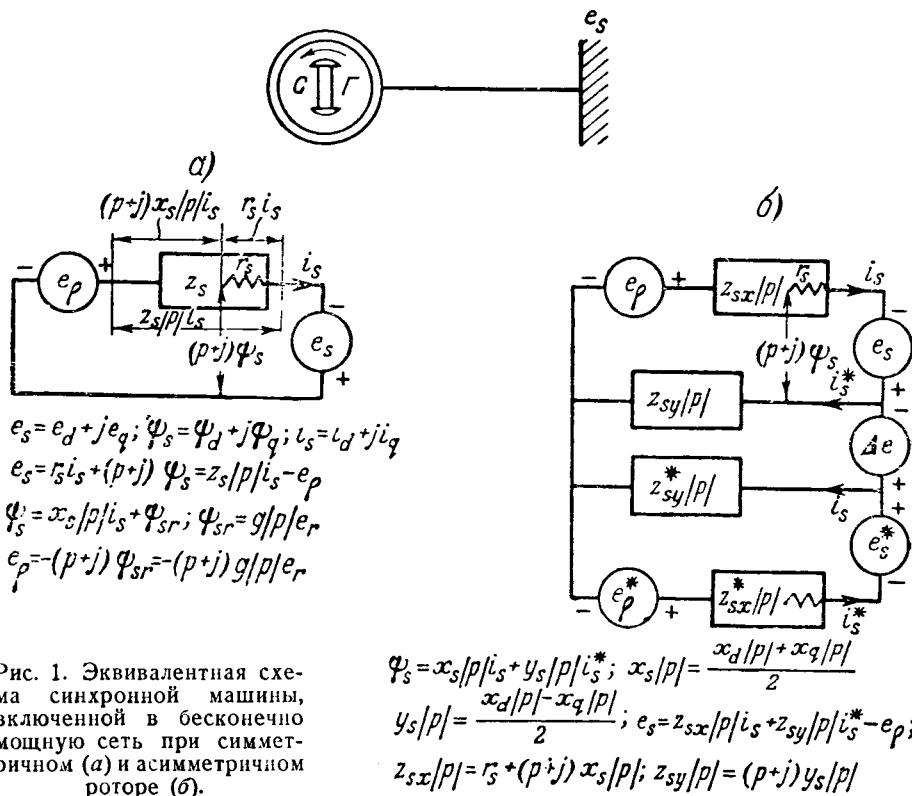


Рис. 1. Эквивалентная схема синхронной машины, включенной в бесконечно мощную сеть при симметричном (a) и асимметричном роторе (b).

Предлагаемый метод является обобщением символьических 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 $z|p + js|$, где s — скорость вращения выбранной системы осей по отношению к рассматриваемому элементу.

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

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

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 и индуктивностью взаимоиндукции 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 в $z_s|p| = r_s + (p + j\omega_r)x_s|p|$ вместо $z|p| = r + px|p|$ для трансформаторов.

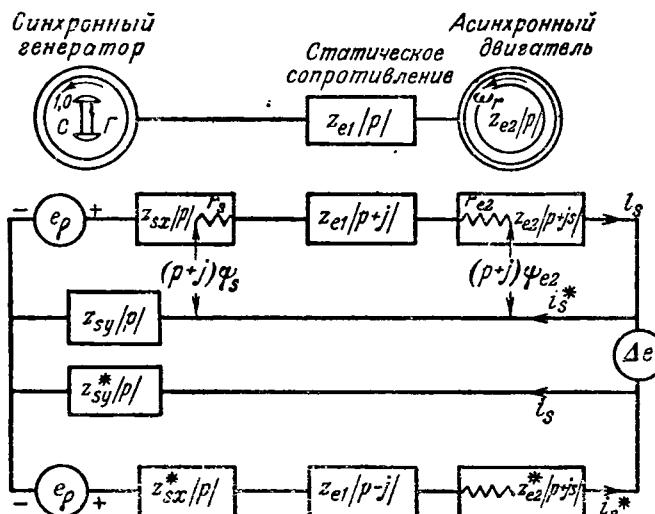


Рис. 2. Эквивалентная схема синхронной машины, работающей на изолированную нагрузку, состоящую из статического сопротивления и асинхронной машины.

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	$z = r$, $\Sigma e = \Sigma z i$	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, $\Sigma e = \Sigma z i$	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 статиче- электрической системе при напряжении в момент $t=0$ из нулевых начальных условиях. Начальных условий производится один вспомогательный	Эквивалентная электрическая система с операторными сопротивлениями	$z[p] = r + Lp + \frac{1}{Cp}$, $p \doteq \frac{d}{dt}$, $\frac{1}{p} \doteq \int dt$, $\Sigma e = \Sigma z i$.	Операторные выражения токов, потокосцеплений и напряжений, раскрываемые в функции времени по правилам операционного исчисления
Переходные процессы в симметрических многофазных системах, содержащие машины, при включении на- правленной и обратной последовательности. Процессы, связанные с изменением напряжения нулевой ветви машины, образуют изолированную систему, не связанную с остальными машинами	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 $\Sigma e = \Sigma z i$	Комплексные операторные выражения токов, потокосцеплений и напряжений, отнесенных к врачающимся осям. Реальные токи получаются как проекции полученных токов, потокосцеплений и напряжений на соответствующие врачающиеся оси
Переходные процессы в многофазных электрических системах, содержащих вращающиеся машины, обладающие асимметрией ротора при одинаковых напряжениях прямой и обратной 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 обмоток. Операторное сопротивление обмотки статора при одной системе обмоток в симметрическом роторе

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

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 взаимоиндукции;

x_r — реактивность самоиндукции обмотки ротора;

a_r , a'_r — коэффициенты затухания (обратные величины постоянных времени) обмотки ротора при замыкании

кнутой и разомкнутой обмотке статора соответственно

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

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

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

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

$$x_s |p| = x_s |p| + js_r |p|$$

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

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

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:

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

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

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} , ψ_{sn} — комплексные напряжения, ток и потокосцепления статора машины с индексом n :

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

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, имеющий операторное сопротивление

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

и параллельно трансформатору приключена емкость C ,

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

В неподвижной системе осей результатирующее 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 выражается 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 се-

ти. Пример. Асинхронный двигатель включается в бесконечно мощную сеть через емкое 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 $\omega_r = 0,95$. Емкость сопротивление $x_c = 0,45$. Ток статора

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

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:

$$i_s = e_s \left\{ \frac{(p + j)(p + 0,040)}{D|p|} - 1 \right\},$$

где

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

Напряжение

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

где e_{sm} — амплитуда напряжения сети;

τ_a — начальная фаза реального напряжения

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

Реальные фазовые токи i_a , i_b , i_c определяются как

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

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

Решение для рассматриваемого приложения 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 постоянной скоростью, равной единице, и имеющая в собственных осях операторные реактивности по прямой и поперечной осям $x_d|p|$ и $x_q|p|$, включена через промежуточное операторное сопротивление $z_{e1}|p|=r_{e1}+px_{e1}|p|$ 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 осей. Операторное сопротивление асинхронной машины $z_{e2}|p|$ выражено в осях, вращающихся вместе с ротором асинхронной машины.

Уравнение падения напряжения будет иметь

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

$$+ [z_{e2}|p| + js_{e2}]i_s,$$

где s_{e2} — скольжение асинхронной машины;

r_s — активное сопротивление статора синхронной машины;

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

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

$s=[g_s|p|]e_r$ — 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

$$z_x = r + (p+j)[x_s|p| + x_{e1}|p| + j] +$$

$$+ x_{e2}|p| + js_{e2}],$$

$$z_y = (p+j)y_s|p|,$$

$r=r_x+r_{e1}+r_{e2}$ — 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 $e_p = -(p+j\omega_r)\psi_s$; 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., $\Delta e = 2jy_s|p|i_d$, 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, $e_s = [z_{sx} |p - j\omega|] i_s + [e^{j\theta} z_{sy} |p + j\omega|] i_s^*$, 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 $\gamma_a = 20^\circ$:

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

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

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

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

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

Примем за первое приближение коэффициент при с обратным знаком:

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

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

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

$$- \frac{(-0,4 + j0,2)(0,1 + j2,05) + (-0,04 + j0,025)}{3(0,1 + j2,05)^2 - (0,2 + j4,10)(0,1 + j2,05)} + 0,4 + j0,2 = \\ = -0,1 - j2,05 - \frac{0,330 - j0,815}{-3,793 + j0,61} = 0,0185 - j2,246.$$

Найдя 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

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

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

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

Разделив $D|p|$ на $p - p_1 = p - [-0,016 - j2,22]$, находим 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 для 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 достаточно.

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

$$i_{s0} = e^{j0,05t} \left\{ \frac{1}{jx_d |j0,05| - jx_c} \right\} = \\ = e^{j0,05t} \left\{ \frac{j0,05 + 0,04}{j0,3 (j0,05 + 0,1) - j0,45 (j0,05 + 0,04)} \right\} = \\ = 4,525 e^{j(0,05t - 0,116)};$$

$$i_{s1} = \frac{e^{j0,05t}}{0,3} \left[\frac{(p_1 + j)(p_1 + j0,05 + 0,04)}{p_1 [(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)]} e^{p_1 t} \right] = \\ = 0,750 e^{j0,05t} e^{-0,016t + j(1,518 - 2,22t)};$$

$$i_{s2} = \frac{e^{j0,05t}}{0,3} \left[\frac{(p_2 + j)(p_2 + j0,05 + 0,04)}{p_2 [(p_2 - p_3)(p_2 - p_1)]} e^{p_2 t} \right] = \\ = 4,879 e^{j0,05t} e^{0,041t + j(1,882 - 0,06t)};$$

$$i_{s3} = -(i_{s0} + i_{s1} + i_{s2})_{t=0} e^{j0,05t} e^{p_3 t} = \\ = -5,731 e^{j0,05t} e^{-0,125t + j(1,016 + 0,23t)}.$$

Для определения фазных токов умножаем полученные комплексы токов на коэффициенты $e^{j(\omega_r t + \gamma_a)}$, $= e^{j(0,95 + 0,349)}$ и отделяем реальные части.

Получаем следующие выражения для составляющих тока в фазе a :

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

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

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

$$i_{a3} = -5,731 e^{-0,125t} \cos(78^\circ 10' + 1,23t).$$

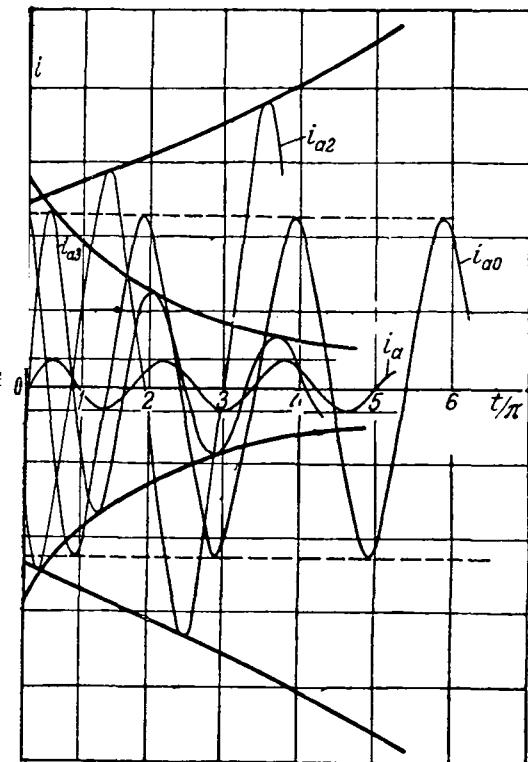


Рис. 3. Составляющие тока в фазе a статора асинхронной машины, включаемой в сеть через емкость.

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

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

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

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

Ток в цепи статоров при включении определяется уравнением

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

После

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

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

(см. рис. 2)

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

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

генератор — мощность 500 ква; $x_d = 1,0$; $x'_d = 0,2$; $x_q = x'_q = 0,65$; $\alpha'_{rd} = 0,005$ (т. е. $T'_d = 200$); $\alpha_{rd} = 0,001$ (т. е. $T_{d0} = 1000$); $r_s = 0,01$. Трансформатор — мощность 250 ква; реактивность 6%. Двигатель — мощность 100 ква; $x_a = 0,3$; $\alpha_a = 0,1$; $\alpha'_a = 0,01$; $r_a = 0,04$.

Двигатель имеет скольжение $s_e = -1,00$. Приведя параметры системы к единой мощности 500 ква, 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

$$p^2 + 1 = 0 \text{ и } x |p| = 0; \quad x^* |p| = 0 \text{ или } 2,045 p^2 + (0,157895 \mp j 2,045) p + (1,5945 \mp j 24,45) 10^{-4} = 0.$$

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:

а) определяем уточненные значения корней p_1 и p_2 ;

б) определяем установившийся ток i_{s0} соответствующий условию $p = 0$, и первую составляющую свободного тока i_{s1} , связанную с корнем p_1 ;

в) определяем вторую составляющую свободного тока i_{s2} пользуясь соотношением $(i_{s0} + i_{s1} + i_{s2})_{t=0} = 0$;

г) 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 токи 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

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

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:

$$x|0| = \frac{1,5945 - j24,45}{0,001(-j + 0,01)} 10^{-4} = 2,45 e^{j0,0552};$$

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

и, следовательно,

$$\begin{aligned} i_{s0} &= \frac{[0,21 - j2,45 e^{-j0,0552}] e_s - j0,175 e_s^*}{5,9722 + 0,21^2 - 0,21 \cdot 2,45 \cdot 0,11} = \\ & = (0,0109 - j0,411) e_s - j0,0294 e_s^* = \\ & = 0,411 e_s e^{-j1,5446} - j0,0294 e_s^*. \end{aligned}$$

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

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

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} :

$$\begin{aligned} i_{s2} &= -(i_{s0} + i_{s1})_t = 0 e^{p_1 t} = -(0,02762 + j0,0788) e_s e^{-0,001437t} - \\ & \quad \times e^{-0,001437t} - j0,0294 e_s^* e^{-0,001437t} \end{aligned}$$

или

$$i_{s2} = -e^{-0,001437t} \{0,0841 e_s e^{j1,2290} - j0,0294 e_s^*\}.$$

Начальные условия включения. При 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 $e_a = e^{j(t + 0,698)} (e_s = -j)$.

Фазные токи. Ток в фазе a

$$i_a = Re \left[\frac{i_s}{e_s} e^{j(t + 0,698)} \right];$$

аналогично

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

$$i_c = Re \left[\frac{i_s}{e_s} e^{j(t + 0,698 - 4\pi/3)} \right].$$

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 системы (пример).

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

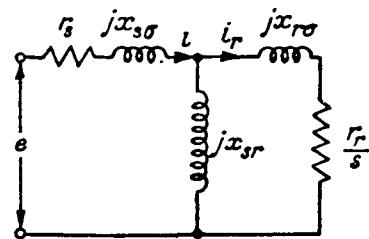


Рис. 4. Эквивалентная схема асинхронной машины, работающей в установившемся режиме.

Схема которой для установившегося режима представлена на рис. 4. Этой эквивалентной схеме при $r_s = 0$ соответствует круговая диаграмма, представленная рис. 5.

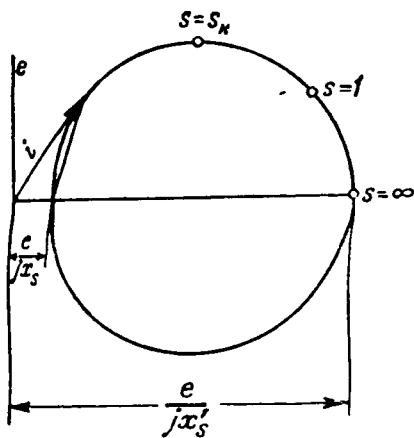


Рис. 5. Круговая диаграмма асинхронной машины при $r_s = 0$.

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

$\frac{x_{s\sigma} x_{r\delta}}{x_r} = \alpha x_s$ — переходная реактивность обмотки статора, соответствующая результирующей реактивности по эквивалентной схеме при $s \rightarrow \infty$; $\alpha = 1$ —

коэффициент рассеяния; $x_r = x_{r\sigma} + x_{r\delta}$ — полная реактивность обмотки ротора.

Эквивалентная схема, представленная на рис. 4, может для определения тока статора i заменена эквивалентной схемой рис. 6, а, где эквивалентная комплексная емкость обмотки статора для установившегося режима $x_s/j\omega$ определяется в соответствии со схемой рис. 6, б и равна

$$x_s/j\omega = x_{s\sigma} + \frac{x_{s\delta} (x_{r\sigma} + r_r/j\omega)}{x_r + r_r/j\omega} = x_s \frac{j\omega + \alpha'_r}{j\omega + \alpha_r}, \quad (1)$$

$\alpha'_r = \frac{r_r}{x_r}$ и $\alpha_r = \frac{r_r}{\alpha x_r} = \frac{r_r}{x_r}$ — коэффициенты затухания ротора при разомкнутой и замкнутой обмотке соответственно.

Установившийся режим ток статора i , соответствующий круговой диаграмме рис. 5, будет:

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

— скорость вращения ротора в относительных единицах.

Известно, комплексное выражение для установившегося тока в цепи, характеризуемой операторным сопротивлением x_p , получают при наличии приложенного действующего напряжения с угловой частотой ω , подставив в выражение $x_p |p|$ величину $j\omega$ вместо p . Если

втором виде ток i был равен $i_s = \frac{e_s}{x_p |p|}$, где $e_s = e_m e^{-j(\omega t + \gamma_0)}$ — комплекс, реальной частью которого является приложенное напряжение $e_s = e_m \cos(\omega t + \gamma_0)$, то иное выражение установившегося тока будет

$$i_{a\text{уст}} = \frac{e_s}{x_s |j\omega|}. \quad (3)$$

Мгновенное значение установившегося тока $i_{a\text{уст}}$ будет равно реальной составляющей по комплексному выражению для тока $i_{a\text{уст}}$.

Подведенное к асинхронному двигателю напряжение имеет частоту, равную единице, и под e мы пони-

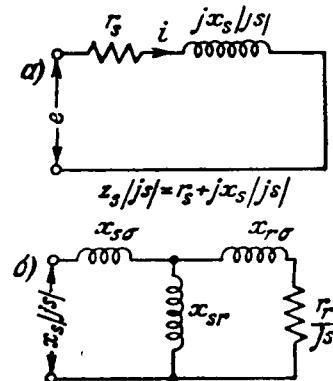


Рис. 6. Эквивалентные схемы асинхронной машины, работающей в установившемся режиме.

маем комплекс $e_s = e_m e^{-j(\omega t + \gamma_0)}$, соответствующий реальным приложенным напряжениям прямой последовательности с мгновенным значением напряжения в фазе a , равным $e_s = e_m \cos(\omega t + \gamma_0)$, то, зная комплексное выражение для установившегося тока $i_{a\text{уст}}$, можно перейти к общему выражению для тока статора в переходном режиме, произведя обратную замену $j\omega$ на p . Ощий 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

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

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

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

где

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

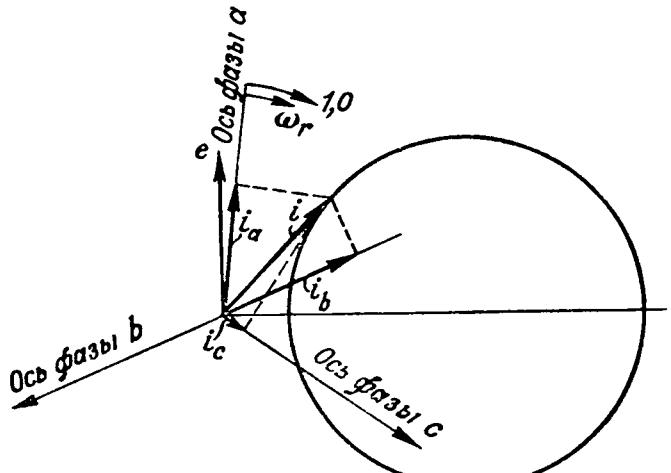


Рис. 7. Определение фазных токов и напряжений в статоре из круговой диаграммы.

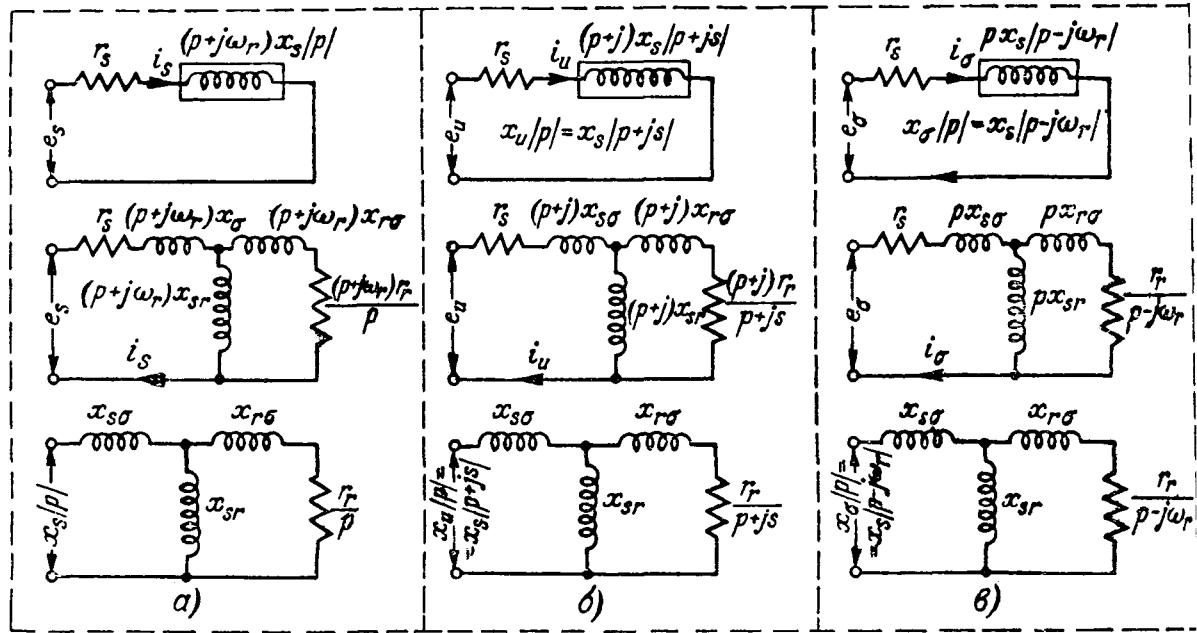


Рис. 8. Эквивалентные схемы операторного сопротивления и операторной реактивности обмотки статора, выраженных: а) — в собственных осях $z_s = r_s + (p + j\omega_r) x_s |p|$; б) — синхронных осях $z_u |p| = r_s + (p + j) x_u |p|$ и в) неподвижных осях $z_s |p| = r_s + px_s |p|$.

Наконец, если рассматривать представление на круговой диаграмме напряжение e , как напряжение $e_a = e_0 e^{-j(t+\tau_0)} = e_m$, 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 не-подвижных 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 комплексов на три оси a , b , c , расположенные под углами в 120° (рис. 7). Характер выращенной 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

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

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

Нетрудно проверить, что из операторных реакций $x_s|p|$; $x_u|p|$ и $x_o|p|$ — представленных в схеме рис. 8, при подстановках: $p = js$ — для собственных осей $p = 0$ — для синхронных осей и $p = j\omega$, — для неподвижных осей получается одна и та же комплексная реакция для установившегося режима $x_s|js|$.

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

На рис. 9, б представлен пример использования эквивалентной схемы для графического исследования устойчивости системы с точным учетом основных параметров, включая r_s . В качестве исходной кривой А ретсяальная 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 ра-

Величина $jx_s |j\omega|$ представляется обратной кривой, причем величину s на ней заменяют на ω , поскольку $1 - \omega_r$ 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 $\omega + \omega_r$, получаем в
вую C . Вычтя затем величину $j \frac{1}{(\omega + \omega_r) x_c}$ и сдви-
вниз начало координат на величину r_s , как представле-
на рис. 9, б, получаем кривую D изменения результирую-
щегося сопротивления рассматриваемой систе-
 $x_s |j\omega| = r_s + j(\omega + \omega_r) x_s |j\omega| + \frac{1}{j(\omega + \omega_r) x_c}$, при изме-
нении частоты и подаваемого напряжения.

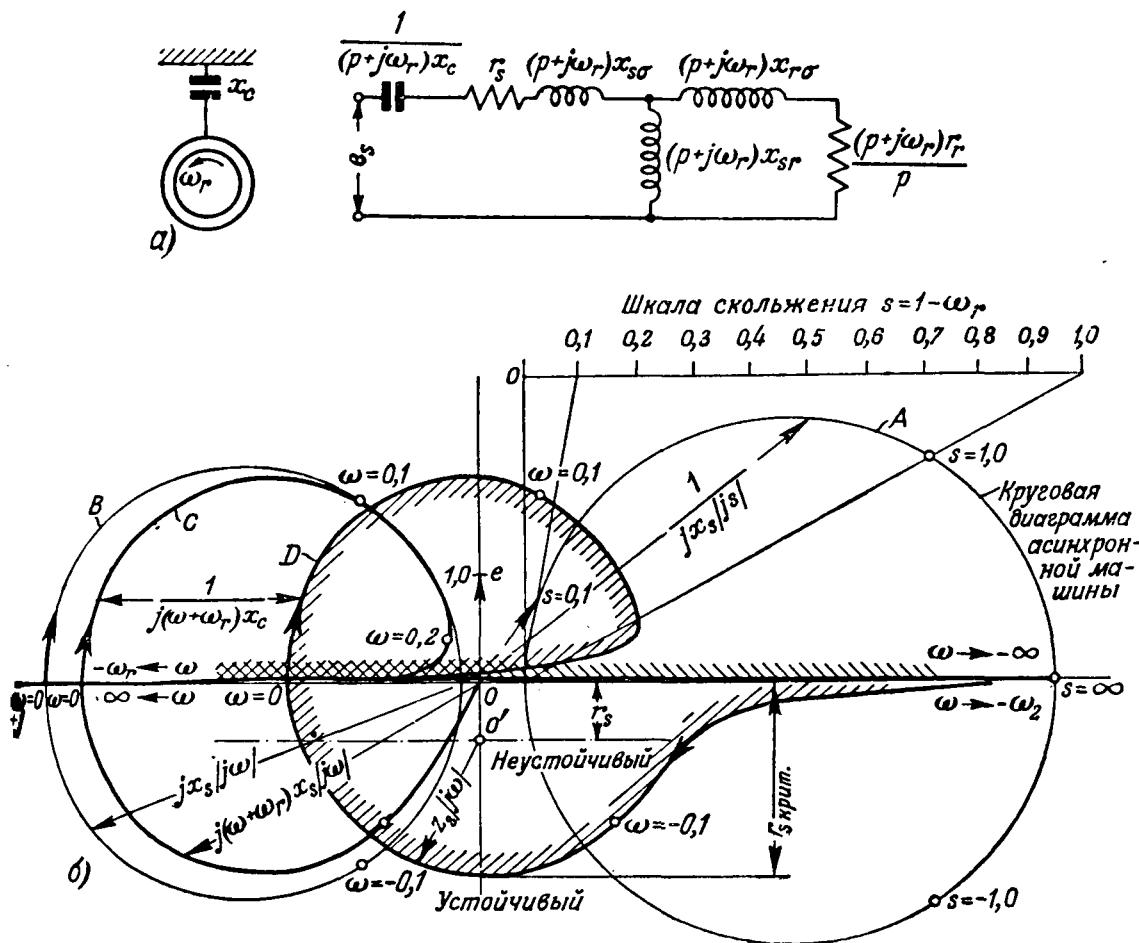


Рис. 9. Графическое исследование условий устойчивости работы асинхронного двигателя, включенного через сеть на емкость.

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

Параметры:

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

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

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

Заштрихован 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 при $r_s > r_{s\text{ крит.}} = 1,70$.

если увеличивать x_c , то кривая D будет сдвигаться вправо, и критическое значение активного сопротивления статора $r_{c, \text{крит}}$ 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 двухмерных электрических моделях

Кандидат техн. наук, доц. И. И. ШТЕЙН

Московский энергетический институт им. Молотова

Введение. Точное решение некоторых краевых задач, связанных с исследованием процессов, протекающих в электромагнитном поле в двухмерной 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 двухмерных 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

Выявлены 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 случае в декартовой системе координат на скалярные компоненты

Можно показать, нако, что решение двухмерных моделях краевых задач рассматрив

мого типа может быть получено при однократном измерении одновременно для всех компонент электрической и магнитной напряженности 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 двухмерные электрические сетки для решения некоторых вопросов распространения электромагнитных волн в волноводах. Рассмотрение опубликованных в 1943—1944 гг. моделей Крона приводит к выводу, что они по сути ничем не отличаются от моделей Л. И. Гутенмахера, разработанных и опубликованных еще в 1940 г. [Л. 1].

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

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

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

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

$$\operatorname{div} \bar{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0,$$

$$\operatorname{div} \bar{H} = \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0,$$

$$E_y = E_z = H_x = 0; \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0.$$

¹ Вопрос был освещен в докладе автора на Всесоюзном совещании по электромоделированию в 1949 г.

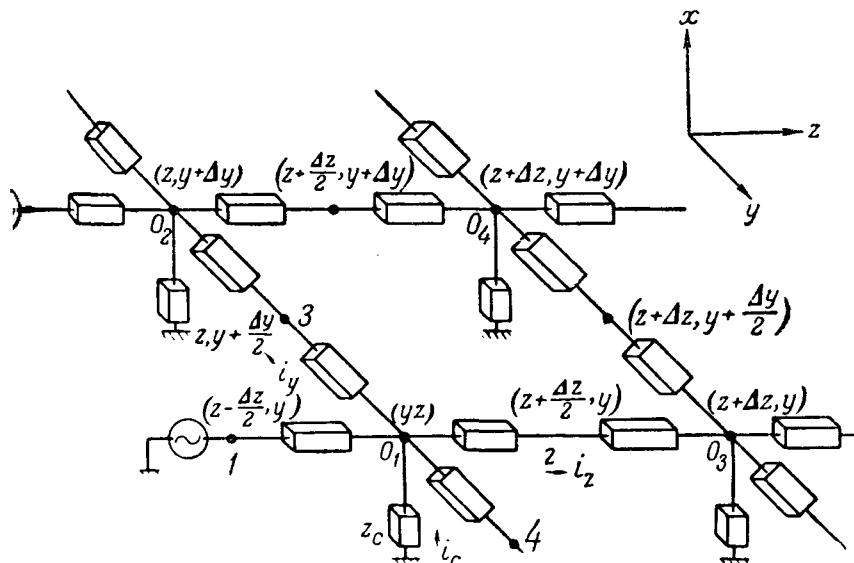


Рис. 1. Участок электрической модели.

бразование выражений (1) \div (5) дает возможность разделить компоненты поля. При этом для компонента, как известно, подчиняется первому 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_{mo} и H_{mol} . Не-
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 волн-

уимся к рис. 1, представляющему собой шую часть электрической модели про-
тва. Рассматриваемая часть модели имеет
ко узловых точек (O_1 , O_2 и т. д.). На-
ти в узловых точках будем обозначать
и. Сочетание полных сопротивлений
той или иной узловой точки сетки рис. 1
являет электрическую модель того или
элементарного параллелепипеда простран-
ством $\Delta P = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ (рис. 2), для кото-
рого рассматриваемая двухмерная крае-
чка.

на основании первого закона Кирхгофа
показать, проделав несложные преобра-
зования, что для произвольной узловой точки
(например для точки O_1) справедливо
уравнение

$$\frac{\Delta j_z}{\Delta z} + \frac{\Delta j_y}{\Delta y} = \frac{i_c}{\Delta P} = \frac{u}{z_c} \cdot \frac{1}{\Delta P}. \quad (7)$$

Соотношения токов соответственно:

$$i_y = \frac{i_y}{\Delta x \cdot \Delta z} \text{ и } j_z = \frac{i_z}{\Delta x \cdot \Delta y}.$$

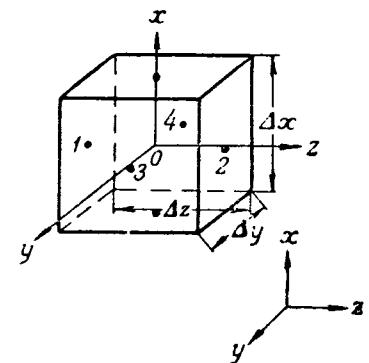


Рис. 2. Элементарный параллелепипед пространства.

Нетрудно заметить, что падение напряжения на произвольном n -ном элементе модели в направлении оси 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.

$$\frac{\Delta_y u}{\Delta y} = i_y z_y, \quad (8)$$

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 падение 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 определенным 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 критерия подобия.

На аналогичной модели могут быть исследованы компоненты поля, соответствующие нам типа H_{mo} и H_{mol} . Необходимо только ввести координаты u ввести координату x .

Электрические волны типа E_{oi} и E_{oil} магнитные волны типа H_{oi} и H_{oil} , которые могут быть 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 $E_r = H_\varphi = 0$.

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 исследований 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 оси 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:

$$\begin{aligned} r \frac{\Delta j_z}{\Delta z} + \frac{\Delta j_r}{\Delta r} &= r \frac{u}{z_c} \cdot \frac{1}{\Delta P}, \\ r \frac{\Delta_r u}{\Delta r} &= j_z z, \\ \frac{\Delta_z u}{\Delta z} &= j_z z. \end{aligned}$$

Сравнивая эти уравнения с известными уравнениями поля в цилиндрической системе координат, можно показать, что для волн H_{oi} распределение плотностей токов в модели j_z и распределение величин напряжений в узловых точках u дают соответственно приближенное значение 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 напряжения в узловых точках модели u соответствует компонента

2. Определение критериев подобия. Метод 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 критерии подобия из уравнений поля и уравнений модели должны быть тождественными. Нельзя убедиться, что при использовании линейной системы координат тождественность соответствующих критериев подобия имеет место.

$$\left[\frac{\epsilon_0 \mu_0 l_o^2}{c_o^2 t_o^2} \right] = \left[\frac{L_m C_m l_m^2}{t_m^2} \right], \quad (19)$$

$$\left[\frac{\epsilon_0 \mu_0 l_o^2}{c_o^2 t_o^2} \right] = \left[\frac{L_m l_m^2}{R_m t_m} \right] \text{ при } R_m = 0. \quad (20)$$

Индекс o относится к физическим параметрам поля (образца), индекс m — к параметрам модели. l — базисная длина, принятая одинаковой во всех координатных осей.

В электрической модели число элементов n или ином направлении соответствует числу l_m , равной здесь h , где

$$h = \Delta x = \Delta y = \Delta z.$$

Чем больше элементов n модели будет приходиться 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 искомых компонент E , в соответствующих точках пространства. Номинальную длину l_0 удобно считать единицей длины волны, процесса в образце, независимо от практической величины длины волны. В таком случае номинальную длину l_m в модели удобно представить как n — число элементов модели, приходящихся на единицу длины волны l_0 . Аналогично условиям (19) и (20) может быть исана тождественность критериев подобия при использовании цилиндрической системы координат.

4. Обеспечение на модели граничных условий исследуемой области поля. Исследуемые области поля обычно представляют собой пространства, частично или полностью ограниченные металлическими поверхностями (например: волны, 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 исследование электромагнитного поля в ней производится решением системы уравнений Максвелла с учетом граничных условий.

Если ограничивающую металлическую поверхность полагать идеальной, то вектор \bar{E} должен быть перпендикулярен к поверхности волны, а вектор \bar{H} параллелен ей, т. е. все тензорные компоненты электрического поля и все нормальные компоненты магнитного поля

в любой точке поверхности стенок исследуемой области должны быть равны нулю. Так, например, для волн типа H_{01} и H_{011} $E_{x_{zp}} = H_{y_{zp}} = 0$, 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:

$$i_{zp} = i_{zzp} = 0.$$

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 волны типа H_{01} при

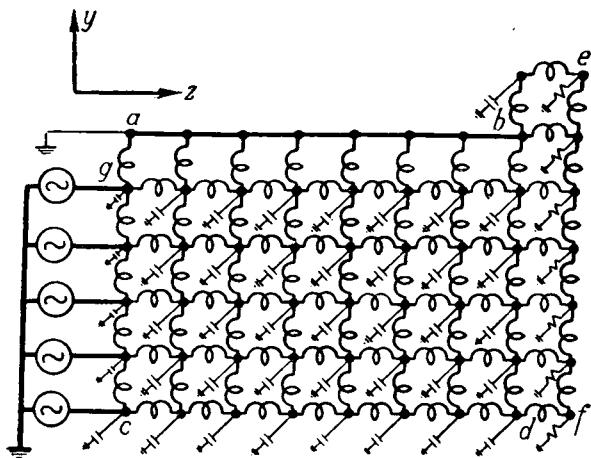


Рис. 3. Двухмерная электрическая модель волновода.

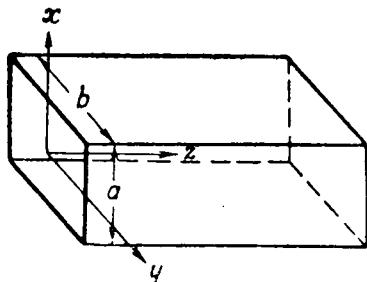


Рис. 4. Волновод прямоугольного сечения.

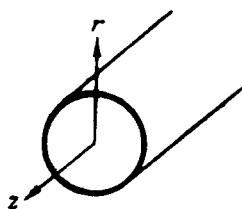
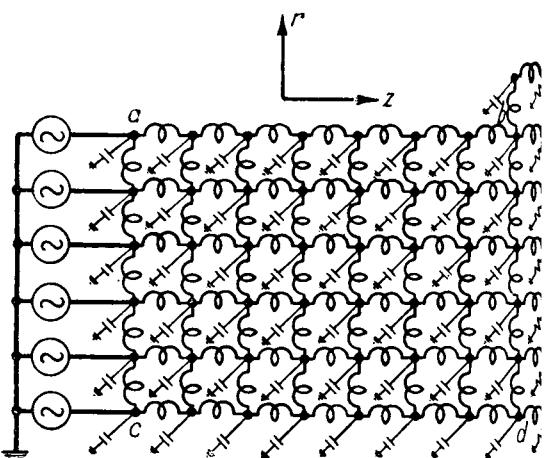
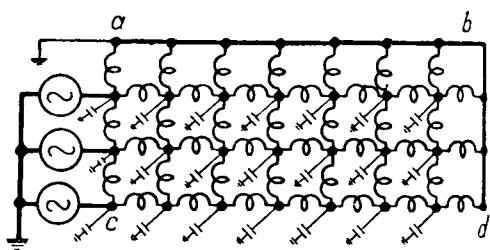
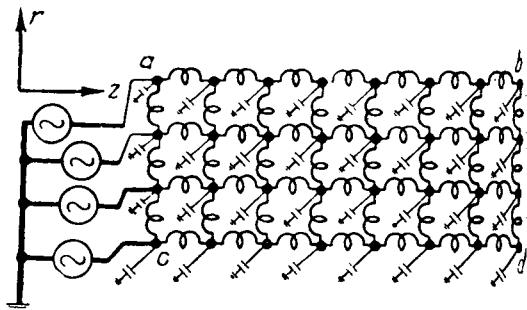


Рис. 5. Цилиндрический волновод круглого сечения.

отсутствии потерь в диэлектрике. Границные 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_{mo} и H_{ol} . При этом для волн H_{mo} ось u должна быть заменена осью x . Для волн H_{ol} ось u 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 волн типа E_{ol} .Рис. 7. Двухмерная электрическая модель цилиндра круглого сечения для исследования волн типа H_{oll} .Рис. 8. Двухмерная электрическая модель цилиндра круглого сечения для исследования волн типа E_{oll} .

в направлении оси r переменными величинами в функции от r . В этом случае рис. 3 будет представлять собой модель цилиндрического волновода круглого сечения, изображенного рис. 5. То же относится к рис. 6, представляющему собой модель волновода, приведенную на рис. 5, для исследования волн типа E_{ol} . Использование в моделях рис. 3 и 6 заключается 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_{01} соответственно при отсутствии потерь в магнетике. В этих моделях самоиндукции и потоки в направлении оси r также являются ненесущими величинами.

Можно привести очень большое число всяких примеров построения аналогичных схем, но мы полагаем, что приведенных схемочно для уяснения принципа и методики ютченко здесь принципов моделирования. заключение автор считает своим долгом сказать, что им были получены ценные советы проф. Л. И. Гутенмакера.

◆ ◆ ◆

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 склоненный сердечник, разделенные воздушным зазором, не получил исчерпывающего освещения.

Стояние вопроса. Известны две противоположные точки зрения на структуру магнитного потока на различных участках магнитопровода. 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 (рис. 1, а). Вторая точка зрения [Л. 4] полагает, что одновременно существует неоднородное распределение потока в массивной и равномерное распределение на всех остальных участках магнитной цепи (рис. 1, б).

Обоснование этой точки зрения предполагает, что на границе массивного участка воздушного зазора существует достаточно тонкий «идеальный» ($\rho = \infty$ и $\mu = \infty$), в котором идет изменение структуры магнитного поля.

Представления приближенные, так учитывают изменение индукции в двух измерениях. В практике расчетах приходится удовлетворять методами расчета, основанными на таких ограниченных представлениях.

Основу излагаемых ниже методов положено представление со-

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.

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-

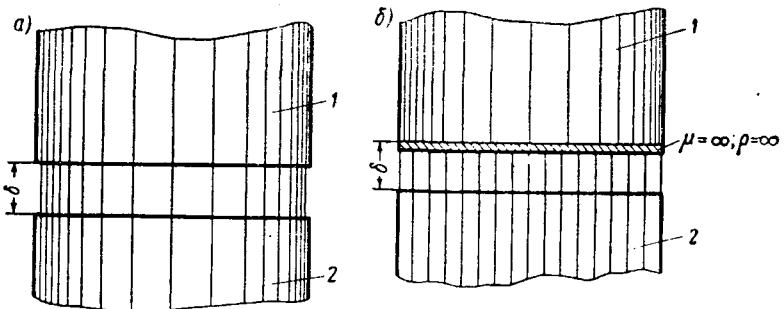


Рис. 1. Структура магнитного поля.

1 — массивная часть сердечника; 2 — расслоенная.

Литература

1. Л. И. Гутенмакер. Электрическое моделирование физических явлений. Электричество, № 5, 1940.
2. Л. И. Гутенмакер. 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]

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;

¹ С формальной стороны задача может быть решена для сердечника с эллиптическим сечением. Для инженерных расчетов это решение не пригодно ввиду его сложности.

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 обмоткой 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 находится в геометрическом центре сердечника;

$\rho = (2 \div 2,5) \cdot 10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}^2/\text{см}$ — удельное сопротивление материала сердечника;

δ' — приведенный воздушный зазор, эквивалентный по магнитному сопротивлению всему магнитному полуводу;

σ — коэффициент рассеяния; $\sigma = \frac{L_s + L_0}{L_0} > 1$;

T_0 — электромагнитная постоянная времени 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 (во времени 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 намагничивающей обмотки, и индукции B_2 , вызванной вихревыми токами. В этом случае уравнение (1) может быть записано в виде:

$$\frac{\partial^2 B_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_2}{\partial y^2} = \frac{\mu_0 l_m}{\rho \delta'} \frac{\partial}{\partial t} (B_1 + B_2).$$

Общий поток определяется интегрированием по перечному 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 использовать условием равновесия напряжения 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:

$$B_1 + \sigma T_0 \frac{dB_1}{dt} + \frac{T_0}{Q} \frac{\partial}{\partial t} \int_Q B_2 dQ = B_{10}. \quad (6)$$

После введения в уравнения (2) и (6) оператора и совместных преобразований, получим следующее операторное уравнение относительно B_2 :

$$\frac{\partial B_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_2}{\partial y^2} - \frac{\mu_0}{p} \cdot \frac{I_m}{\delta} p B_2 = \frac{\mu_0}{p} \cdot \frac{I_m}{\delta} \frac{p}{1 + \sigma T_0 p} \times \\ \times \left[B_{10} - \frac{T_0 p}{Q} \int_Q B_2 dQ \right]. \quad (7)$$

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 уравнении 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 $\frac{\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right)}{\varphi(q)}$ и $1 - A(p)$ характеризуют изменения 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

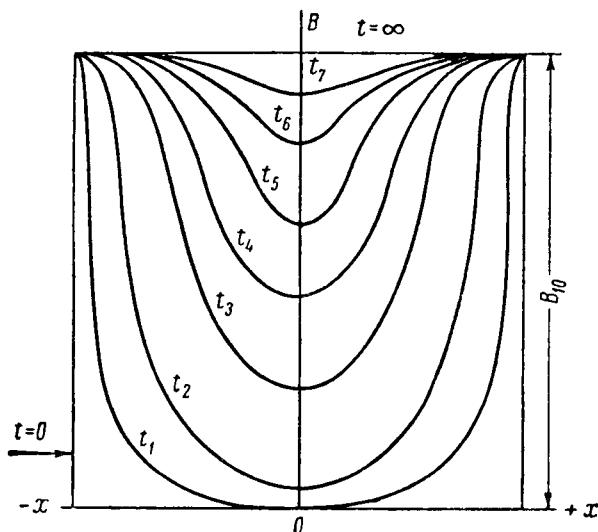


Рис. 2. Распределение индукции по сечению сердечника для различных моментов времени процесса возбуждения

и эквивалентного ему ромба

$$Q = \frac{ab}{2} = a'b' \text{ и } \frac{a'}{b'} = \frac{a}{b};$$

и, следовательно,

$$\left. \begin{array}{l} a = a' \sqrt{2}, \\ b = b' \sqrt{2}. \end{array} \right\} \quad (8)$$

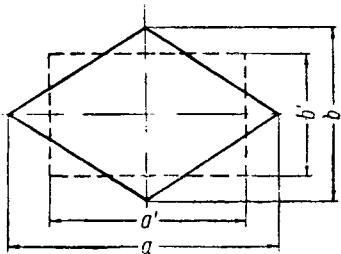


Рис. 3.

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:

$$\varphi\left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2}\right) = \cos\left[q\left(\pm \frac{x}{a/2} \pm \frac{y}{b/2}\right)\right]. \quad (9)$$

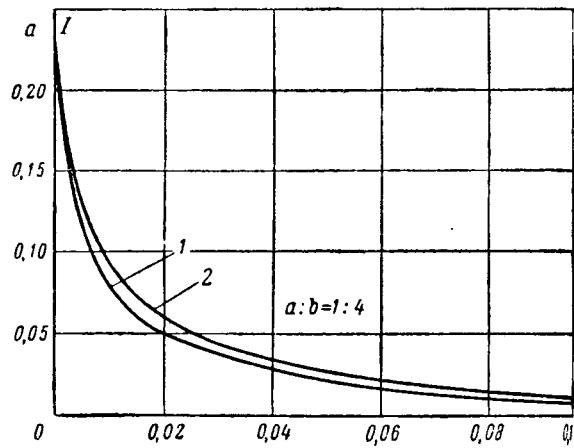


Рис. 4. Затухание тока при различной форме массивного сердечника.

1 — ромб, $I_0 = 0,22 \text{ а}$; 2 — прямоугольник, $I_0 = 0,226 \text{ а}$.

Знаки в скобках выбираются различными для каждого квадранта — в соответствии с показанными на рис. 5 уравнениями прямых контуров 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 одному квадранту отдельно):

$$A(p) = \frac{\int \cos\left[q\left(\frac{x}{a/2} + \frac{y}{b/2}\right)\right] dQ}{Q \cos q} +$$

$$+ \frac{\int \cos\left[q\left(-\frac{x}{a/2} + \frac{y}{b/2}\right)\right] dQ}{Q \cos q} +$$

$$+ \frac{\int \cos\left[q\left(-\frac{x}{a/2} - \frac{y}{b/2}\right)\right] dQ}{Q \cos q} +$$

$$+ \frac{\int \cos\left[q\left(\frac{x}{a/2} - \frac{y}{b/2}\right)\right] dQ}{Q \cos q};$$

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 (10) оператор

$$p = -\frac{q^2}{T_s}, \quad (11)$$

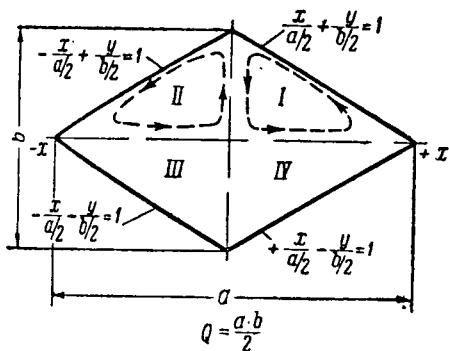


Рис. 5.

подставляя значение операторной функции в уравнения (XII), (XIII), получим:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{1 - (\sigma - 1) \frac{T_0}{T_s} q^2 - 2 \frac{T_0}{T_s} \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q}}, \quad (12)$$

$$= \frac{2 \frac{q \sin q + \cos q - 1}{q^2 \cos q}}{1 - (\sigma - 1) \frac{T_0}{T_s} q^2 - 2 \frac{T_0}{T_s} \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q}}. \quad (13)$$

Числение временных функций может быть проведено 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 оператором соотношением (11).

Подставив в (14) значения $Y(q)$ и $Z(q)$ из (12) и (13), получим следующие выражения для $f(t)$ возбуждения и потока в функции времени:

$$= 1 - \frac{T_s}{T_0} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{e^{-q_v t}}{q_v \left[(\sigma - 1) q_v + \frac{q_v - (1 - \cos q_v) \sin q_v}{\cos^2 q_v} \right]}, \quad (15)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = 1 -$$

$$= \frac{(T_s/T_0)^2}{T_0} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\left[1 - \frac{q_v^2 (\sigma - 1)}{T_s/T_0} \right] e^{-q_v t}}{q_v^3 \left[(\sigma - 1) q_v + \frac{q_v - (1 - \cos q_v) \sin q_v}{\cos^2 q_v} \right]}, \quad (16)$$

$$\gamma_v = \frac{q_v^2 \sigma}{T_s/T_0}; \quad (17)$$

$$T = \sigma T_0. \quad (18)$$

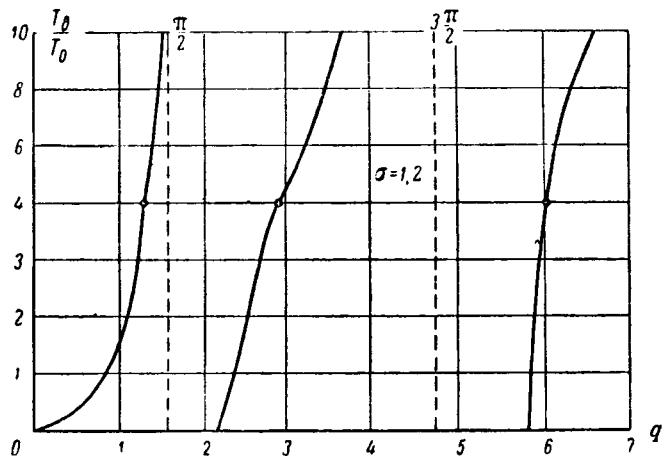


Рис. 6. Графическое решение определяющего уравнения $T_s/T_0 = (\sigma - 1) q^2 + 2 \frac{q \sin q + \cos q - 1}{\cos q}$.

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

$$T_s = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{I_m}{\delta'} \cdot \frac{Q}{2 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)} \text{ и } T_0 = \frac{\mu_0 w^3 Q}{\delta' R},$$

то их отношение оказывается равным:

$$\frac{T_s}{T_0} = \frac{I_m R}{2 w^3 \rho \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)}. \quad (20)$$

Для инженерных целей обычно наиболее интересной является зависимость общего потока Φ от времени. Согласно уравнению (16) эта зависимость может быть записана в виде:

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = 1 - \sum_{v=1}^{\infty} C_v e^{-q_v \frac{t}{T_s}}, \quad (21)$$

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:

$$\frac{\Phi - \Phi_n}{\Phi_{10} - \Phi_n} = 1 - \sum_{v=1}^{\infty} C_v e^{-\gamma_v \frac{t}{T}}, \quad (23)$$

где Φ_n — значение потока при $t = 0$.

Процесс гашения поля описывается уравнением (23) при $\Phi_{10} = 0$. В этом случае

$$\frac{\Phi}{\Phi_n} = \sum_{v=1}^{\infty} C_v e^{-\gamma_v \frac{t}{T}}. \quad (24)$$

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_s/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_s/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

$$\sum_{v=1}^6 C_{v0} = 0,9337.$$

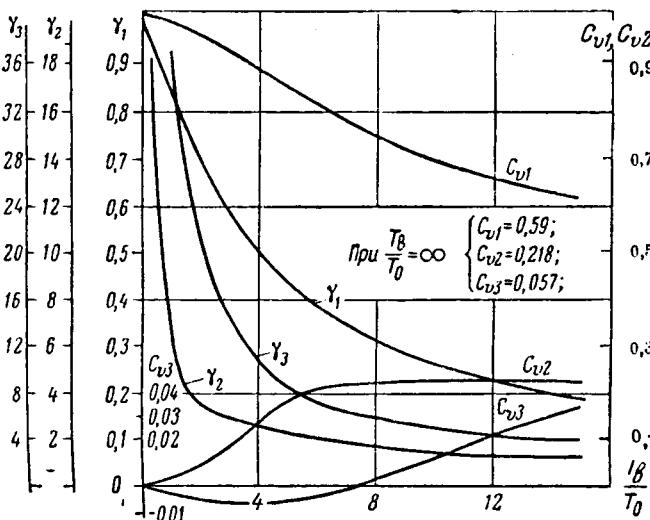


Рис. 7. Определение коэффициента γ и C_v .

Указанные выше значения коэффициентов (при $T_0 = 0$) для сердечника с сечением в ромба интересно сравнить с значениями C_v 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 получают 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, выраженных 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 $\frac{T_s}{T_0}$, место размещения обмотки возбуждения (на расслоенной части сердечника или на массивном ярме) и т.д. При опытах снимались осциллограммы тока в обмотке возбуждения и э.д.с. измерительной обмотки. Время вспышки потока от времени определялось гравиметрическим интегрированием.

Анализ осциллограмм показал, что характер процессов установления потока в большой степени зависит от места расположения обмотки возбуждения. Если обмотка возбуждения расположена на массивном ярме, то вихревые токи могут оказывать существенное влияние на процессы в установлении и гашении 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 (21)], 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 массивном ярме.

В результате экспериментов, относящихся к последнему случаю, было найдено следующее:

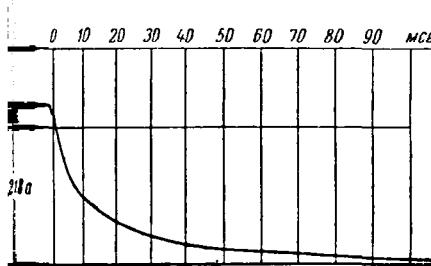


Рис. 8.

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 сравнительно больших соотношениях $\frac{T_s}{T_0}$ может быть с точностью до 5—7% описан экспоненциальной зависимостью

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}.$$

Надо заметить, что зависимость тока возбуждения от времени во всех случаях значительно резче отличается от экспоненты, чем же зависимость для потока. Эта особенность рассматриваемых процессов может быть обозначена, исходя из уравнения

$$I = \frac{U - \omega \frac{d\Phi}{dt}}{R}.$$

Незначительное отклонение от экспоненты для $\Phi(t)$ 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 пол оценки влияния вихревых токов на переходные процессы путем сравнения статической динамической (построенной по осциллограмме) и намагничивания. 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. Ярмо—сплошное квадратного сечения $2,9 \times 2,9$ см, сталь с удельным сопротивлением $\rho = 2,61 \cdot 10^{-5}$ ом·см²/см. Средняя ширина силовой линии в ярме $l_m = 7,7$ см.

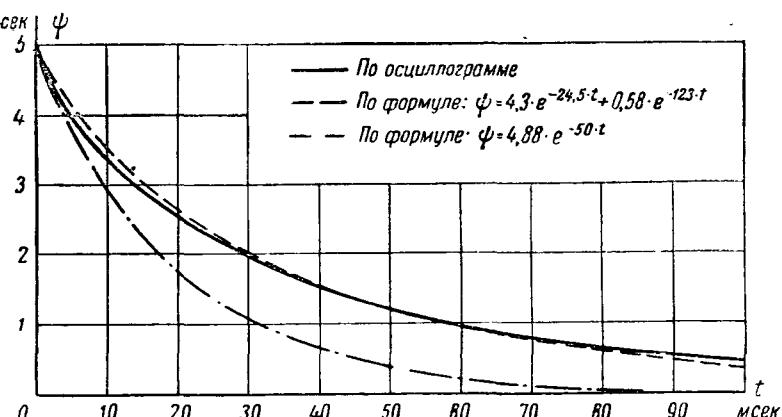


Рис. 9. Сравнение экспериментальных и расчетных данных.

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 потокосцеплений 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 потокосцеплений от времени должна быть записана в виде:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-\frac{t}{T}} = 4,88 e^{-\frac{t}{0,02}}.$$

На рис. 9 эта кривая показана пунктиром с точкой.

Для расчета $\Psi(t)$ с учетом вихревых токов по формуле (20) находим:

$$\frac{T_s}{T_0} = \frac{l_m R}{2 \cdot \omega^2 \rho \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)} = \frac{7,7 \cdot 1120}{2 \cdot 4500^2 \cdot 2,61 \cdot 10^{-5} (1 + 1)} = 4,09.$$

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 потокосцеплений 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 не значительное 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

$$q^2 = - \frac{\mu_0}{\rho} \frac{l_m}{\delta'} \cdot \frac{ab}{4 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)} \cdot p.$$

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 и магнитную системы, обусловленную вихревыми токами. На это новшество T_0 называют постоянной времени вихревых токов.

Возвращаясь к уравнению (7), запишем его решением 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 о 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 висеть от координат.

Обозначим $\varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right) = \varphi(q)$, и на основе (VI) найдем:

$$B_2 = F(p) \cdot \left[1 - \frac{\varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right)}{\varphi(q)} \right].$$

Частный интеграл теперь может быть найден из уравнения (7) путем подстановки в него значений членов производных индукции B_2 и интеграла $\int_Q B dQ$.

После преобразования найдем:

$$F(p) = - \frac{B_{10}}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)},$$

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 (6) легко определяются все остальные переменные в функции оператора

$$\frac{B_2}{B_{10}} = - \frac{1 - \varphi \left(q \cdot \frac{x}{a/2}, q \cdot \frac{y}{b/2} \right)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)} \cdot \frac{1}{\varphi(q)},$$

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_{10}} = \frac{\int_Q B_2 dQ}{\Phi_{10}} = \frac{1 - A(p)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)},$$

$$\frac{B_1}{B_{10}} = \frac{I}{I_0} = \frac{\Phi_1}{\Phi_{10}} = \frac{1}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)}, \quad (\text{XII})$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_{10}} = \frac{A(p)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)}, \quad (\text{XIII})$$

$$\frac{B}{B_{10}} = \frac{\varphi \left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2} \right)}{1 + (\sigma - 1) T_0 p + T_0 p A(p)} \cdot \frac{1}{\varphi(q)}. \quad (\text{XIV})$$

становимся на некоторых свойствах операторных

$$A(p) \text{ и } \varphi \left(q \frac{x}{a/2}, q \frac{y}{b/2} \right).$$

Как видно из (IX), $A(p)$ является соотношением среднего значения функции, удовлетворяющей однородному уравнению, и значения этой функции на контуре. Если в контуре 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 экспоненциальному 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

Введение. Расчет собственных и взаимных индуктивностей проводов и групп сложной формы и со значительными настями. Общее реше-
ние задачи известно для прямолиней-
ных проводов и для кон-
составленных из прямолинейных участков [2].

Собственные и взаимные индуктивности прямолинейных проводов, как правило, не выражаются в конечном виде через геометрические величины определяющие их размеры и взаимное положение. Но даже в тех случаях, когда имеются формулы для индуктивностей могут получены, эти формулы большей частью являются сложны, и расчет по ним требует значительного времени. Особенно неудобны формулы расчета взаимной индуктивности проводов кругов, размеры которых значительно меньше расстояний между ними. В этом случае отдельные члены, через которые выражается взаимная индуктивность, обычно во много раз превышают результат, так что весь расчет приходится 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:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{l_1 l_2} \frac{\cos \theta dl_1 dl_2}{D}, \quad (1)$$

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.

Продемонстрируем 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 [Л. З]. 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 $F(0,4a) = 0,636 \pi$.

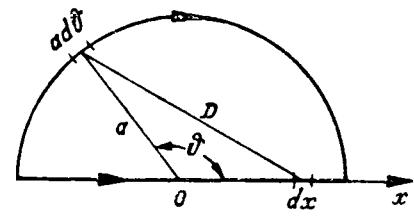


Рис. 1.

Определяя таким же путем $F(x)$ для 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. Следует однако, отметить, что в случае кривых сложной формы расчет связан с более длительным числением.

Заметим также, что в случаях, не требующих значительной точности, расстояние D можно определять графически по надлежащим обработанным чертежам 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, если один из проводов является прямолинейным, представляем собой замкнутое круговое колцо, одно интегрирование может быть выполнено в конечном виде и тем самым объем вычислений существенно сокращается.

Пусть необходимо определить взаимную индуктивность провода произвольной формы и прямолинейного провода (рис. 2). Уравнение сечения прямолинейного провода будем считать заданным. Совместив прямолинейный провод с осью z и учитывая, что в данном случае $dl_1 dl_2 = dx dz$, где dx — проекция элемента длины dl на ось x , можем написать:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l dx \int_0^a \frac{dx}{D} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l dx \int_0^a \frac{dx}{\sqrt{(\xi - x)^2 + z^2}}$$

где x, y, z — переменные координаты элемента длины dl . После первого интегрирования

¹ Все расчеты выполнены на логарифмической линии.

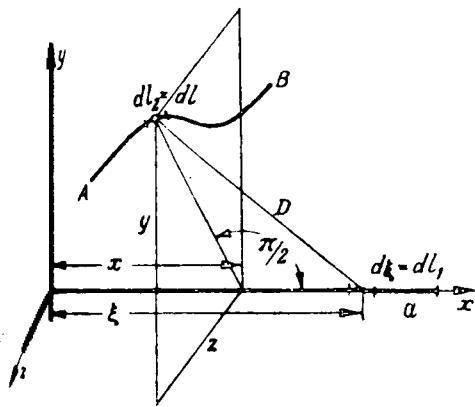


Рис. 2.

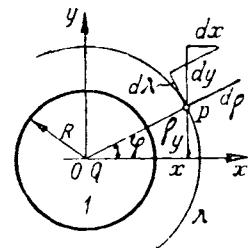
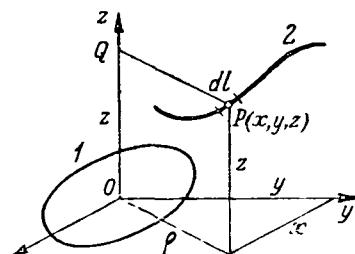


Рис. 3.

где $\cos \alpha$ и $\cos \beta$ — направляющие косинусы элемента dl по осям x и y , а $\varphi = \arctg y/x$. Поэтому

$$dM = dM_\lambda = M_\lambda \frac{(\cos \beta \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi)}{2\pi\rho} dl$$

и, следовательно,

$$M = \frac{1}{2\pi} \int M_\lambda \frac{\cos \beta \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi}{\rho} dl. \quad (4)$$

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 1. 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,

$$W(l_1) = \lim_{s \rightarrow 0} [V(l_1, l_1 - s) + \ln 2h], \quad (6)$$

$$V(l_1, l_1 - s) = \int_{l_1 - s}^{l_1} \frac{\cos \vartheta}{D} dl_2, \quad (7)$$

M — взаимная индуктивность контуров λ

из рис. 3 непосредственно видно, что

$$dl = dy \cos \varphi - dx \sin \varphi =$$

$$= (\cos \beta \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi) dl,$$

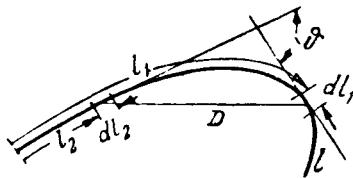


Рис. 4.

l_1 и l_2 — криволинейные координаты, отсчитываемые вдоль оси провода от одного из его концов (рис. 4);

θ и D — соответственно угол 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 напишем в виде: $y^2 = 2px$. Если $p=1$, 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 $dy = dx$, 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

$$D = \frac{y_1 - y_2}{2} \sqrt{(y_1 + y_2)^2 + 4},$$

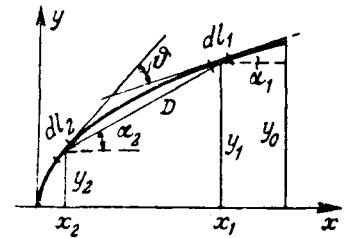


Рис. 5.

то, подставляя значения dl_2 , D и $\cos \theta$ в формулу (7) и интегрируя, получим:

$$\begin{aligned} V(l_1, l_1 - s) &= \ln \frac{2 + 2y_1^2 - y_1 \gamma + \sqrt{1+y_1^2} \sqrt{4+y_1^2}}{\gamma} - \\ &- \ln \frac{2 + y_1^2 + \sqrt{1+y_1^2} \sqrt{4+y_1^2}}{y_1} - \\ &- \frac{2y_1}{\sqrt{1+y_1^2}} \ln \left[2y_1 - \gamma + \sqrt{(2y_1 - \gamma)^2 + 4} \right] \\ &+ \frac{2y_1}{\sqrt{1+y_1^2}} \ln (y_1 + \sqrt{y_1^2 + 4}), \end{aligned}$$

где γ — разность ординат, соответствующих концам малой дуги s . Подставляя (9) в (6) и тывая, что $h = \frac{1}{2} \sqrt{(2y_1 - \gamma)^2 + 4}$, после пада к пределу найдем:

$$\begin{aligned} W(l_1) &= \ln [8y_1(1+y_1^2) \sqrt{1+y_1^2}] - \\ &- \ln (2+y_1^2 + \sqrt{1+y_1^2} \sqrt{4+y_1^2}) - \\ &- \frac{2y_1}{\sqrt{1+y_1^2}} \ln \left(\frac{2y_1 + \sqrt{1+y_1^2}}{y_1 + \sqrt{4+y_1^2}} \right). \end{aligned}$$

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 $y_1=0$ подинтегральная функция в (10) обращается в бесконечность, представим ее в виде суммы

$$f_1 = \sqrt{1+y_1^2} [W(l_1) - \ln y_1] \quad \text{и} \quad f_2 = \sqrt{1+y_1^2}$$

Величина f_1 конечна при всех конечных значениях y_1 и никаких особенностей не предполагает. 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. Образ

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	-0,809
0,283	-0,781	-0,498	-1,279
0,436	-0,937	-0,501	-1,438
0,607	-1,024	-0,417	-1,441
0,802	-1,053	-0,251	-1,304
1,027	-1,024	+0,003	-1,021
1,286	-0,938	0,348	-0,589
1,589	-0,792	0,797	-0,003
1,944	-0,582	1,362	1,362
2,352	-0,306	2,046	2,046

различившись двумя первыми членами разложения, получим:

$$\int_0^{y_0} \left(1 + \frac{y_1^2}{2}\right) \ln y_1 dy_1 = \left(y_0 + \frac{y_0^2}{6}\right) \ln y_0 - \left(y_0 + \frac{y_0^3}{18}\right). \quad (11)$$

погрешностью, не превышающей 1%, этой узкой 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, а в табл. 4 приведены значения F_2 , найденные по формуле (11) при $y_0 \leq 0,4$ и по формуле (12) при $y_0 > 0,4$.

Помимо соответствующие значения F_1 и F_2 , и величину $N = \frac{\mu_0}{2\pi} (F_1 + F_2)$.

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 $R = (1+y^2)^{1/2}$ 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 AB . 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,

$$M = 8M_{12} = \frac{8}{\pi} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{M_\lambda dx}{1+4x^2}. \quad (13)$$

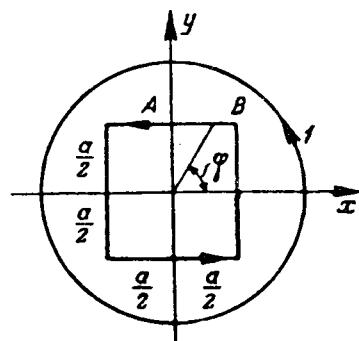


Рис. 6.

Таблица 6

x	$1 + 4x^2$	ρ	$M_\lambda \cdot 10^9$	$\frac{10^9 M_\lambda}{1 + 4x^2}$
μ	μ^2	μ	зн	зн/н ²
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 1 причем значения M_λ для каждого значения ρ берутся из таблиц [Л. 5].

Имея значения подинтегральной функции из формулы (13) и применяя формулу трапеций, находим $M_\lambda = 8,84 \cdot 10^{-10}$ гн.

Литература

- Л. А. Цейтлин. О расчете коэффициентов самоиндукции линейных пространственных контуров, состоящих из прямолинейных участков. Труды ВЭТАС, № 1, 1946.
- Л. А. Цейтлин. Параметры систем прямолинейных и криволинейных проводов. Электричество, № 7, 1946.
- Л. А. Цейтлин. О коэффициентах самоиндукции некоторых плоских контуров. Труды ЛИИ, № 1, 1946.
- J. C. Maxwell. Electricity and Magnetism, II, 1873.
- Л. В. Залуцкий. Введение в теорию атомов, § 10, 11, 14, 15, 16.
- F. W. Grover. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 32, № 10, 1944.
- Л. А. Цейтлин. Общие основания расчета коэффициента самоиндукции криволинейных проводов. Электричество, № 7, 1946.
- 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 обследование 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 общих теории несимметричных трехфазных цепей. Определяется зависимость между параметрами фильтров последовательности.

получить в фазах ды, подключенной к ним линейным напряжениям, напряжения, порциональные соответствующим E_{A1} или E_{A2} , и тем самым измерить

Как известно, составляющие положительной и отрицательной последовательности линейных фазных напряжений жестко связаны:

$$\dot{E}_{A1} = -j\sqrt{3}\dot{E}_{a1}; \dot{E}_{A2} = +j\sqrt{3}\dot{E}_{a2}.$$

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 искомой звезды.

Из условия

$$\dot{E}_{a0} = \dot{E}_{a1}Y_0 + \dot{E}_{a2}Y_1 + \dot{E}_{a3}Y_2 = 0$$

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 $a=0$)

$$Y_0 - Y_1 = 0,$$

$$Y_a + Y_b + Y_c - Y_a - aY_b - a^2Y_c = 0,$$

тогда

$$Y_b = a^2Y_c.$$

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. Потребуем, чтобы

$$E_b \equiv E_{A1} \text{ и } E_c \equiv E_{A2}.$$

Тогда должно быть:

$$Y_0 - a^2Y_2 = 0 \text{ и } Y_0 - a^2Y_1 = 0,$$

тогда

$$Y_b = Y_c = a^2Y_a.$$

Фильтр токов. Заданы линейные токи I_a , $I_b, I_{a0} = 0$. 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 $a = e^{j120^\circ}$ или $a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$. 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 $-a = -e^{j120^\circ} = e^{-j60^\circ}$ или $-a^2 = -e^{j240^\circ} = e^{-j60^\circ}$. 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

$$-(I_b + I_c); I_b; I_c,$$

то „опрокинутая“ система токов (опрокинута фаза c) будет:

$$-(i_b - i_c); i_b; -i_c.$$

Составляющие „опрокинутой“ системы таковы:

$$i'_{a1} = \frac{1}{3} [-(i_b - i_c) + a i_b - a^2 i_c] =$$

$$= \frac{1}{3} (a - 1) (i_b + a^2 i_c);$$

$$i'_{a2} = \frac{1}{3} [-(i_b - i_c) + a^2 i_b - a i_c] =$$

$$= \frac{1}{3} (a^2 - 1) (i_b + a i_c).$$

Выразим их через составляющие „нормальной“ системы токов i_{a1} и i_{a2} , которые мы хотим измерить. Подставляя

$$i_b = a^2 i_{a1} + a i_{a2} \text{ и } i_c = a i_{a1} + a^2 i_{a2}$$

и преобразуя, получим:

$$i'_{a1} = \frac{1}{3} (a - a^2) (i_{a1} - 2 i_{a2});$$

$$i'_{a2} = \frac{1}{3} (a - a^2) (2 i_{a1} - i_{a2}).$$

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 фазы при „опрокинутой“ системе токов

$$i'_A \equiv \frac{1}{Z_0} [i'_{a1} (Z_0 - 2Z_1 + Z_2) + i'_{a2} (Z_0 + Z_1 -$$

Приравнивая коэффициенты при i'_{a1} и i'_{a2} , получим соотношения между параметрами треугольника, при которых i'_A проинтегрирован 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: $Z_0 - Z_1 + Z_2 = 0$, или $Z_B = -a Z_C$. В обоих случаях получаются „60-градусные“ соотношения между параметрами.

Попутно можно сделать следующий вывод об общих свойствах фильтров по схеме звезды 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 фильтров в многофазных цепях. Труды Института энергетики АН УзССР, вып. 3, Ташкент, 1949.



Короткозамкнутый асинхронный двигатель с вставными пусковыми стержнями

Кандидат техн. наук С. С. ИОСИФОВ

Трест Азнефтепроект

предложенный короткозамкнутый асинхронный двигатель имеет нормальной беличьей клеткой. Его конструктивная особенность — наличие специальных пусковых стержней, служащих для создания пускового момента и снижения пускового тока двигателя и закладываемых в пазы ротора без крепления и поверх стержней клетки.

Строение роторного паза и конструкции пусковых стержней представлены¹ на рис. 1. Стержень 1 беличьей клетки размещает наружной половине паза прямоугольной формы. Внутренняя же половина паза занята по всей длине паза пусковыми стержнями. Пусковой стержень (рис. 1, а и б) представляет собой медный алюминиевый стержень неравнобокового профильного сечения (прокат). Пусковой стержень имеет, кроме того, один (рис. 1, в) или два (рис. 1, г, д) стальных прямоугольных стержня 4 и 5 различной толщины. При отсутствии пусковой стержень может быть заменен из стального прямоугольного стержня 1, в, д) и охватывающего его контура 7 из медной ленты толщиной 2—4 мм. Концы медных лент свариваются внахлестку.

Пусковые стержни вставляются в пазы с торцом. Они являются автономными единицами и не имеют никаких механических или электрических связей ни между собой, ни с конструкцией ротора. Стержни удерживаются от сдвига вдоль паза силой трения от центробежной силы, прижимающей их к усикам зубьев и 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 нормальной величины и снижают пусковой ток в 3—4 раза.

Втором предложены и другие, не показанные здесь конструкции пусковых стержней.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

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_{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 ,

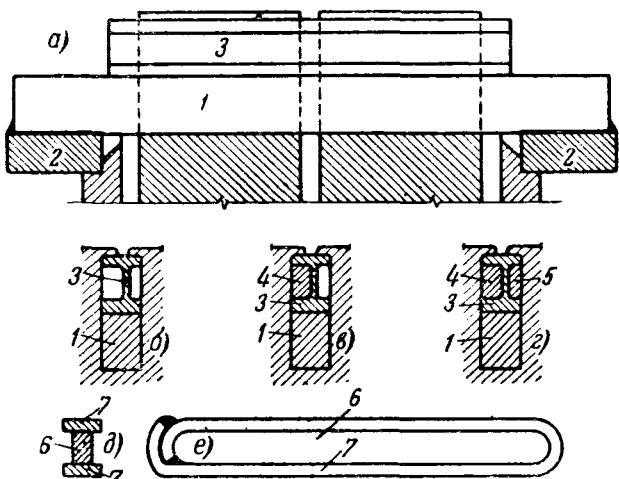


Рис. 1. Различные конструкции пусковых стержней.
а, б, в, г — продольные и поперечные разрезы паза с двухтавровым пусковым стержнем; д, е — ленточный пусковой стержень.
1 — стержень беличьей клетки; 2 — короткозамыкающее кольцо; 3 — двухтавровый пусковой стержень; 4, 5, 6 — стальные стержни; 7 — медный контур.

цепленные с пусковым контуром, возбуждают в нем ток I_a , причем $I_{a1} = -I_{a2}$. Сумма токов I_{a1} и I_b есть ток возбуждения I_u потока Φ_c в пазовой щели:

$$I_u = I_b + I_{a2}.$$

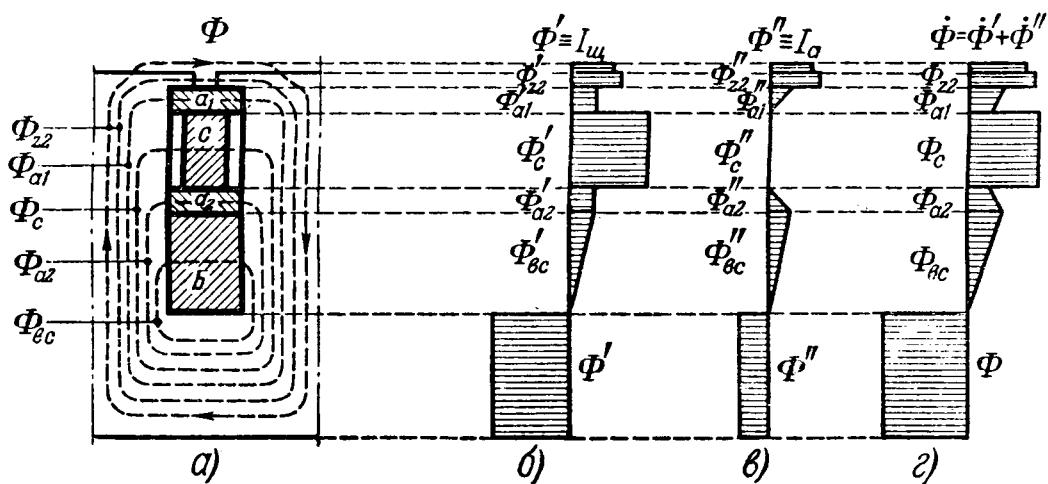


Рис. 2. Схема потокораспределения в роторе с вставными пусковыми стержнями (а₁, а₂ — верхняя и нижняя стороны пускового медного контура; с — стальной стержень; б — стержень беличьей клетки).

Ток беличьей клетки

$$i_B = i_{a1} + i_{a2}.$$

Этот же ток есть и результирующий ток ротора

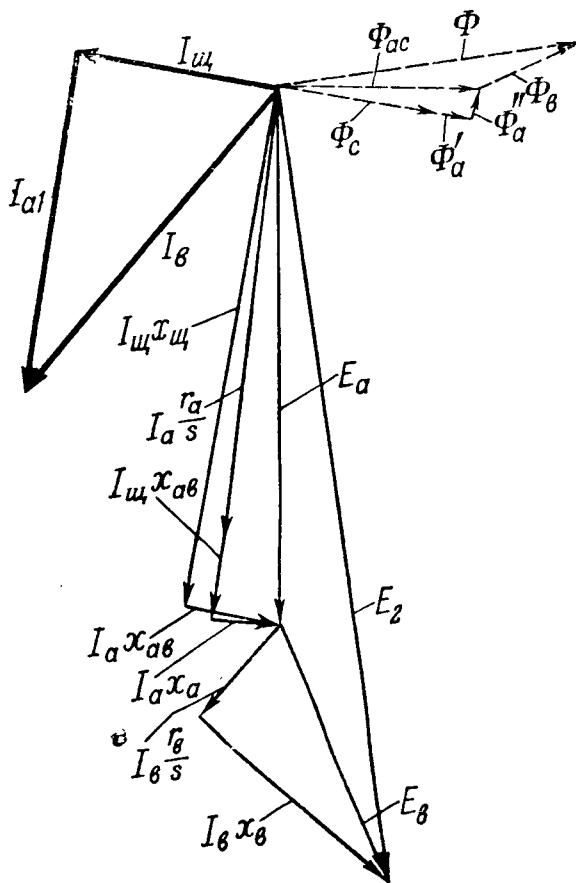
$$i_2 = i_B + i_{a1} + i_{a2} = i_B.$$

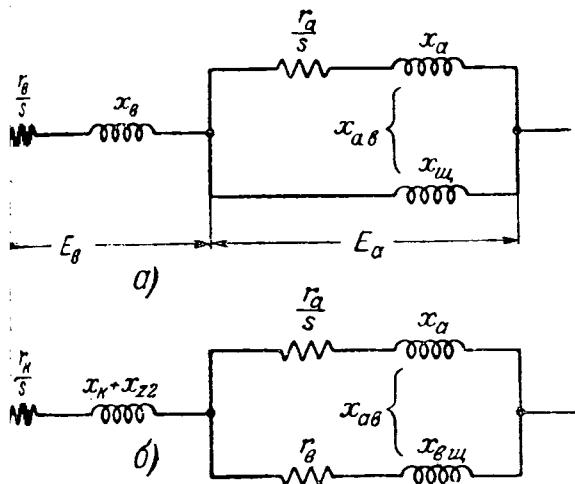
Зная действующие в роторе токи, легко снять диаграмму распределения индукций отных потоков рассеяния по высоте паза рис. 2, б представлена такая диаграмма для чая, когда в роторе действует только I_{a1} ($I_a = 0$, $I_b = I_{a1}$). На рис. 2, в дана анал диаграмма для случая, когда в роторе действует только ток I_a ($I_{a1} = 0$, $I_B = I_{a1}$). Нак на рис. 2, г изображена диаграмма распределения результирующих индукций от совместного действия токов I_{a1} и I_a .

Токи I_B и I_a , взаимодействуя с потоками сцепленными, образуют 2 крутящих момента: момент беличьей клетки и момент первых 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 толще стальной стержень, (уменьшается I_{a1}), и меньше сечение контура (уменьшается I_a).

На рис. 3 изображена векторная диаграмма ротора со вставными пусковыми стержнями. Диаграмма двигателя в части статора строится обычным образом.

На рис. 4, а изображена схема замещения ротора. Для сравнения там же (рис. 4, б) дана схема замещения двухклеточного ротора с общими короткозамыкающими колесами. На этом рисунке r_k и x_k — сопротивление роторозамыкающих колес; r_a и r_B — активное сопротивление стержней рабочей и пуск клеток; x_a — индуктивное сопротивление с





Схемы замещения ротора с вставными пусковыми стержнями (а) и двухклеточного.

рабочей клетки, обусловленное потоками втягивания, пронизывающими рабочие и пусковые щели и пазовую щель. Остальные обозначения же что и выше.

Изменение схем а и б рис. 4 показывает, что замещения ротора может быть получена замещения двухклеточного ротора, сопротивление r_k , $x_k + x_{r2}$, x_{sh} заменить соответственно сопротивлениями r_b , x_b , x_{sh} и r_a и сделать равным нулю. На этом основании сумма токов и аналитические зависимости двигателя с вставными пусковыми стержнями могут быть получены посредством подстановки из соответствующих построений и зависимостей для двухклеточного двигателя с общими взаимозамыкающими кольцами.

Изъясняясь известными соотношениями для двухклеточного двигателя с общими короткозамыкающими кольцами и указанными подстановками, получаем нижеследующие аналитические выражения для сопротивлений, токов и моментов двигателя с вставными пусковыми стержнями.

Результирующее активное и индуктивное сопротивления беличьей клетки совместно с пусковыми стержнями:

$$r_2 = \frac{s^2 r_a (x_{sh} - 1.5 x_a)^2}{r_a^2 + s^2 (x_{sh} - 2 x_a)^2} + r_b,$$

$$= \frac{r_a^2 x_{sh} + s^2 (x_{sh} - 2 x_a) (x_{sh} - 2.25 x_a) x_a}{r_a^2 + s^2 (x_{sh} - 2 x_a)^2} + x_b.$$

в пусковом контуре

$$I_a = I_2 \frac{s (x_{sh} - 1.5 x_a)}{\sqrt{r_a^2 + s^2 (x_{sh} - 2 x_a)^2}}.$$

к возбуждения потока Φ_c в пазовой щели

$$I_{sh} = I_2 \sqrt{\frac{r_a^2 + 0.25 s^2 x_a^2}{r_a^2 + s^2 (x_{sh} - 2 x_a)^2}}.$$

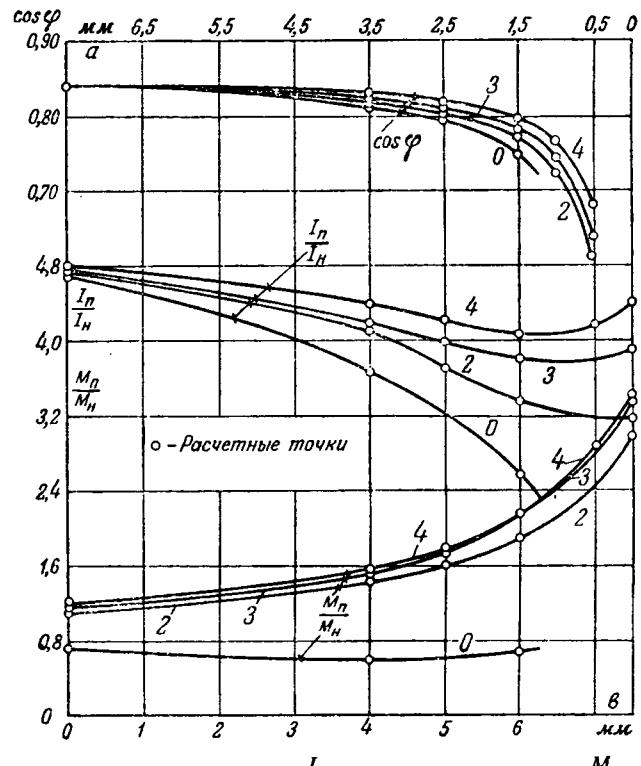


Рис. 5. Пусковые токи $\frac{I_n}{I_n}$, пусковые моменты $\frac{M_n}{M_n}$ и $\cos \varphi$ двигателя с вставными пусковыми стержнями; $P = 200 \text{ квт}$, 735 об/мин в зависимости от толщины стального стержня b , ширины пазовой щели a и толщины медной ленты (0; 2; 3 и 4 мм).

Крутящие моменты беличьей клетки пусковых стержней и двигателя в целом

$$M_b = 0.975 \frac{m_2}{n_1} \frac{r_a}{s} I_2^2, \quad M_a = 0.975 \frac{m_2}{n_1} \frac{r_a}{s} I_a^2,$$

$$M = M_a + M_b = 0.975 \frac{m_2}{n_1} \frac{r_a}{s} I_2^2;$$

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, 2 000 b , 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

Рабочие и пусковые показатели двигателей с вставными пусковыми стержнями (ВПС) и двигателей других типов

Тип ротора и пусковых стержней	$\cos \varphi$	$\tau_p, \%$	I_p / I_n	M_p / M_n	$M_{\max} / M_{\text{ном}}$	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 A , M и C и цифровыми индексами при них. Индекс при букве A обозначает толщину (мм) горизонтальной полки двухтаврового алюминиевого пускового стержня по рис. 1, a , b (толщина вертикальной полки составляет около 1 мм). Индекс при букве M указывает толщину медной ленты пускового стержня по рис. 1, d , e , индекс при букве C — 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, a , g на несколько процентов больше соответствующих значений ленточных пусковых стержней по рис. 1, d , e . 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 его², а вес и стоимость пусковых стержней составляют незначительную долю от веса 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: 1—3%, а при одинаковых пусковых токах момент $\cos \varphi$ двигателя меньше всего лишь: 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 момента 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 имеющимся опытным данным в несколько раз дешевле в изготовлении пусковой клетки 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, a , g 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 пускового контура больше длины пускового стержня двухклеточного 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 (сравнение схемы замещения a , b рис. 4). В двухклеточных двигателях места сварки или спайки стержней к кольцам являются источником дополнительного нагрева пусковой клетки. В двухтавровых пусковых контурах вертикальные полки, сидящие почти не участвуя в образовании пускового контура 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 ($\rho = 0,080 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ в среднем в 1,5—2 раза (см. табл. 1)).

² Фрезеровка короткозамыкающих колец под высокую температуру и их пайка — операция более трудоемкая и менее удобная.

Двигатель с вставными пусковыми стержнями проверен экспериментально и в длительной эксплуатации. На различных нефтепромыслах и заводах работает более 100 двигателей суммарной мощностью свыше 15 000 квт, переделанных существующих двигателей с фазным ротором. Из них имеются: двигатель типа АМС-15-6-8, 2000 в, 1470 об/мин; 8 двигателей типа О-136-4, 270 квт, 2000 в, 1475 об/мин; двигателя типа АМО-138-8, 190 квт, 2000 в, об/мин, остальные — различных марок мощностью от 50 до 180 квт.

Рабочие и пусковые показатели одного переделанного двигателя типа АМО-138-8, 190 квт, 0 в, 735 об/мин, определенные по данным испытаний и расчетным путем (для сравнения), приведены 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 чередующимися через паз пусковыми стержнями типов $M_{2,1}C_{5,2}$ и $M_{2,1}C_{5,2}$. Остальные обозначения те же, что и в табл. 1. Пусковые контуры испытываемого 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 таким же путем, приведены в табл. 1. Коэффициенты полезного действия, приведенные в табл. 2, определены в части потерь в стали и в части потерь в фазной обмотке различной клетки ротора с вставными пусковыми стержнями расчетным путем. Мощности разделены при одном и том же токе статора.

Однако, если исходить из условия равна 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. Ясно из таблицы, данные испытаний весьма точно 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, водокачивающих 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 свободно расположенных 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	$P, квт$	$\cos \varphi$	$\tau_i, \%$	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{max}}{M_{nom}}$
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 выбрасываемой 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 срок службы 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.

[9.6.1960]



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 ква каждая. Магистральные участки сетей и ответвления выполнены стальными проводами и смонтированы на стандартных деревянных опорах со штыревыми изоляторами на крючьях. 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 1 000 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-

ние (4 ом), требуемое «Правилами устройства сельских электроустановок» [Л. 2] для подстанций с напряжением до 35 кв. Наоборот, при налипании увлажнения грунта в месте заземления или близости от него величина сопротивления

заземления оказалась очень близкой к нормальной. Удельная электропроводность увлажняемых горных грунтов была в 1·10⁻⁴ $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$.

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 защиты от действия. На подстанциях, мощность которых превышает 30 ква, 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 30 ква наименьшая допускаемая 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 допускаемая величина сопротивления определяется из условий защитного действия заземления высокой стороне подстанций.

Последний результат проверки очень важен. Он означает, что на понизительных подстанциях с мощностью до 30 ква 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 фильтра иной и прямой последовательности [Л. 4]. В сравнении были проведены контрольные измерения асимметрии в обычной трехпроводной линии. Измерения показали, что коэффициенты асимметрии в сетях ДПЗ мало отличаются от коэффициентов трехпроводной системы и находятся в допустимых пределах. Включение силовой нагрузки во всех случаях способствовало уменьшению коэффициентов асимметрии. Так, для изученных обследованных систем ДПЗ коэффициент асимметрии при осветительной нагрузке был 5,5%, а при смешанной — 3,5%. Как изменилась 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 равнинности. Удельная проводимость горных грунтов значительно ниже проводимости равнинных грунтов. Поэтому требуемые нормами рабочего заземления системы ДПЗ в горных условиях являются крайне тяжелыми и дорогостоящими. Первой Всесоюзной сессии по оборудованию сельской электрификации в 1948 г. была подтверждена 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 является экономически оправданным.

Основу работы легли многолетние исследования Лаборатории электротехники Академии Армянской ССР по определению удельных сопротивлений горных грунтов Армянской ССР [3]. Согласно этим исследованиям наихудшей проводимостью отличаются скальные породы, удельная проводимость которых лежит в пределах от $0,04 \cdot 10^{-4}$ до $0,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$. Затем

идут грунты, образовавшиеся в результате выветривания и наносов (делювии и аллювия), с удельной проводимостью $0,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$. Только вода электропроводность горных почв, залегающих в результате раздробления коренных горных пород, оказалась очень близкой к удельной проводимости равнинных почв ($1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{см}}$).

Было проведено сравнение по капитальным затратам систем ДПЗ различной протяженности с проводными системами. Для сравнения системы, имеющие напряжение 6 кв и выполненные стальным проводом марки Ж-35. Величины сопротивления рабочего заземления (совместного с защитным) систем ДПЗ принята 4 ом. Величина сопротивления защитного заземления на подстанциях трехпроводных

систем принята равной 10 ом, так как мощность подстанций ниже 100 ква. 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 треста Глобельэлектро 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, включающей 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;

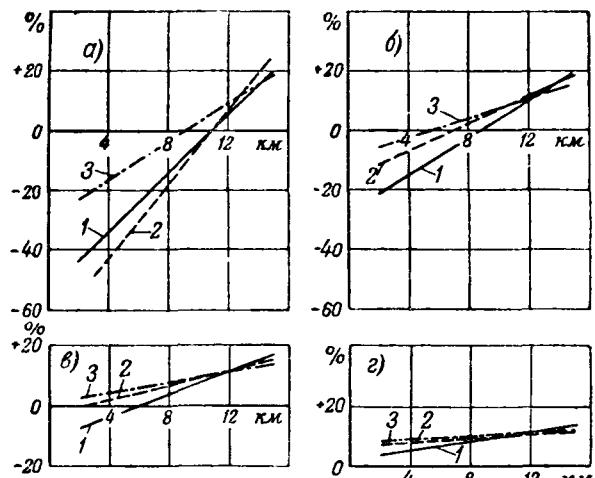
$A_{2\phi}$ — полная стоимость электропередачи ДПЗ;

$B_{p,3}$ — стоимость рабочего заземления;

$C_{2\phi}$ — стоимость 1 км электропередачи ДПЗ.

Относительная экономия от применения варианта ДПЗ может быть выражена следующим образом:

$$\frac{A_{2\phi} - A_{3\phi}}{A_{3\phi}} \cdot 100\%. \quad (3)$$



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 ДПЗ. 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 в борках и родниковых, а территория селения покрыта искусственным орошением. Следовательно, всегда есть возможность выбрать для понизительной подстанции или выносного заземлителя участок с постоянной влажностью.

Литература

- П. С. Орешкинский. Передача энергии фазным током по системе „Два провода — земля“. Академия наук СССР, 1935.
- Правила устройства электротехнических установок. Сельские электроустановки. Госэнергоиздат, 1950.
- Л. П. Подольский. К устройству заземлителей плохопроводящих грунтах. Электричество, № 6, 1938.
- Изготовление фильтров напряжения отрицательной последовательности для блокировки релейной защиты качаний. Информационное письмо ОРГРЭС № 1. Госэнергоиздат, 1944.
- Л. Е. Эбин и Ш. М. Алькер. Руководство по электрическому расчету трехфазных сетей с использованием земли в качестве одного из проводов. Госэнергоиздат, 1940.
- Ш. М. Алькер. Асимметрия напряжений и токов в сельскохозяйственных сетях. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, № 8, 1950.
- Н. Н. Кузнецов и А. П. Златковский. Сельскохозяйственные электростанции. Гостехиздат, 1950.
- Н. С. Казарян. Электропроводность горных грунтов. Доклады Академии наук Армянской ССР, 1950.
- В. К. Давыдов. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна, ч. IV, Закавказский Севанский комитет, 1938.
- И. С. Смолько и Н. П. Сейма. Конструктивное выполнение заземлителей в системе ДПЗ. Механизация и электрификация сельского хозяйства, № 2, 1950.
- А. Л. Вайнер. Заземления. ОНТИ, 1938.
- Н. Ф. Марголин. Токи в земле. Госэнергоиздат, 1947.



Н. М. Алексеев — пионер использования земли в качестве провода при передаче электроэнергии

Кандидат техн. наук М. О. КАМЕНЕЦКИЙ

Ленинград

Изование земли в качестве проводника электричества внедрялось в электротехническую практику уверенно. В технике «сильных» токов применение метода началось лишь в последние годы. Одна из использования земли, как электропроводника, тулирована¹ еще на заре электротехники Николаевичем Алексеевым, родившимся в 1850 г. (ум.

1882 г. в Петербурге, в Соляном городке (ныне обороны Ленинграда). Электротехническим комитетом Русского технического общества была выставка экспонатов Русского отдела Всемирной научной выставки, происходившей в Париже. На Петербургской выставке была организована передача на расстояние. В отдельном зале было 17 пар телефонов, которые электрической связью с микрофонами, находившимися на 5 км в театрах: Мариинском (ныне оперы и Кирова) и Большом (размещавшемся на участке Ленинградской консерватории). Потешители выставки могли слушать оперу [Л. 1]. Эта установка была осуществлена и на упомянутой выставке. Однако электрическая сеть имела различие: в Париже каждый телефон соединялся с микрофоном двумя проводниками, уложенными в чугунных трубах; в Петербурге же один из проводов был воздушным и укреплялся на легких стойках, применявшихся в то время в военно-походном армии вместо другого проводника (оба провода были использованы земля [Л. 1, 2]. Алексеева, входившего по назначению Русского общества [Л. 3] в распорядительный комитетской выставки, не удовлетворила применявшаяся громоздкая система канализации тока. Н. М. считалась необоснованной боязнь «земных токов» русских электриков, стремившихся изолировать оба провода от земли. Используя на Петербургской выставке, как один из проводников электрического тока, Н. М. Алексеев стал убежденным сторонником использования земли, как проводника электричества.

Издаваясь в 1882 г. по докладу довольно известного времени электротехника В. И. Ребикова «О правилах прокладки проводников», Н. М. Алексеев пишет: «...что земля может служить безопасным проводником для самых сильных токов ...опыт выяснит полностью».

Можность использования электропроводности земли была исследована академиком Б. С. Якоби, но осталась незамеченной. Исследований запал мин. Б. С. Якоби установил возможность прохождения тока в воде и в сырой земле. Испытания были проведены между Кронштадтом и Орангенбаумом 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 расстояние электричеством», Н. М. Алексеев наметил четыре основные задачи в этой области, в том числе: «Опыт стоящий менее всего — это испробовать 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. Чиколовым и Д. А. Лачиновым одним из его основателей («непременных членов»); в сентябре 1880 г. он был избран товарищем председателя отдела взамен выбывшего П. Н. Яблочкива [Л. 4] и занимал этот пост более двух лет. В том же году он возглавлял комиссию VI отдела по изучению влияния линий сильного тока на линии слабого тока [Л. 5]. Совместно с Н. П. Булыгиным, А. Н. Лодыгиным и Ч. К. Скряжинским он наметил в 1881 г. программу исследования наилучших условий передачи механической работы на расстояние 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: «использовать землю как ...проводник».

Недавно исполнилось 100 лет со дня рождения этого талантливого русского электротехника, о котором широким кругом 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. Страна. 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]



Стандарты и нормы

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. Различие физических 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 элемента в монтажной электрической схеме ничем не должно отличаться от их изображения в принципиальной схеме. Это можно подтвердить следующими данными. В принципиальной электрической схеме необходимо знать токопрохождение по отдельным элементам аппарата, поэтому элементы располагаются в соответствующих цепях без всякой взаимной конструктивной связи. Наоборот, в монтажной электрической схеме аппарата или прибора необходимо знать взаимное расположение отдельных элементов одного аппарата или нескольких аппаратов с целью осуществления правильной монтажной схемы. Следовательно, в обоих случаях не интересует конструкция аппарата. Таким образом, менять условное графическое обозначение элементов в монтажной электрической схеме нет необходимости, а следует только дополнять условное обозначение специальными элементами, соответствующими их конструктивному размещению в данном аппарате, выходными зажимами или схемой панельки 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 течение необходимо остановиться на книге М. А. Аиф [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 лай, совершенно игнорируя опыт проектирования других, таких систем, как связь, электрооборудование больших механизмов и т. п. Единые графические условные обозначения для электрических схем должны обслуживать смежные области, 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. Аиф 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 авторов 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 работы научных и проектных организаций.

Комитет технической терминологии при Академии СССР должен форсировать свои работы в этой области и созвать специальные конференции по данному вопросу в Москве и Ленинграде с привлечением учебных и научно-исследовательских институтов и проектных организаций.

Литература

1. М. А. Аифимов. Составление электрических схем. Оборонгиз, 1949.



¹ В порядке обсуждения.

Статьям К. Б. Карапеева „О классификации методов электрических измерений“ и Е. Г. Шрамкова „О классификации электроизмерительных приборов“¹

Доктор техн. наук., проф.

А. Д. НЕСТЕРЕНКО

Киевский политехнический институт

Журнал ГОСТ, а также статья Е. Г. Шрамкова почти приводят методов измерений. Что касается работы Карапеева, то она вносит значительную ясность в классификации методов и большинство выдвинутых предложений может быть принято, в особенности освещение методов, но с их классификацией согласиться.

Классификация методов электрических измерений, основанная на основных классификационных признаках для электрических измерений согласно предложению Карапеева следует принять способ сравнения с образцом, способ проведения физического эксперимента. В качестве третьего признака должен быть принят вид связи между измеряемой и известной величинами: вид уравнения, характеризующего измерение. Этот признак определяет точность метода измерения. Методы электрических измерений могут быть разделены на методы разностного сравнения и на методы временного сравнения.

Для разностного сравнения необходимо различие признакам технических средств осуществления измерений: методы временного сравнения градуировкой (результат измерения выражается формулой $X = A$) и методы временного сравнения подстановкой, которые осуществляются при помощи приборов и схем измерения. Результат измерения в последнем случае выражается уравнением $X = N + \Delta Z$.

В дальнейшем примут следующие обозначения: измеряемая величина; A — показание прибора известной оценки; N — известная величина; Z — показание прибора уравновешивания; P — показание прибора измерения.

Для временного сравнения по признакам способа измерения величины с известной могут быть выбраны на методы совпадения и методы уравновешивания. Совпадение может осуществляться как полным (нулевой метод), так и неполным (дифференциальный метод).

В первом методе совпадения известная величина не будет приведены к совпадению все сигналы сравниваемых величин. Результат измерения выражается равенством $X = N$.

В дифференциальном методе совпадения сравниваемые величины, но не совпадающие по значению величины, известная величина определяется по разности между измеряемой и известной величиной. Результат выражается формулой $X = N - Z$. Метод уравновешивания по виду основной связи измеряемой и известной величиной делится на два противоположных друг от друга возможностями с точностью:

Метод непосредственного уравновешивания, в котором уравновешиваются две близкие по значению

величины. Этот метод может осуществляться в двух вариантах: при полном непосредственном уравновешивании измеряемой величины известной и при неполном непосредственном уравновешивании, 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 уравновешиванием.

В методе непосредственного уравновешивания неизвестная величина уравновешивается равной или близкой к ней известной величиной (например, противовключением через гальванометр или при помощи специального уравновешивающего устройства).

Если уравновешивание 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 уравновешивания.

Если при применении метода непосредственного уравновешивания 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 уравновешивания). 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 уравновешивания, а именно: обе разновидности его назвать «дифференциальными методами», с общим выражением уравнения измерения $X = N + P$ и нулевой метод непосредственного уравновешивания 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 градировкой, которые дают значение измеряемой величины без участия экспериментатора, сводя его роль к роли наблюдателя;

2) схемы и приборы уравновешивания, 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 уравновешивание одной величины другой. Эту группу мы назвали приборами уравновешивания. Применение термина «приборы сравнения», не годится, так как при принятой классификации все приборы осуществляют измерение сравнением неизвестной величины с известной.

Схемы и приборы уравновешивания можно разделить на следующие типы: компенсационные непосредственного уравновешивания, измеряющие разность или дифференциальные, измеряющие отношение. Последние подразделяются на компенсационные «с внутренним делителем» и мостовые.

Компенсационные и мостовые схемы в зависимости от того, доводится уравновешивание до конца или не доводится, делятся на:

1) полностью уравновешенные или нулевые;

2) неполностью уравновешенные или сокращенно неуравновешенные. Как разность в дифференциальных схемах, так и остаточное напряжение в неуравновешенных мостовых и компенсационных (с внутренним делением) схемах может определяться показывающим прибором или при помощи нулевой компенсационной схемы.

В первом случае мы имеем дело с дифференциальнопоказывающими, неуравновешенно-показывающими мостовыми и компенсационными схемами и приборами. Во втором случае это будут дифференциально-нулевые (схемы и приборы) и неуравновешенно-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 определению основных схем и приборов уравновешивания.

Компенсационные схемы являются схемами сравнения методом уравновешивания путем противовключения на указатель равновесия двух или более электрически 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 уравновешивания, 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 снижает точность этих схем по сравнению со схемами первого типа.

В компенсационных схемах сравнения токов уравновешивание 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 уравновешивания при помощи двух и более вспомогательных сопротивлений, подобранных так, что со сравниваемыми объектами они составляют сложный замкнутый контур, в котором имеются две равнопотенциальные (или близкотенциальные) точки, наличие

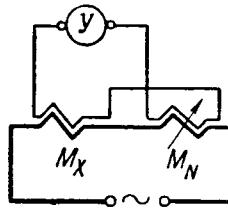


Рис. 1.

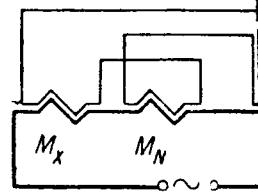


Рис. 2.

которых обнаруживается указателем равновесия. Имеется между указанными выше вспомогательными схемами явлениями является мерой отношения между сравниваемыми величинами.

К дифференциальным схемам должны относиться те схемы уравновешивания, в которых измеряется прибором оценивается полная разность между измеряемой и известной величиной. Поэтому дифференциальные схемы получаются из компенсационных, если уравновешивание не доводится до конца.

Неуравновешенные мостовые, компенсационные дифференциальные схемы и приборы, с одной стороны, соответствующие уравновешенные схемы и приборы, с другой стороны, имеют сходство по внешнему виду. Поэтому необходимо указать на признаки, отличающие те и

В полностью уравновешенных схемах необходимы равновесия, от которых не требуется количественной оценки тока или напряжения (телефон, световой указатель и т. п.). Поэтому к указателям равновесия предъявляются каких-либо требований в отношении стабильности. В неуравновешенных компенсационных и мостовых схемах и приборах для измерения остаточной разности в дифференциальных схемах для измерения полноты должны применяться измерительные приборы, имеющие определенную точность. Последнее отличие особенно характерно для неуравновешенно-нулевых или дифференциальных схем, где измерительной схемой на выходе является самостоятельная компенсационно-нулевая схема. Таким образом, переход полностью уравновешенной схемы в неуравновешенную или дифференциальную определяется изменением указателя равновесия измерительной пропорции.

В качестве примера можно указать на превращение компенсационной схемы непосредственного уравновешивания (рис. 1) в дифференциальную (рис. 2), предложенную автором в 1948 г. В первой схеме образцовая индуктивность переменна, и в качестве указателя равновесия может служить резонансный гальванометр, телефон, любой другой указатель. В схеме рис. 2 разность э. д. с. вторичных цепей сравниваемых катушек с полной величиной взаимной индуктивности уравновешивания при помощи третьей взаимной индуктивности M_3 , которая должна иметь градуировку в величинах M_N и с указателем равновесия представляет самостоятельную схему нулевого типа.

Инж. А. П. КОЗЛОВА

Богословская ТЭЦ

Концепция, предложенная Е. Г. Шрамковым, бывает явлением шагом вперед и должна быть принята на основа при составлении новых норм и стандартов электроизмерительных приборов. Не упоминая вновь о новых измерениях, автор, очевидно, подразумевает, что приборы для магнитных измерений не входят в разряд приборов общего назначения, так как являются либо комбинацией обычных электроизмерительных приборов с вспомогательными устройствами и имеют особое назначение, обстоятельство следует оговорить в новом стандарте как магнитные измерения по традиции рассматриваем как один из разделов электрометрии, что, конечно, всем верно.

Вызывает возражение применение термина для первого, основного, разделения совокупности

ильной аппаратуры на приборы непосредственной и приборы сравнения.

МН «класс» всегда ассоциируется с понятиями, разъясняющими качество (точность) прибора. Следовательно термин целесообразнее использовать, как это по Е. Г. Шрамковым, в схеме при классификации вторичных признаков приборов, например, спектра, точности и т. д. Основное же разделение является осуществить на группы.

Далее, нисходящую, ступень схемы, определяемую свойствами измерительного механизма, следует использовать как вид прибора, и, наконец, для поступления оставить старый, но очень удачный термин *система* (приборы магнито-электрической, электротермической и других систем).

Таким образом, основная классификация будет содержать *виды* и *системы* электроизмерительных приборов вместо «классов», «групп» и «подгрупп».

Системная классификация, показанная на схеме 1, есть в одном дополнении. Речь идет о приборах видовой системы, которым по праву следует отвести свое место среди приборов электромеханического вида условное обозначение *B*.

«Вспомогательным частям» измерительных приборов обсуждаемой статьи относит «все части электрического прибора, исключая измерительный механизм, шунты, добавочные сопротивления и т. п.». Это дает основание предполагать, что определение справедливо в том случае, когда указанные детали в приборе или жестко связаны с ним. Однако не может ли «вспомогательная часть» прибора не быть геометрически связанной с носителем измеряемой электрической энергии. Для ряда электроизмерительных приборов, т. е. шунты и добавочные сопротивления, эти части вне прибора и часто на большом от него расстоянии, в силу чего их, конечно, нельзя причислить к «вспомогательным частям». Поэтому в разрабатываемых новых материалах необходимо достаточно четко определить принадлежность упомянутых устройств и соответственно их классифицировать. Это связано также с тем, что не упомянутым проф. Шрамковым общим признаком характеризующим прибор со стороны его «техническости». Имеется в виду способ присоединения измерительного элемента к объекту, электрические параметры которых подлежат измерению. Поэтому представляется необходимым кроме разделения по признакам, использованным при параллельной классификации (см. схему 4), все измерительные приборы разбить еще на *приборы прямого включения* и *приборы косвенного включения*.

Приборами прямого включения подразумеваются приборы, которые непосредственно или через вспомогательные части (шунты, добавочные сопротивления, выпрямители) присоединены к носителю измеряемой электрической 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 вспомогательными частями и без вспомогательных частей. Равно как, приборы косвенного включения следует подразумевать на приборы с встроенными, наружными вспомогательными механизмами и с размножителем показаний.

Третью вспомогательную ветвь целесообразно добавить к схеме 4.

Самостоятельный и неотъемлемой частью большинства приборов сравнения являются меры (образцовые сопротивления, нормальные элементы и т. п.), т. е. материально изведенные единицы измерения. Само собой разумеется, что эти предметы должны классифицироваться особо, следует указать в стандартах на электроизмерительные приборы.

Инж. А. П. КАТЕЦКАЯ
РИГА

Зложенная в статье попытка построения классификации электроизмерительных приборов, исходящая из основоположения процесса измерения, представляет большой 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 «Электрические измерения»:

1. Единицы и эталоны электрических и магнитных величин.

2. Измерительная аппаратура, включая меры, измерительные приборы и практические сведения о применяемых при измерениях измерительных приспособлениях — усилителях, стабилизаторах и пр.

3. Методы измерения электрических, магнитных и неэлектрических величин электрическими приборами.

4. Обработка результатов и учет погрешности измерения наблюдателем.

Возвращаясь к статье Е. Г. Шрамкова, необходимо отметить, что предложенная классификация электроизмерительных приборов непосредственной оценки по их основному признаку — по принципу действия измерительного механизма, является строго научной и, безусловно, правильной исключающей излишнюю нагроможденность старой классификации.

Однако определение измерительного механизма недостаточно точно раскрывает взаимосвязь явлений, происходящих в самом измерительном механизме.

В определении не подчеркнуто основное свойство измерительного механизма — преобразовывать электромагнитную энергию в другие виды энергии и не подчеркнуто основное назначение — осуществлять такое действие, в результате которого появляется возможность произвести измерение соответствующей электрической величины.

В соответствии с этим представляется необходимым предложить следующее определение:

«Измерительный механизм представляет собой устройство, в котором электромагнитная энергия, обусловленная действием измеряемой величины, с помощью преобразования в другой вид энергии (например, в химическую) или с помощью ряда преобразований (например, в тепловую, а затем в механическую), используется для количественного определения измеряемой величины».

Такое определение позволит также уточнить сущность принципа действия соответствующих групп электроизмерительных приборов.

Так, например, вместо определения, данного в статье группы электромеханических приборов, как таких, «в которых энергия электромагнитного поля системы, характеризующий устройство измерительного механизма, непосредственно используется для перемещения его подвижной части», предлагается дать следующее предложение:

в измерительном механизме электромеханических приборов энергия электромагнитного поля преобразуется в механическую, используемую для перемещения указателя прибора, по величине перемещения которого производят количественное определение измеряемой величины.

Это определение не будет противоречить включению термоэлектрических, фотоэлектрических, ламповых и выпрямительных приборов в подгруппу магнитоэлектрических приборов, так как во вспомогательных частях этих приборов происходит ряд преобразований различных видов энергии, а в измерительный механизм, как и в остальные приборы электромеханической группы, поступает электрическая энергия.

Соответственно можно считать, что:

в измерительном механизме группы электротепловых приборов электромагнитная энергия преобразуется в тепловую, а затем в механическую, используемую для перемещения указателя, по величине перемещения которого производят количественное определение измеряемой величины;

в измерительном механизме группы электрохимических приборов электрическая энергия преобразуется в химическую, под действием которой происходит выделение химического вещества из электролита, по количеству которого судят об измеряемой величине;

в измерительном механизме группы электронно-лучевых приборов под действием электромагнитной энергии происходит механическое перемещение электронного луча, по величине перемещения которого производят определение измеряемой величины.

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 потенциометров) логически 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 важные технические признаки, такие, как способ измерения прибора от электрических и магнитных полей, способы 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 Главэлектромонтажем 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 устраивает возможности получения заведомо неверных результатов расчета.

Пусть $P_p = 20 \times 1 + 1 \times 5 \text{ квт}$, $n = 1 + 5 = 6$, $b = 0,14$, $c = 0,51$ и $m_1 = 5$. Тогда согласно (1) $P_p = 0,51 \times (20 + 4 \cdot 1) + 0,14 \cdot 25 = 15,74 < 20 \text{ квт}$. 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

$$P_p = \varphi(n'_1) n_1 p_{n1} + \varphi(n'_2) n_2 p_{n2} + \dots + \varphi(n'_m) n_m p_{nm}, \quad (4)$$

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. Рыбакова была предложена эмпирическая формула для сетевых 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. д.

Формула (1) отличается от (4) и (5) уменьшением числа слагаемых в правой части до двух. Это упрощение до некоторой степени оправдывается тем, что если $n_1 > n_2 > n_3 > \dots$, то, очевидно, $\varphi(n'_1) > \varphi(n'_2) > \varphi(n'_3) \dots$ т. е. последующие слагаемые в правой части (4) играют меньшую роль в суммарном максимуме. Однаково же мощности p_{n1} , 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 (4) тогда, когда результаты расчета не являются явно верными.

Заметим, что выражение (6) принято для тождественных приемников условно. Вообще же предложенная формула (4) справедлива при любом выражении для n , найденном теоретически или экспериментально.

Случай малого числа приемников. Формула (4) неприменима для $n < m_1$; формула же (3) позволяет известить расчет и для этого случая, если продолжить график (6) [Л. 1] на интервал $1 \leq n \leq m_1$. Для этого имеем $P_p = \frac{P_n}{\eta_n} \approx 1,15 P_n$ и с достаточной для практики точностью

тю интерполяция может быть осуществлена пара-

$$K_c = f(n) = 1,15 - \frac{1,15 - (b + c)}{(m_1 - 1)^2} (n - 1)^2, \quad (7a)$$

и относительно большом $(b + c)$, прямой

$$K_c = 1,15 - [1,15 - (b + c)] \frac{n - 1}{m_1 - 1}. \quad (7b)$$

Мысль, что при переходе к $n = 1$ известная условие избежна в силу того, что для $n = 1$ расчетная принимается (по эксплуатационным и другим условиям) равной $P_p = \frac{P_n}{\eta_n}$, независимо от величины коэффициента загрузки.

Опытное определение коэффициентов. В формуле (1) для эмпирических не только значения коэффициентов и сама ее структура. Поэтому опытная проверка особенно важна. Между тем, методология про-изложенная в [Л. 1], вызывает некоторые замечания. Такие [Л. 1] проверка структуры (1) в задачу проверки не включается. Попутно следует отметить, что результаты обследования, повидимому, дают большое значение и могут быть расценены как отрицательные. Анализа 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 (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 питательных линий больших сечений.

Красно [Л. 1] сопоставление результатов наблюдений различным питательным линиям предлагается

рассматривать по условной величине $N = \frac{P_n}{P_{m_1} : m_1}$. Очевидно,

такое сопоставление само будет условным и не точечных и надежных выводов. Здесь особенно то, что при сопоставлении результатов расчета питательных линий с различными сечениями проводами по опытным данным не учитывается различия постоянных времени нагрева, по которым выполняется расчет.

Воды. Применение формулы (1) нуждается: в оценении случаев ее заведомой неприменимости; в оценке результатов расчета по ней; в работе методики определения входящих коэффициентов.

Всем случае, для расчета питательных линий больших сечений, а также в случаях заведомой неприменимости формулы (1), необходима более сложная, хотя бы и более сложная методология ра-

Литература

- 1. С. Лившиц. Расчетные нагрузки сетей. Электро, № 12, 1949.
- 2. Электромонтаж. Справочник по электрооборудованию промпредприятий. М., 1945.
- 3. М. Калялов. Определение максимума нагрузки 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 квадратном 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 наблюдавших 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 скоммунировано 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 единственным правильным решением является применение групп из однофазных трехбомбочных 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 ити 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 ся в некоторых случаях целесообразной.

**Кандидат техн. наук
Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ**
Гидроэнергопроект

Л. И. Двоскин предлагает применять в качестве схемы коммутации электрических станций блоки генератор-трансформатор. В статье не содержит какого-либо указания на то, что схема предлагается для тепловых станций. Можно думать, что онаится и к гидроэлектрическим станциям. Для установки недоразумений относительно области применения предлагаемой схемы целесообразно дать более подробный анализ, чем это делает автор.

По сравнению с однофазными трансформаторами,ность которых равна удвоенной мощности генератора, фазные трансформаторы, спаренные в укрупненные, имеют, по мнению автора статьи, следующие превосходства: а) возможность ревизии трансформатора при новке только своего, блочного, генератора; б) уменьшение потерь в трансформаторах при ежегодных ревизиях генераторов; в) уменьшение числа трансформаторов (г) отсутствие треугольника на генераторном напряжении; д) возможность при аварии одного из трансформаторов восстановления нормальной работы второго трансформатора.

Высокая надежность современных высоковольтных трансформаторов сводит на нет значение преимущественных в пунктах «а» и «д», так как капитальный трансформатор 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 генератора, то утверждения автора неправильны. Для трансформатора 110 кв¹ согласно заводским данным потери энергии в лоттатах 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 кв¹ будут на 21 квт меньше, чем в трехфазном трансформаторе 60 тыс. ква; равенство потерь наступает при номинальной мощности генератора, равной 90% номинальной. На тепловых станциях переход на трехфазные трансформаторы и уменьшение потерь энергии в периоды ремонта турбогенераторов, так как последние обычно работают при номинальной мощности, 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.

Что при высокой надежности трансформаторов нет установливать резервную фазу, поэтому число одних трансформаторов по схеме рис. 1 (см. статью Л. Двоскина) будет равно 9, а не 13, как ошибочно считал автор.

Изменение мощных трехфазных трансформаторов заставляет иметь кран и тележку большей грузоподъемности в некоторых случаях повышает капитальные затраты. Установка треугольника на генераторном напряжении не сильно усложняет монтаж, но существенного значения не имеет.

Автор статьи совершенно не осветил вопрос с точки зрения режима работы электрической станции. Для конденсаторных тепловых станций, нормально работающих по графику нагрузки, вывод генераторов из работы

производится при ревизиях и ремонтах. На гидростанциях обычно большая часть генераторов отключается ежесуточно 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 гидростанций, 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

СЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ПРИ ОЧЕНЬ МАЛЫХ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

1949 г. Энергетический институт Академии наук совместно с работниками Министерства стекольной промышленности СССР провел исследование электрических промежуточных электроразрядных обработок межэлектродных промежутков. В частности, изучалась начальная стадия разряда.

Электроразрядные методы обработки осуществляются в напряжениях 300—250 в и ниже и в этом случае разряжает в очень малых разрядных промежутках (до 100—10 мк).

Весьма малых промежутках доминирующую роль разряда начинают играть процессы у электродов. Можно предположить, что при очень малых расстояниях между электродами ($\delta < 10 \text{ мк}$), поверхности которых вспыхнули в действие предварительных разрядов, могут существовать или быстрого образования зонных участков междуэлектродных промежутков или мостиков весьма велика.

Изменение напряжения U_i на искровом промежутке под влиянием сгорания токопроводящих мостиков, находящихся между электродами. Разряд не носит характера газового пробоя, а начинается с электрического контакта.

Сам даже такие мостики и не существовали к моменту нарастания напряжения на промежутке, то есть градиенты электрического поля порядка 500—1000 в/см, возникающие в зазоре, ведут к вырыванию из поверхности, чем способствует (но не определяет) разрывание анода бомбардировкой его электронами, находящимися на катоде и в промежутке, если проходящие, чем длина свободного пробега электрона в среде. Это обстоятельство подтверждается пологим (с анода) переносом металла, который называется переносом.

Образование межэлектродных мостиков, конечно, облегчается наличием выступов на поверхности электродов, соизмеримых с межэлектродным промежутком, а в жидкости среды (масло при электроразрядной обработке) наличием загрязнений в виде металлической пыли, продуктов эрозии материала электродов или частиц в других продуктах пиролиза жидких углеводородов.

Испытательное исследование хода кривой изменения напряжения на искровом промежутке при наличии загрязнений связано с той трудностью, что оно требует осуществления осциллографирования с весьма быстрой разверткой по экрану.

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 спадать (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 (т) без разряда в промежутке. Видно, что приблизительно за $20 \cdot 10^{-8}$ сек (точка n , рис. 1, в) до быстрого спада в точке a начинается снижение напряжения U_i по сравнению с напряжением U_i (т), 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 a 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 эрозионного 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 кругой.

При работе эрозионного станка, где зарядное время измеряется тысячами и десятками тысяч микросекунд, условия благоприятствуют образованию мостиков. На осциллограмме г (рисунка непосредственно зарегистрирован процесс изменения напряжения при работе эрозионного станка).

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ¹

Основные задачи, стоящие в настоящее время в области автоматики, это разработка методов комплексной автоматизации производства и не менее важная проблема — разработка технических средств автоматики, т. е. устройств автоматического контроля и регулирования и т. д.

Предварительные расчеты показали, что для утверждения запросов нашей растущей промышленности требуется более 100 000 типоразмеров приборов автоматического контроля и регулирования. Ясно, что нужно новые, научно обоснованные принципы построения автоматических устройств и методы их проектирования.

Плановое социалистическое хозяйство, в отличие от хаотического капиталистического, дает возможность единить научные и производственные силы отдельных организаций и построить систему автоматического регулирования в виде широкого комплекса, использующего лучшее, что разработано нашими учеными и инженерами. Необходимо сформулировать пути и методы построения устройств автоматики, которые должны обеспечить широкое автоматизированное управление объектами нашей промышленности.

При решении этой задачи возникает ряд промышленных требований: с одной стороны, огромная потребность нашей промышленности в автоматических устройствах требует снижать их стоимость, переходя на массовое производство, что влечет за собой необходимость сокращения номенклатуры; с другой стороны, разнохарактерность объектов и особенностей технологических процессов требует расширения номенклатуры. Устранять эти противоречия можно при помощи агрегатного принципа, применяемого в различных отраслях промышленности недостаточно используемого в приборостроении. Агрегатный принцип основан на однотипности функций выполненных отдельными элементами, входящими в разнообразные системы, в частности, в системы автоматического контроля и регулирования. Изучение различных автоматических устройств показывает, что несмотря на внешнее разнообразие, они выполняют по существу весьма сходные функции. Поэтому автоматическое устройство можно разбить на ряд конструктивно независимых узлов с тем, что ограничением, что входные и выходные данные отдельных элементов позволяли бы соединять их в общую систему. Однотипность действий элементов позволяет включить эти функции на однотипные, конструктивно независимые аппараты, допускающие взаимное сочетание в общей системе (агрегат). Агрегатный принцип дает возможность получать наибольшее число модификаций при наименьшем числе исходных элементов. Вместе с тем агрегатный принцип дает возможность быстро совершенствовать систему, так как конструктивная независимость ее отдельных узлов позволяет заменять любой из них, используя новые технические решения и не затрагивая при этом остальных узлов системы.

Автоматические устройства, проектируемые по указанной схеме, должны удовлетворять ряду требований: приборы должны быть рассчитаны на контроль самых различных параметров, как по характеру, так и по величине, они должны обладать высокой точностью, быстрым действием, высокой надежностью работы и, наконец, стационарностью действия.

Перечисленные требования показывают, что автоматизация промышленности стирает грань между приборами лабораторными и промышленными. Эти требования позволяют наметить основные пути развития автоматических контрольных приборов.

Высокая точность диктует необходимость применения компенсационных методов измерения. Разнообразие измеряемых величин и дистанционность контроля приводят к необходимости широкого применения электрических методов измерения электрических и незаводственных величин. Обеспечение надежности при большом быстродействии заставляет строить прибор, как прочный механизм, избегая цианистого изготовления его деталей. Точность должна быть обеспечена эффективными ус-

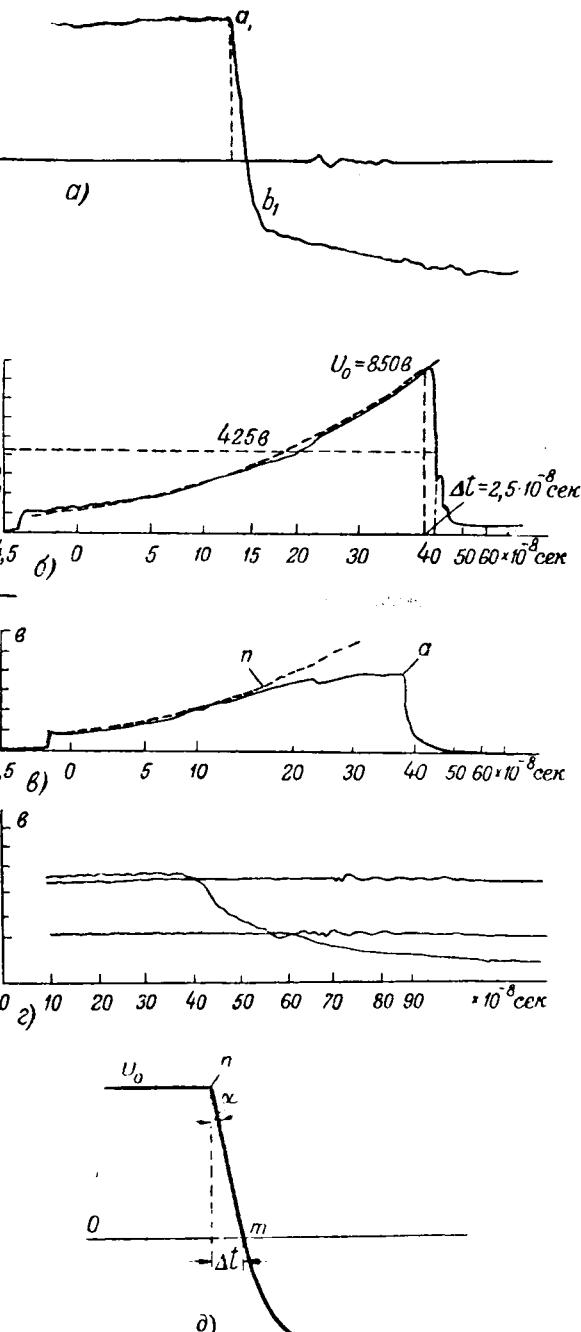


Рис. 1.

Коэффициентом β автор называет тангенс угла α между вертикалью и отрезком прямой mn ($\frac{\Delta t}{U_0} \cdot 10^{-11}$) в стилизованной осциллограмме δ . Спад при пробое в воздухе протекает значительно быстрее, чем при мостиковых промежутках. Отношение β для осциллограмм, снятых при нормальной работе эрозионного станка (типа 2), к среднему его значению при пробое воздуха (осциллограммы типа a , рис. 1) колебалось в опыте от 2,1 до 22,2.

Осциллограммы тока также показали, что при пробое воздуха появление тока совпадает с началом пробоя (резкий спад). При введении металлической пыли в промежуток ток регистрируется в момент образования мостиков, ранее точки a (рис. 1, б).

(Известия Академии наук СССР, Отд. техн. наук, № 7, 1950, И. С. Стекольников)

¹ Доклад на общем собрании Отделения технических наук СССР 15 мая 1950 г.

сигналов рассогласования в компенсационных схемах измерений. Схемы работы регуляторов еще разнообразнее, чем ия работы контрольных приборов, поэтому основное вание к регуляторам — это широкая модификационных элементов, в том числе исполнительных органов. итор должен осуществлять разнообразные законы регуляции, т. е. различные зависимости между изменением регулируемого параметра и действием исполнительного органа, необходимые для обеспечения высокой точности регулирования. Регулятор должен обладать дистанционностью действия. Наконец регулятор в случае необходимости должен обеспечивать «зависимое» регулирование зможностью разнообразных сочетаний отдельных ре-ров и их соединения в общую систему при различных функциональных преобразованиях контролируемых ве-в.

Анализ показывает, что устройства непрямого действия автоматического контроля и регулирования, построенные на агрегатному принципу, целесообразно разбить на конструктивно независимые элементы. Первый из исполнительный орган с первичным преобразователем является щитовое устройство, сущее компенсирующий узел и балансный электродвигатель, осуществляющий компенсацию и перемещающий щит прибора. Третий элемент — управляющее устройство. Четвертым элементом является исполнительный механизм (электрический, гидравлический, пневматический). Системы автоматических контрольных и регулирующих устройств общепромышленного назначения следует рассматривать как единый комплекс. Объектом научного исследования становится уже не устройство, а система устройств, связанных между собой определенными условиями. С этой точки зрения наиболее актуальные научные задачи в этой области можно подразделить на две группы: первая — построение 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) создание целесообразной структуры автоматических систем 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 возможности комплексной автоматизации технологических процессов и выявления целесообразности их перестройки на широкой автоматизации; 2) проведения классификации промышленных объектов регулирования, выявления целесообразных законов регулирования и установления наивыгоднейших структур регуляторов, обеспеченных 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: электроизмерительной, 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-монтажера по сооружению электрической станции переменного тока и линии высокого напряжения.

После преобразования в 1893 г. Петербургского технического училища почтово-телефрафного 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, использовав 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 электроизмерительных 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. Сотрудник М. А. Шателена 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, отчетов и заметок.

Весьма большое внимание М. А. Шателен уделял все годы электрификации промышленности. С 1918 г. он участвовал в составлении проектов электрификации уральских заводов и электрификации сибирских промыслов. В качестве инженерного совета Министерства путей сообщения М. А. Шателен участвовал в разработке вопросов электрификации железнодорожного транспорта. После начала Первой мировой войны М. А. Шателен, бывший в армии, 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 инженерной 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 проект электрификации Северного района; этот план был значительно отмечен В. И. Лениным. Среди проектов, просмотренных под руководством М. А. Шателена, нужно отметить проекты сооружения гидроэлектростанций Волжской, Свири и Днепра. 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 ДнепроГЭС и тем, в качестве члена правительственный комиссии, в приемке этой крупнейшей гэс.

В 1924 г. М. А. Шателен участвовал в работе Парижской 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. Тихоедовым, 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 ведена совместно с академиком В. Ф. Миткевичем и профессором

А. Толвинским, большая работа по редактированию и отловке к изданию шеститомного справочника для техников — «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 эта работа по вопросам электрификации транспорта. Шателен возглавляет в Академии наук работу Комиссии по светотехнике.

Следует отметить значительную работу М. А. Шателена в период отечественной войны в Узбекской ССР, он был направлен по решению Президиума АН СССР. Он развил большую плодотворную работу по поиску Узбекистану в налаживании работы оборонных предприятий, в развитии энергетики, в развертывании научных учреждений, высших технических учебных заведений и научно-инженерных обществ. Занимая пост главного научного работника, М. А. Шателен сделал практический институт Узбекского филиала АН СССР из центров, в которых решались научно-технические инженерно-экономические проблемы Узбекистана. В дальнейшем М. А. Шателен занимал пост заместителя председателя научной части Узбекского филиала АН СССР. Под его руководством было проведено рассмотрение проекта новой крупной Фархадской гидроэлектростанции и линий электропередачи. В Средне-Азиатском строительном 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. Маткевич, 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**



Библиография

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. Фрункиным («Севзаппромэлектропечь»). 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 диэлектрического нагрева и приводится описание некоторых промышленных установок. Даются основные соотношения для расчета ламповых генераторов и указания по его эксплоатации. Книга рассчитана на техников-электриков и инженеров-технологов, мало знакомых с радиотехникой, но имеющих дело с высокочастотными установками для диэлектрического нагрева.

Глава первая посвящена значению высокочастотного нагрева диэлектриков и полупроводников в промышленности. Излагается история вопроса, причем подчеркивается приоритет советских исследователей в области высокочастотного нагрева полупроводников 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. Даётся

понятие диэлектрической проницаемости. Приводятся формулы для расчета энергии и плотности энергетического поля в диэлектрике. Отмечается различный характер 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 может быть мало. Излагается картина передачи электрической энергии от источника к нагрузке и в связи с этим дается понятие поверхностного эффекта; приводится зависимость 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 одной другую и о соседние неподвижные частицы. В качестве иллюстрации приводятся графические зависимости $tg \delta$ от частоты, температуры и влажности для различных диэлектриков.

В заключение в данной главе рассматривается выделение тепла в полупроводниках, помещенных в переменном электрическом поле. Поскольку полупроводники обладают свойствами как проводников, так и диэлектриков, то в них проявляются оба вида потерь энергии. При малых частотах полупроводники ведут себя подобно проводникам.

я, 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 сопротивления полупроводника (g , b , r и x). В качестве иллюстраций приводятся кривые ϵ , $lg g$, b , r и x от частоты, влажности, температуры для некоторых полупроводников.

Глава четвертой рассматривается случай одномерного нагрева материалов слоями, при которых эта неравномерность устраивается. В качестве примера приводится распределение температуры и влажности в неоднородных образцах древесины процессе сушки. 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 15%, 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 r для ϵ имеет максимум, и поэтому удельная мощность p пропорциональна r , то и при этой влажности максимально.

Рассматривается нагрев при продольном расположении материала в электрическом поле. Показывается, что в случае удельная мощность пропорциональна удельной проводимости и сильнее нагреваются более сухие стоя.

Указывается влияние воздушного зазора между материалом и электродом. Путем несложных математических выкладок авторы показывают, что наличие такого зазора приводит к неблагоприятным условиям нагрева древесины с влажностью более 15—20% (температура распределяется обратно пропорционально влажности), при высокочастотной сушке древесины избегают больший воздушный зазор между древесиной и электродом.

Излагается нагрев анизотропных материалов. Приведены кривые удельной активной проводимости и активного 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 разной конфигурации при помещении их в различной форме конденсаторах. Выясняется форма конденсатора, дающая равномерный нагрев.

Далее рассматриваются неравномерности нагрева, проявляющиеся вследствие образования стоячих волн. Дается описание явления образования стоячих волн и указываются условия, при которых они появляются. Исходя из них, авторы рекомендуют, чтобы расстояние между точками присоединения питания и самой удаленной от этого места 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 подключения настроенных индуктивностей) в тех случаях, когда по условиям технологии производства требуется одна частота при нагреве диэлектриков больших размеров.

Заканчивается глава кратким описанием нагрева диэлектрика в полном резонаторе, когда приаются 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 нагреваемого материалом. Указываются некоторые схемы компенсации изменения параметров нагрузки в процессе нагрева. Приводятся многочисленные схемы расположения элект-

родов: при склейке деталей разной формы, при нагреве пленок и нитей, при сушке тонких слоев материала, при оттаивании грунта, при колбейерном 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 окружающую среду; 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, мешинные и ламповые генераторы).

Даются сведения об устройстве, работе и параметрах электронных ламп. Описываются различные конструкции генераторных ламп (с воздушным и водяным охлаждением) и конструкция магнитрона, применяемого для генерирования колебаний с частотой выше 220 мгц.

Описывается работа генератора с независимым возбуждением в режиме колебаний первого и второго рода. Даётся понятие напряженности режима работы генератора. Описываются схемы параллельного и последовательного анодного питания. Даётся 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. Даётся 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 двуволнистости. Даётся описание источников питания генераторов, в частности, описывается работа газотронного выпрямителя по схеме А. Н. Ларинона.

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 прессшаров, 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 титанового 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 индустриальных радиопомех для высокочастотных установок промышленного применения.

Заканчивается глава правилами обслуживания установок и техники безопасности при их обслуживании.

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 экономическая сторона высокочастотного нагрева следовало бы и вной книге уделить определенное внимание. В настоящем времени наблюдается чрезмерное увлечение диэлектрическим нагревом, и зачастую затрачиваются большие средства исследований там, где это явно бесперспективно. По-весьма необходимо было в книге (поскольку она в достаточном количестве тиражом и, несомненно, найдет широкий круг читателей) объективно оценить различия технологии с применением высокочастотного и с точки зрения технико-экономических показателей.

Описывая генераторы с одноконтурной схемой, авторы утверждают (стр. 182), что общий к. п. д. установки может достигать 60—70%. Такие цифры могут ввести в заблуждение читателей, создав у них ложное представление о истинном к. п. д. установки. В действительности к. п. д. промышленных установок в настоящее время достигает 35—40%. Здесь авторы не учитывают температуры с нагреваемого материала и явно занижают в цепях накала и сетки и в выпрямителе.

При описании схем промышленных ламповых генераторов авторы ограничились разбором установок, разработанных ЦНИИЛЭПС, не указав, освоены ли они в производстве.

И вместе с тем, авторы не привели описания других к серийному производству установок ЛГ-3 и ЛГ-4 выпускаемых в настоящее время заводом им. Ворлова установок для сушки древесины типа ГС-48. Комплектование с этими установками было бы, конечно, полезно для читателей.

В заключение необходимо признать, что, несмотря на имеющиеся недостатки, книга безусловно является полезной не только для лиц, на которых она рассчитана, но и для занимающихся проектированием, конструированием и исследованиями в области диэлектрического грева. 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 и существующей литературе.

Рецензируемое пособие удачно дополняет недавно изданную Связьиздатом 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 и широким иллюстрированным полезными графиками.

Главы III, IV, и V посвящены электрическому конструированию кабелей: симметричных, с повышенной индуктивностью и коаксиальных. Материалложен с достаточной полнотой, причем особенно подчеркнута остановка 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 используется. 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)ены 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 вибрации на помехи в симметричных и коаксиальных цепях; эти вопросы изложены с большой полнотой и держат многое свежего материала. К недостаткам глав следует отнести некоторую схематичность разделов 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 вопросы материалов и технологий производства кабелей. В главе IX недостаточно освещены частотные и температурные характеристики электроизоляционных материалов, имеющие чрезвычайно большое значение для современного кабелестроения. Глава X отличается излишней густотой и чисто обзорным изложением технологии производства.

Вообще вопросы технологии занимают мало места в общем объеме книги и далеко не исчерпывают основных тем современной технологии производства кабелей. Кроме того, в ряде случаев приводится устаревшее оборудование, совершенно обойдены 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.)

АЛЕКСАНДРОВ Н. В., МАГИДСОН А. О., ПРИВЕЗЕНЬ В. А., ТАРЕЕВ Б. М. Анонтированный указатель книг по производственной и кабельной технике. Под ред. Б. М. Тареева. с. 16. Всесоюзный заочный энергетический институт, кафедра электроматериаловедения и кабельной техники.

Фотовыставка отечественного приборостроения. Каталог-издание лабораторных приборов и оборудования. Вып. 23. Меры приборов для измерения сопротивлений, емкостей и индуктивностей. 63 стр., ц. 14 руб. Машгиз.

ГОРЕВ А. А. Переходные процессы синхронной машины. 1-е изд., ц. 33 руб. 60 коп. Госэнергоиздат.

ГОРЕЛИК Г. С. Колебания и волны. 552 стр., ц. 33 руб. Гостехиздат.

Колебательные и волновые процессы, встречающиеся в различных областях физики, подчиняются во многом одним и тем же принципам. При изучении колебаний, характеризующих качественно отдельные формы движения материи (звук, свет, механические, электромагнитные явления), обнаруживается сходство, а в некоторых случаях и общность закономерностей, присущих этим колебаниям. Исходя из этого, автор попытался выделить в самостоятельный отдел физики учение о колебаниях и волнах, посвятив его отдельную книгу. В предисловии он указывает, что единый ряд из различных по природе колебаний играет все большую роль при решении ряда научно-технических задач. С этой точки зрения рассмотрены вопросы суперпозиции колебаний, линейные и нелинейные колебательные системы, понятие волны, электромагнитные волны, сложные излучатели, явление дифракции, статистические методы (исследование отклонений от синусоидальности), спектральное разложение. Говоря в последней главе о спектральном анализе метода исследования, автор признает, что классическая теория звука и волны, принятая в книге, бессильна объяснить процессы колебаний, законы которых в корне отличны от законов классической физики. В связи с этим остается выразитьожаление, что этой обширной книге соответствующими элементами атомной физики не было уделено надлежащего места. Этот недостаток не выражается, конечно, замечанием автора на последней странице книги, что для перехода к изучению квантовой физики (физики поля) было необходимо предварительное усвоение классической теории колебаний и волн, наблюдаемых в макромире. Построение автором самостоятельное учение о колебаниях и волнах должно было быть завершено достаточно обстоятельным освещением закономерностей, наблюдаемых в колебательных явлениях полюса.

1950ЕЦОВ Л. И. Электронная и ионная эмиссия (Серия научные проблемы физики под общей редакцией С. И. ВАДОВА, А. Ф. ИОФФЕ, П. И. ЛУКИРСКОГО, В. А. ФОКА и Н. ФРЕНКЕЛЯ). 275 стр., ц. 9 руб. 75 коп. Гос. изд-во технической литературы.

ДЮШИМАН С. Научные основы вакуумной техники. Перевод с английского А. Б. ДРАНИНА под ред. Б. П. Беринга. 1-е изд., ц. 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 МИСС, 1950.

Каталог содержит описание, технические характеристики, экспериментальные данные для выпускаемых образцов МПСС, конденсаторов: бумажных (типы КБ, КБГ, ББ, КБГ КФ и КБМ), стеклянных (КСО, КСГ, КБ, КВ и КР), пропиленовых (КТГ, КДК, КГК, КПК, КВГК, КВКЦ, КВКТ КБГК), а также непроволочных сопротивлений (постоянных — типы ВС и ТО и переменных — Омега, ВК и ТК) и трубчатых промышленных изолированных сопротивлений.

ЛУКИН Ф. Переходные процессы в линейных элементах технических устройств. 140 стр., ц. 10 руб. Оборонгиз.

МАНСУРОВ 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 четырехполюсника, характеристики постоянных магнитов и др. Насыщенность книги примерами, числовыми пояснениями 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 руководителей лабораторной практики вузов по курсу «Теоретические основы электротехники».

ОСИЛОВ 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 практическую направленность, вследствие чего ее можно рекомендовать не только в качестве пособия для радиоклубов, но также инженерам и техникам, желающим пользоваться в своей работе такими универсальными и незаменимыми измерительными приборами, каким является в насторящее 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. 2 руб. 40 коп. Сельхозгиз.

Сборник, посвященный семидесятилетию академика А. Ф. Иоффе (Академия наук СССР). 557 стр., ц. 40 руб. Изд-во Академии наук СССР.

СКАИНАВИ М. И., РЫЖКОВ В. В., СУЛЕЙМАНОВА Х. Л., ЦЛАФ 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. СМИРЕННИНА. 784 стр., ц. 109 руб. Госэнергоиздат.

Потребность в таком радиотехническом справочнике давно настала. Государственное энергетическое издательство правильно поступило в выборе основного материала для этого справочника, не

откладывал выпуск такого пособия до создания в будущем аналогичной книги силами другого авторского коллектива. Справочник представляет научное энциклопедическое пособие. Он содержит не только обозрение основных достижений радиотехники и систематизированный свод формул, диаграмм и расчетно-справочных таблиц, но также и все важнейшие научные положения современной радиотехники, освещает физическую сущность рассматриваемых явлений и поясняет 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 радиосхем, электровакуумные приборы, 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 «Электроматериаловедение». Выпуск II—Б. Электрические свойства диэлектриков (Диэлектрическая проницаемость. Угол диэлектрических потерь). 45 стр., беспл. Всесоюзный заочный энергетический институт.

НИАТЕЛЕН 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 сepochой зарождения и развития в России электротехники и освещает славную деятельность 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 (Рецензию на издание 1949 г. см. Электричество, № 5, 1949).

ШИКУРИН 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, производимые в настоящее время в Советском Союзе и находящихся особенно широкое применение в лабораторной практике, на электрических и подстанциях, в радиостанциях и пр. Вступительные главы первой части книги («Электроизмерительные приборы») посвящены вопросам теории измерений, системам единиц электрических величин и классификации электроизмерительных приборов. Одними из первых в книге приборы распределены по системам низкоэлектрические, электромагнитные, электродинамические и при этом в начале главы, посвященной приборам каждой из излагаются общие сведения, характерные для приборов данной системы. Данные технические характеристики приборов, ссылки на карты или технические условия, схемы соединений, области применения, приемы работы с приборами, отпускные цены приборов каждого прибора дано его изображение (внешний вид), а для новых приборов также и габаритно-установочные чертежи. В части заканчивается описание генераторных измерительных приборов: шунтов, добавочных сопротивлений и измерительных форматоров. Аналогично, но более скжато изложена вторая книга («Радиоизмерительные приборы»). В приложении приведен 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 выбирать приборы для той или иной конкретной цели приборы и правилами пользоваться.

ШИТРАУФ Е. А. Электричество и магнетизм. 588 стр., ц. 85 коп. Гос. изд-во технико-теоретической литературы. Элементы радиотехники. Под редакцией А. М. БРОЙДЕ. Печатано отделом учебных заведений МИСС СССР в качестве учебного пособия для техникумов. 416 стр., ц. 14 руб. 25 коп. Госиздат.

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, предстающую в виде полного и переработанного издания перевода книги Б (1948 г.). Книга содержит свыше 400 задач практического характера. Следует отметить хорошо написанное «Введение», в котором сжато, но доведено до последнего времени обзор основных нововведений в теории постоянного и переменного тока, орбит излучения и распространения радиоволн, рассматриваются гироны лампы, использование их в усилительных, генераторных специальных схемах. Отдельные главы посвящены радиоприемникам, радиолокаторам, передающим и приемным устройствам.

