

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1947



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

5

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

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Ю. М. Рушнир — Физико-технические основы электронной микроскопии	3
Д. И. Азарьев — Модель электрических систем	17
В. М. Синьков — Экономическое распределение активной нагрузки между электростанциями в энергосистеме	24
А. М. Мелькумов и З. Л. Жиронкина — Новые низковольтные предохранители с большой отключающей способностью	30
Г. Г. Костянян — Переходные процессы и резонансные явления в оперативных цепях постоянного тока	36
А. Д. Нестеренко и Е. Т. Поединок — Теория фазометров	42
Из научно-исследовательских работ. Авторефераты	
В. Ю. Ломоносов — Об одном обобщении формулы Хевисайда	47
А. Л. Гофлин — Электрическая модель балки, лежащей на упругом основании	48
Д. В. Голубев — Подсчет мощности, выделяющейся при индукционном нагреве в плите и полом цилиндра	50
С. Н. Шевчук — Выбор термической защиты для электродвигателей	53
А. А. Климов — Модификация графического метода Швайгера для определения среднеквадратичных величин	56
Дискуссии	58
Международная конференция по сетям высокого напряжения	
С. М. Брагин — Современные высоковольтные кабели	70
Ю. В. Буткевич — Выключающие аппараты высокого напряжения	75
Рефераты	77
Хроника	89
Библиография	94
Д. Б. Мондрус, А. В. Донской и А. Н. Соколов — Книга по промышленным электрическим печам	94



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (отв. редактор), академик **А. И. Берг**,  
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Глазунов**,  
член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**,  
канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, инж. **А. И. Товстопалов**,  
член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Ответственный секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

# Физико-технические основы электронной микроскопии

Кандидат физико-матем. наук Ю. М. КУШНИР

Научно-исследовательский институт Министерства электропромышленности СССР

**Введение.** По основным принципам действия электронный микроскоп во многих отношениях напоминает оптический проекционный микроскоп. Это сходство иллюстрирует рис. 1, на котором приведены схемы действия проекционного оптического и так называемых магнитных и электростатических электронных микроскопов, работающих на просвет.

Оптический проекционный микроскоп состоит, в основном, из источника света, конденсорной линзы, объектива и окуляра. В магнитном электронном микроскопе этим элементам соответствуют источник электронов и электронные линзы—конденсорная, объективная и проекционная.

Электронный микроскоп позволяет видеть частицы в 100 раз более мелкие, чем те, которые удастся наблюдать в самые сильные оптические микроскопы. Это значительно раздвигает границы научных исследований объектов, доступных нашему непосредственному наблюдению.

Электронная микроскопия—очень молодая наука, однако в ее активе уже имеются большие достижения—обнаружение ультравирусов, изучение внутренней структуры бактерий, исследование поверхностной структуры металлов, непосредственные наблюдения коллоидных частиц, крупных органических молекул и многое другое.

Больших успехов в области электронной микроскопии добились и советские ученые. В годы войны в Государственном оптическом институте под общим научным руководством академика С. И. Вавилова в лаборатории академика А. А. Лебедева построены первые советские электронные микроскопы (рис. 2).

Недавно в Научно-исследовательском институте Министерства электропромышленности под общим научным руководством академика А. А. Ле-

*Развитие электронной физики привело к возникновению новой теоретической и прикладной области физики—электронной оптики. Одним из замечательных достижений этой науки является электронный микроскоп, применение которого позволило значительно расширить круг явлений микромира, доступных непосредственному визуальному наблюдению. В настоящем обзоре освещены основные теоретические и экспериментальные предпосылки электронной микроскопии. Рассматриваются следующие вопросы: разрешающая сила и полезное увеличение оптических микроскопов, электронные волны, возникновение электронной оптики, магнитные и электростатические линзы большой преломляющей силы, недостатки электронных линз. В заключение описаны основные системы электронных микроскопов. В одном из ближайших номеров автором будет опубликована статья, посвященная конструкции электронных микроскопов, электрическим схемам питания и применению микроскопов.*

бедева также разработаны и построены электронные микроскопы высокого качества.

Во исполнение Закона о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг., в котором записано «освоить производство электронных микроскопов и внедрить их в научно-исследовательские институты», электронная микроскопия должна получить у нас в ближайшие годы должное развитие.

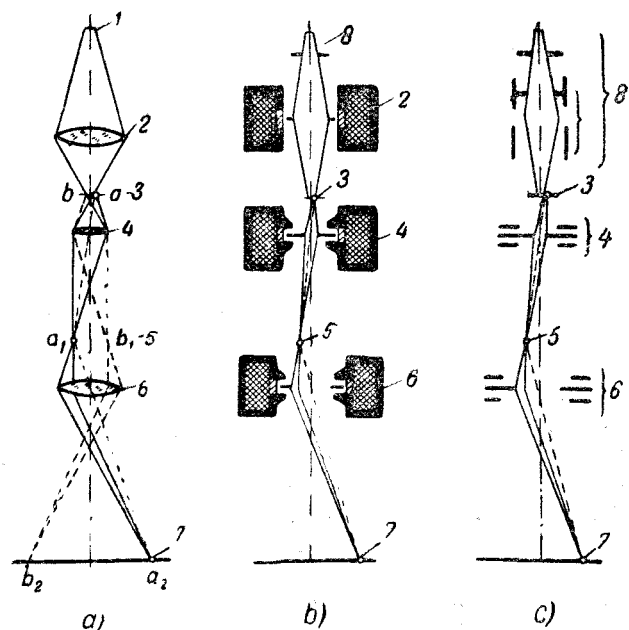


Рис. 1. Схема действия проекционного оптического микроскопа (а), магнитного (б) и электростатического (в) микроскопов, работающих на просвет.

1—источник света; 2—конденсорная линза; 3—предмет; 4—объективная линза; 5—промежуточное изображение; 6—проекционная линза; 7—окончательное изображение; 8—электронная пушка.

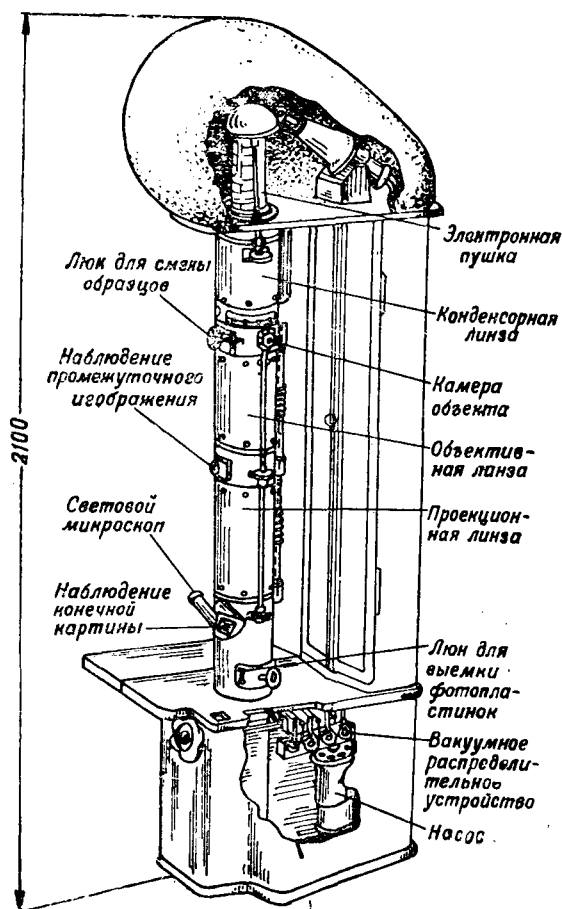


Рис. 2. Схематический вид микроскопа Государственного оптического института.

**Разрешающая сила и полезное увеличение оптических микроскопов.** Предельный угол зрения, ниже которого мы не различаем невооруженным глазом деталей рассматриваемого предмета, равен  $1'4''$ . Под таким углом зрения видны, например, две точки, находящиеся от глаза на расстоянии наилучшего зрения (25 см) и расположенные на расстоянии 0,1 мм друг от друга. С помощью оптических приборов можно увеличивать угол зрения, под которым виден данный предмет.

При помощи большого числа линз можно получить сколь угодно большие увеличения и может на первый взгляд казаться, что существует возможность различать сколь угодно близкие друг к другу точки предмета. Однако, это не так. Дело в том, что оптические системы никогда не дают изображения светящейся точки в виде геометрической точки. Вместо точки всегда получается некоторый кружок рассеяния, радиус которого зависит от ряда факторов. В результате, при наблюдении в микроскоп очень близких друг к другу точек эти кружки рассеяния, даваемые объективом, накладываются друг на друга и тем ограничивают нашу возможность видеть точки порознь. Очевидно, что применение большого числа линз будет только способствовать увеличению размеров этих кружков, но не раздвигать их.

Вологодская областная универсальная научная библиотека



Рис. 2а. Внешний вид микроскопа Государственного оптического института.

Наименьшее расстояние  $d$  между двумя светящимися точками, при котором объектив микроскопа дает еще их несливающееся изображение, называется разрешаемым расстоянием. Величину, обратную  $d$ , называют разрешающей силой микроскопа.

Полезным увеличением микроскопа  $M$  называется такое увеличение, при котором точки предмета  $ab$ , находящиеся на разрешаемом расстоянии друг от друга, получают в окончательном изображении на расстоянии  $a_2 b_2$ , хорошо различимом невооруженным глазом (с дистанции наилучшего зрения).  $a_2 b_2$  равно около 0,02 см.

По определению

$$Md = 0,02. \quad (1,1)$$

К увеличению, превосходящему  $M$ , стремятся в тех случаях, когда требуется спроектировать изображение на экран для наблюдения его со сравнительно большого расстояния.

Образование кружков рассеяния обусловлено явлениями дифракции света, хроматической и монохроматической аберрациями.

Монохроматические аберрации характеризуются тем общим признаком, что при бесконечно узкой диафрагме, ограничивающей линзу, они рав-

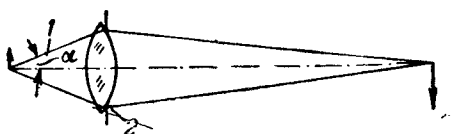


Рис. 3. Апертурный угол.

1—апертурный угол; 2—диафрагма.

ны нулю и возрастают вместе с увеличением диаметра отверстия диафрагмы. Известны пять<sup>1</sup> таких aberrаций, установленных Зейделем и получивших общее название aberrаций третьего порядка. Из них при идеальной центрировке оптической системы и малых объектах, лежащих на главной оптической оси, наибольшее значение имеет сферическая aberrация. Она заключается в том, что лучи, упавшие на линзу под большим углом к главной оптической оси, пересекаются ближе к линзе, чем лучи, упавшие на линзу под меньшими углами. В результате на экране получается некоторый кружок рассеяния, радиус которого тем больше, чем больше апертурный угол пучка, т. е. угол, образованный крайним лучом с главной оптической осью (рис. 3).

Хроматическая aberrация вызывается дисперсией света, т. е. различным преломлением в линзе лучей разного цвета. Для хроматической aberrации характерен кружок рассеяния, окруженный цветной каемкой.

Наиболее простым методом борьбы со сферической и хроматической aberrациями являются соответственно: 1) ограничение апертуры световых пучков при помощи диафрагм (уменьшение сферической aberrации); 2) использование монохроматического света (уменьшение хроматической aberrации). Однако, эти простые методы являются весьма невыгодными, так как их использование влечет за собой ослабление световых потоков. Кроме того, при малых диафрагмах усиливается эффект дифракции.

Прикладная оптика стремится исключить aberrации путем сочетания линз различной кривизны и изготовленных из материалов, обладающих различной удельной дисперсией. Объективы хороших современных оптических микроскопов, несмотря на использование в них белого света и пучков с апертурой, близкой к 90°, почти избавлены от сферической и хроматической aberrаций.

Но даже идеальные оптические системы—системы, не дающие aberrаций, будут давать кружки рассеяния в результате дифракции света.

Ограничимся рассмотрением дифракции света, когда предметами микроскопического исследования служат самосветящиеся объекты. В этом случае дифракция световых волн происходит на краях диафрагмы, ограничивающей световой пучок, входящий в объектив (апертурная диафрагма). В результате дифракции изображение светящейся точки получается в виде светлого диска, окруженного рядом темных и светлых

колец, интенсивность которых быстро падает к периферии. В получившейся дифракционной картине центральный светлый кружок и следует считать изображением светящейся точки.

Разрешаемое расстояние идеальной линзы  $d$  определяется только образованием дифракционных кружков. По Релею [Л. 1.]

$$d = \frac{0,61\lambda}{n \sin \alpha}, \quad (1,2)$$

где  $\lambda$ —длина волны света, испускаемого предметом;  $\alpha$ —апертурный угол;  $n$ —показатель преломления среды, заполняющей пространство между предметом и объективом микроскопа. Произведение  $n \sin \alpha$  называется числовой апертурой.

В случае идеальной линзы согласно (1,2) разрешаемое расстояние будет тем меньше, а разрешающая сила тем больше, чем меньше длина волны света  $\lambda$ , чем больше апертурный угол  $\alpha$  и, наконец, чем больше показатель преломления  $n$  среды, заполняющей пространство между предметом и объективом микроскопа.

При микроскопических исследованиях рассматриваемый предмет очень мал и он находится вблизи главного фокуса объектива. Можно считать, что апертурный угол  $\alpha$  равен фактически углу между главной оптической осью и линией, соединяющей главный фокус с краем диафрагмы, ограничивающей линзу. Как уже указывалось выше, в объективах хороших современных микроскопов  $\sin \alpha = 1$ . В целях дальнейшего увеличения разрешающей силы заполняют пространство между предметом и объективом прозрачной жидкой средой с большим показателем преломления (например, кедровое масло с показателем  $n=1,5$  или монобромнафталин,  $n=1,66$ ). Итак, в самом оптимальном случае числовая апертура иммерсионной (с жидким наполнителем) объективной линзы микроскопа равна  $n \sin \alpha = 1,5—1,6$ . Подставляя это значение в формулу (1, 2), получим:

$$d = \frac{0,61\lambda}{1,5} \approx \frac{\lambda}{2}. \quad (1,3)$$

Таким образом, в лучшем случае—идеальная иммерсионная линза—разрешаемое расстояние примерно равно половине длины волны света, испускаемого светящимся объектом.

Для микроскопа, работающего с видимым светом, длины волн которого лежат, как известно, в интервале от  $\lambda=8000 \text{ \AA}$  ( $\text{\AA}=10^{-8} \text{ см}$ )—волны красного света—до  $\lambda=4000 \text{ \AA}$ —волны фиолетового света, в самом лучшем случае разрешаемое расстояние

$$d = \frac{4000 \text{ \AA}}{2} = 2000 \text{ \AA} = 2,10^{-5} \text{ см}. \quad (1,4)$$

Наибольшее полезное увеличение микроскопа, работающего с видимым светом,

$$M = \frac{0,02 \text{ см}}{d} = \frac{0,02}{2,10^{-5}} = 1000. \quad (1,5)$$

Используя для целей микроскопии невидимые глазом ультрафиолетовые лучи<sup>2</sup>, можно снизить длину волны до  $\lambda=2000 \text{ \AA}$ , а разрешаемое расстояние до  $d=1000 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ см}$

<sup>1</sup> Сферическая, кома, астигматизм, искривление поля, дисторсия.

<sup>2</sup> Микроскопы с кварцевой, флуоритовой или отражательной оптикой с применением флуоресцирующих материалов или фотографирования.

(более короткие ультрафиолетовые волны сильно поглощаются воздухом). Соответственно полезное увеличение ультрафиолетового микроскопа может быть поднято до  $M = 2000$ .

Дальнейшее увеличение разрешающей силы оптического микроскопа принципиально могло бы быть достигнуто переходом к еще более коротким волнам. Например, рентгеновским, длина которых в среднем в 1000 раз меньше световых волн. Однако, отсутствие сред, заметным образом преломляющих рентгеновские лучи, делает невозможным создание рентгеновских микроскопов на основе обычных принципов.

Таким образом, уже в начале нашего века стало ясным, что дальнейшее увеличение разрешающей силы микроскопов, основанных на использовании электромагнитных волн, невозможно. Совершенно новые перспективы открылись перед микроскопией после того, как была открыта волновая природа электронов и найдены эффективные способы управления электронными лучами.

**Электронные волны.** В 1924 г. Луи-де-Бройль [Л. 2] показал, что каждой движущейся частице можно приписать волну длиной

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2,1)$$

здесь  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  ergsec — постоянная Планка;  $m$  — масса частицы;  $v$  — скорость частицы.

Применительно к электронам, выражение (2,1) можно преобразовать, воспользовавшись уравнением энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \quad (2,2)$$

в котором  $e$  — заряд электрона;  $U$  — разность потенциалов между данной точкой поля и катодом.

Подставляя (2,2) в (2,1), получим:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}. \quad (2,3)$$

Идеи де-Бройля были подтверждены опытами Девиссона и Джермера [Л. 2], Томсона [Л. 2] и др., наблюдавших явление дифракции и интерференции электронных волн. Длины волн электронов, измеренные в этих опытах, оказались в точном соответствии с теорией де-Бройля.

Расчет показывает, что длина де-Бройлевской волны электрона при ускоряющем напряжении в 50 kV достигает 0,05 Å, иначе говоря, она в 100 000 раз короче длины волны видимого света.

Таким образом, при использовании электронных волн для целей микроскопии разрешающая сила электронного микроскопа могла бы быть, примерно в 100 000 раз больше, чем у оптического, работающего с видимым светом<sup>3</sup>.

Быстролетающие электроны, взаимодействуя с веществом, способны вызвать флюоресценцию, производить фотографическое действие, прохо-

дить насквозь, отражаться, преломляться, поглощаться и рассеиваться веществом. Эти свойства создают первую важную предпосылку для создания электронного микроскопа. Однако, для реализации этой возможности не менее важно выполнение второй предпосылки, а именно, создание электронных линз. Следует вспомнить, что именно отсутствие линз сделало невозможным построение рентгеновского микроскопа.

В 1881 г. Рике [Л. 3] теоретически показал, что электроны, вошедшие в однородное магнитное поле под некоторым углом к направлению поля, будут затем двигаться по винтовой линии, имея ось направление магнитного поля. Вихерт [Л. 4] в 1898 г. использовал этот эффект для того, чтобы при помощи длинной катушки сконцентрировать расходящийся пучок катодных лучей. Однако, особенно большое внимание вопросам фокусировки электронных лучей начинает уделяться с появлением катодного осциллографа Брауна (1897 г.). Работы в этой области приводят к введению в практику катодной осциллографии коротких катушек, являющихся не чем иным, как короткими магнитными линзами (Риан, 1903 г. [Л. 5], Ранкин, 1905 г. [Л. 6]).

**Возникновение электронной оптики.** Электронная оптика в современном смысле этого слова начинает развиваться только после появления работ де-Бройля и, в особенности, Буша. В 1926—1927 гг. Буш [Л. 7, 8] математически показал, что в любом неоднородном магнитном или электрическом поле, имеющем аксиальную симметрию, электронные лучи, выходящие достаточно узко расходящимися пучками (парааксиальными) из точки, лежащей на оси симметрии, снова сойдутся в одну точку — будут сфокусированы. Тем самым Буш теоретически обосновал все экспериментальные факты фокусировки пучков, которые были тогда известны и которыми пользовались на практике.

Исследуя случай короткой катушки, обтекаемой электрическим током, Буш показал, что аксиально симметричное поле такой катушки действует на электронные лучи подобно тому, как оптическая линза действует на световые лучи. Согласно Бушу, главное фокусное расстояние короткой магнитной линзы

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mU} \int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz, \quad (3,1)$$

где  $H(z)$  — значение напряженности магнитного поля на оси симметрии.

Чем больше значение  $\int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz$ , тем, очевидно

более короткофокусной, оптически более сильной, будет магнитная линза.

На рис. 4 в схематическом виде изображено действие на электронные лучи однородного магнитного поля длинной катушки и неоднородного, но аксиально-симметричного поля короткой катушки.

В случае длинной катушки электроны, вышедшие из какой-то точки с некоторой скоростью, все время движутся по винтовой линии. В самом деле, отклоняющая сила магнитного поля действует только на радиальную составляющую скорости электрона  $v_r = v \sin \alpha$ . Итак, эта сила

$$F = ev_r H.$$

<sup>3</sup> Разрешающая сила лучших современных электронных микроскопов только в 100 раз выше, чем у оптических. О причинах этого будет сказано дальше.

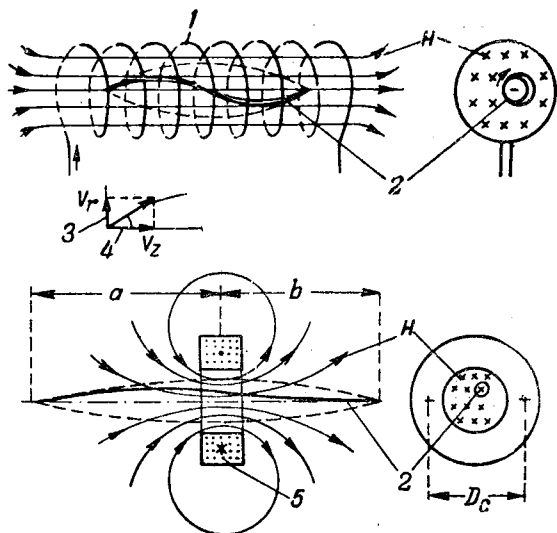


Рис. 4. Действие на электронные лучи магнитного поля длинной и короткой катушки.

1—длинная катушка; 2—траектория электронов; 3—радиальная составляющая скорости электрона; 4—составляющая скорости электронов вдоль оси катушки; 5—короткая катушка.

Под действием этой силы, направленной перпендикулярно к плоскости, проходящей через  $v_r$  и  $H$ , электрон должен двигаться по окружности. Одновременно он будет перемещаться вперед со скоростью  $v_z$ .

Радиус окружности, описываемой электроном, найдем, приравняв центробежную силу  $F$ :

$$\frac{mv_r^2}{r} = ev_r H. \quad (3.2)$$

Несмотря на разные радиусы окружностей и скорости электронов  $v_r$ , эти окружности пробегаются электронами за одинаковое время

$$T = \frac{2 \cdot \pi r}{v_r} = \frac{2 \pi m v_r}{v_r e H} = \frac{2 \pi m}{e H}. \quad (3.3)$$

Таким образом, приходим к заключению, что электроны, вышедшие в какой-то момент времени из точки А, сойдутся, спустя одно и то же время, во второй точке В, расположенной на той же силовой линии.

При протяженном источнике электронов, расположенном в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, получается протяженное и неповернутое его изображение в масштабе 1 : 1.

В поле короткой катушки электроны будут фактически двигаться по винтовой линии только в непосредственной близости от катушки и в ее полости. В этом случае плоскости объекта и изображения могут лежать вне поля катушки и здесь возможно достичь увеличенного или уменьшенного изображения предмета.

Буш показал, что для короткой катушки выполняются обычные соотношения геометрической оптики:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (3.4)$$

$$V = \frac{b}{a}, \quad (3.5)$$

в которых  $a$  — расстояние предмета до линзы;  $b$  — расстояние изображения до линзы;  $V$  — увеличение линзы. Следует отметить, что магнитная линза дает не только увеличенное или уменьшенное изображение предмета, но еще и поворачивает изображение вокруг оптической оси  $z$  по отношению к предмету на некоторый угол

$$\psi = \sqrt{\frac{e}{8 m U}} \int_{-\infty}^{+\infty} H(z) dz. \quad (3.6)$$

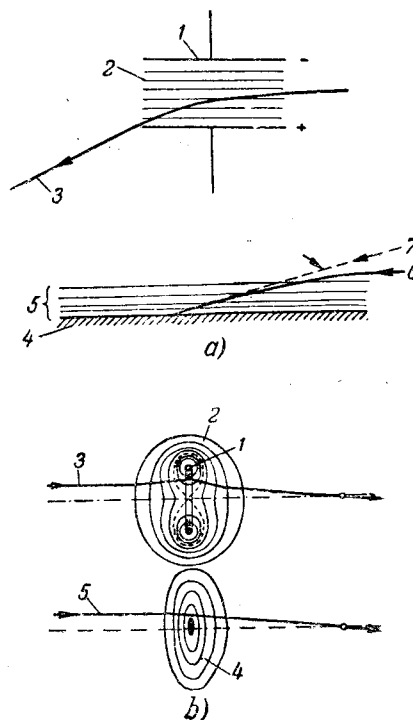


Рис. 5. Действие на электронные лучи однородного (а) и аксиально-симметричного (б) электрических полей и действие на световые лучи сред с меняющимся показателем преломления.

а) 1—плоский конденсатор; 2—эквипотенциальные поверхности; 3—направление движения электрона; 4—поверхность земли; 5—атмосфера, состоящая из слоев различной оптической плотности; 6—фактическое направление светового луча; 7—кажущееся наблюдателю направление светового луча.

б) 1—заряженное кольцо; 2—эквипотенциальные поверхности; 3—направление движения электрона; 4—хрусталик человеческого глаза, состоящий из слоев различной оптической плотности; 5—направление светового луча.

Для расчета главного фокусного расстояния можно пользоваться следующей рабочей формулой:

$$f \approx 50 \frac{U D_c}{i^2 n^2}; \quad (3.7)$$

здесь  $in$  — число ампервитков катушки;  $D_c$  — средний диаметр катушки в сантиметрах.

Наименьшее фокусное расстояние, достижимое при помощи короткой многослойной катушки, равно, примерно, ее среднему диаметру.

Для случая любых неоднородных, но аксиально-симметричных электростатических полей, как показал Буш, также будет иметь место фокусировка электронов, выходящих достаточно узким расходящимся пучком из точки, лежащей на оси симметрии.

При этом воздействие электрического поля на электронные лучи подобно действию на световые лучи оптической среды с переменным показателем преломления. В этой аналогии величина  $VU$  выполняет роль коэффициента преломления, а эквипотенциальные поверхности электрического поля — роль поверхностей, разделяющих оптически разные среды. На рис. 5 показано действие на электронный луч однородного электрического поля плоского конденсатора и аксиально-симметричного поля заряженного кольца. Соответственно для сравнения здесь же изобра-



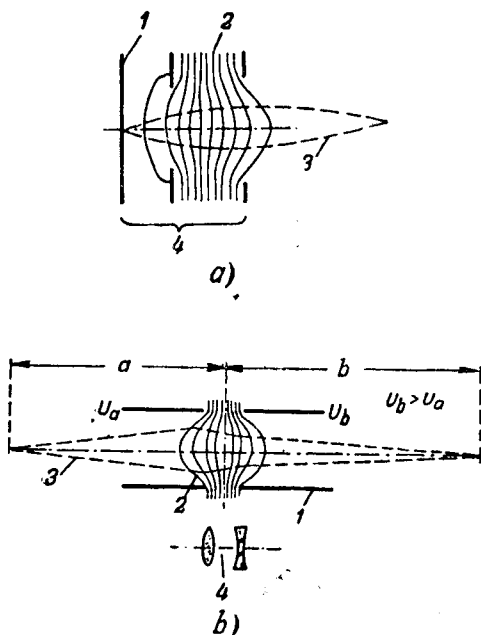


Рис. 6. Схематический разрез двух типичных линз иммерсионного типа.

*a)* 1—катод; 2—эквипотенциальные поверхности; 3—электронные лучи; 4—иммерсионный объектив.

*b)* 1—цилиндрическая иммерсионная линза; 2—эквипотенциальные поверхности; 3—электронные лучи; 4—оптическая аналогия  $U_a$ ,  $U_b$  — потенциалы электродов цилиндрической линзы.

жено действие на световой луч земной атмосферы и хрусталика человеческого глаза, состоящего, как известно, из ряда слоев, имеющих различные показатели преломления.

Строгую теорию электростатических собирающих линз, основываясь на теоретических работах Буша и экспериментальных исследованиях Брюхе, дали в 1932 г. Иогансон и Шерцер [Л. 10].

Электроды для электрических линз служат обычно металлические диски с отверстиями или полые цилиндры. В зависимости от того, меняется или нет скорость электронов по величине по прохождении ими всей линзы, в электронной оптике различают, соответственно, иммерсионные и одиночные электростатические линзы. На рис. 6 приведен разрез двух типичных линз иммерсионного типа. Первая из них носит название иммерсионного объектива. Для нее характерно наличие катода, эмитирующего электроны. Вторая линза иммерсионного типа относится к цилиндрическим линзам.

Фокусирующее действие обеих линз на электроны можно объяснить, пользуясь формальной аналогией между эквипотенциальными поверхностями поля и поверхностями оптических линз. Как показывает рисунок, если потенциал правого цилиндра (где электроны выходят из линзы) выше потенциала левого цилиндра (где электроны входят в линзу), то левая часть линзы является собирающей, а правая рассеивающей (см. оптическую аналогию, изображенную под цилиндрической линзой). Преобладание собирающего действия линзы объясняется тем, что в ле-

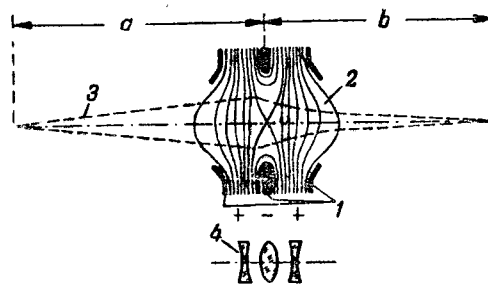


Рис. 7. Схематический разрез одиночной электростатической линзы.

1—электроды одиночной линзы; 2—эквипотенциальные поверхности; 3—электронные лучи; 4—оптическая аналогия.

вой части линзы электроны, еще не набравшие всей скорости, сообщаемой линзой, легче поддаются влиянию отклоняющих сил этого поля, чем в правой.

Широко используемые в катодной осциллографии, катодном телевидении и электронной микроскопии источники электронных лучей, так называемые «электронные пушки», являются с электронно-оптической точки зрения не чем иным, как комбинированными линзами иммерсионного типа (иммерсионный объектив плюс ускоряющие цилиндрические линзы).

Вторым и наиболее важным для дальнейшего изложения типом электростатических линз является одиночная электростатическая линза, схема действия которой изображена на рис. 7. Потенциал поля перед одиночной линзой и позади нее одинаков; он меняется лишь внутри линзы благодаря наличию среднего электрода, находящегося под потенциалом, отличным от потенциала крайних электродов.

Решающим фактором для определения рассеивающего или собирающего действия данного участка поля линзы на летящие электроны является направление электрических силовых линий.

На рис. 7, ниже схемы отдельной электростатической линзы, изображена оптическая схема, эквивалентная данной электрической линзе. Строгая теория одиночной электростатической линзы показывает, что независимо от того, находится ли средний электрод линзы под более высоким или более низким потенциалом относительно внешних электродов, она всегда будет действовать на электроны как собирающая линза.

Вообще говоря, всякое реальное электростатическое поле с аксиальной симметрией эквивалентно толстой линзе. Для определения траектории электронов в этом случае требуется знать положение объекта, изображения и двух главных плоскостей линзы, что представляет большие трудности. Задача заметно облегчается, если аксиально-симметричное поле ограничено столь узкой областью  $ab$  вдоль оси  $z$ , что электрон в течение времени пребывания в поле не успеет заметно удалиться от оси. В этом случае электростатическую линзу можно рассматривать как тонкую, и все расчеты значительно упрощаются.

Для «тонкой» электростатической одиночной<sup>4</sup> линзы теория дает следующие соотношения:

<sup>4</sup> Для цилиндрической линзы формулы будут несколько отличны.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (3,8)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{8V\Phi_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Phi'^2}{r^3} dz, \quad (3,9)$$

$$V = \frac{b}{a}; \quad (3,10)$$

здесь  $a$  и  $b$  — расстояния предмета и его изображения до среднего электрода;  $\Phi$ ,  $\Phi'$  — потенциал на оси симметрии и его производная;  $\Phi_0$  — потенциал пространства перед или за линзой.

Уравнение (3,9) является однородным относительно потенциала  $\Phi$ . Поэтому одновременное увеличение напряжений между электродами линзы и напряжения, ускоряющего электроны в одно и то же число раз, не окажет влияния на величину фокусного расстояния линзы. Таким образом, уменьшение фокусного расстояния электростатической линзы, т. е. увеличение ее преломляющей силы, может быть осуществлено только путем увеличения напряжения или спада потенциала внутри линзы, т. е. в первую очередь путем уменьшения расстояния между электродами линзы. Ниже будет изложено, какие факторы ограничивают эту возможность увеличения преломляющей силы электростатической линзы.

После классических работ де-Бройля и Буша магнитные и электростатические методы фокусировки электронов получают прочную теоретическую основу и подвергаются дальнейшему экспериментальному и теоретическому изучению.

В 1931 и 1932 гг., почти одновременно, появляются работы Кнолля и Руска [Л. 11, 12], Брюхе и Иогансона [Л. 13], получивших увеличения электронооптические изображения катодов. Кнолль и Руска получали изображения катода и сеток, поставленных на пути электронов, при помощи магнитных линз, Брюхе и Иогансон получали изображение оксидного катода при помощи иммерсионного объектива. Опуская из-за недостатка места подробное изложение всей последующей истории развития электронной оптики и электронной микроскопии, отметим лишь, что их дальнейшее развитие пошло по двум уже первоначально намечившимся, самостоятельным и вместе с тем параллельным направлениям — по пути магнитной и электростатической оптики.

**Магнитные и электростатические линзы большой преломляющей силы.** Как известно, в оптических микроскопах используют короткофокусные объективы. Это диктуется тем, что, во-первых, при неизменной апертуре пучка aberrации (ошибки) объектива падают с уменьшением его фокусного расстояния, во-вторых, при короткофокусном объективе более высокое увеличение может быть получено при меньшей длине тубуса микроскопа. По тем же соображениям и в электронной микроскопии применяют исключительно короткофокусные объективы. Только используя объективы с фокусным расстоянием в несколько миллиметров и апертурные углы электронных пучков на два или три порядка меньше апертур, употребляющихся в оптической микроскопии, удается серьезно ослабить влияние aberrаций и получать при помощи электронного микроскопа изображения высокого качества.

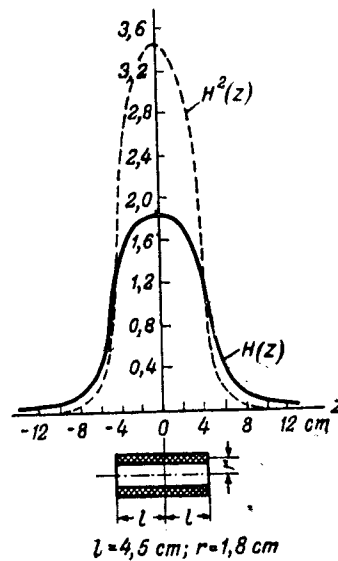


Рис. 8. Графическая зависимость магнитного поля внутри однослойной катушки.

**Магнитные линзы.** При заданной скорости электронов главное фокусное расстояние короткой магнитной линзы определяется всецело величиной  $\int_{-\infty}^{+\infty} H^2(z) dz$ . На рис. 8 изображены за-

висимости  $H(z)$  и  $H^2(z)$ , вычисленных и построенных для однослойной катушки. Квадратичная зависимость фокуса от напряженности магнитного поля показывает, что для уменьшения выгодно пользоваться магнитными полями малой протяженности, но с большими значениями напряженности поля. Серьезный шаг в этом направлении сделали впервые Руска и Кнолль [Л. 12] в 1931 г. Для уменьшения протяженности магнитного поля линзы при одновременном сохранении большого числа ампервитков они предложили воспользоваться так называемыми панцирными катушками. В панцирной катушке (рис. 9) обмотка полностью заключена в железный цилиндрический панцирь, имеющий на внутренней стороне небольшой кольцевой зазор. Магнитное поле такой катушки концентрируется в непосредственном окружении узкого кольцевого зазора. Наименьшее достижимое в панцирной катушке фокусное расстояние равно примерно диаметру внутреннего цилиндра железного панциря ( $f \approx D_1$ ).

Дальнейшим весьма серьезным усовершенствованием магнитных линз было применение Руска и Боррисом (1932—1934 гг.) [Л. 23, 24, 25] специальных полюсных наконечников. Это изобретение позволило создать весьма короткофокусные магнитные линзы, что явилось предпосылкой к построению магнитного электронного микроскопа большой разрешающей силы. В схематическом виде поперечный разрез магнитной линзы с по-

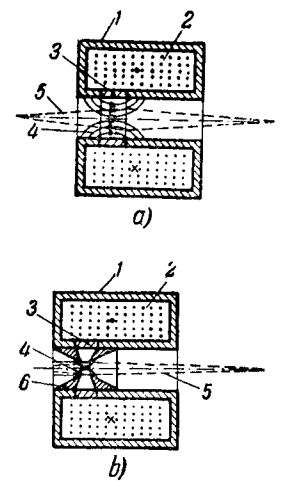


Рис. 9. Схематический разрез панцирной линзы без наконечников (а) и с наконечниками (б). 1 — железный панцирь; 2 — обмотка. 3 — зазор из немагнитного материала; 4 — магнитные силовые линии; 5 — электронные лучи; 6 — полюсные наконечники.

люсными наконечниками дан на рис. 9. Как показывает расчет, фокусное расстояние такой линзы

$$f = 48,4 \frac{UD_2}{i^2 n^2} k, \quad (4,1)$$

где  $k$  — коэффициент, определяющийся формой катушки;  $D_2$  — диаметр отверстия полюсных наконечников. И в случае магнитной линзы с наконечниками наименьший фокус, который может быть получен, равен  $D_2$ . Фокусное расстояние магнитной линзы с наконечниками во столько раз короче фокусного расстояния простой панцырной катушки, во сколько  $D_2$  меньше  $D_1$ .

Руска [Л. 26, 27] показал, что наилучшее действие магнитной линзы при полюсных наконечниках конической формы получается при отношении диаметра отверстия полюсных наконечников к расстоянию концов наконечников, равном 4 : 3.

Предел дальнейшему уменьшению фокусного расстояния путем уменьшения диаметра отверстия полюсных наконечников и соответствующего уменьшения их расстояния кладет влияние магнитного насыщения концов наконечников.

При ускоряющих напряжениях порядка 50—100 кВ, обычно употребляемых в электронной микроскопии, минимальное фокусное расстояние хороших современных магнитных объективов равно 1—3 мм.

Полюсные наконечники объективной линзы Руска и Борриса [Л. 28, 29] вставляются в специальный патрон, который укрепляется во внутреннем цилиндре панцыря катушки. Панцырь сделан из мягкого железа (например, армко). Зазор (рис. 9) в его внутреннем цилиндре заделан обычно латунью, так что внутренний цилиндр панцыря плотно отделяет вакуумную часть колонны микроскопа от обмоточного пространства. Верхний и нижний полюсные наконечники, собранные в один узел, также отделены друг от друга латунным кольцом.

В панцырных катушках распределение магнитного поля вдоль оси линзы определяется баллистическим методом. Точная кривая распределения магнитного поля вдоль оси линзы была получена по этому методу впервые в 1941 г. Доссе [Л. 30] и недавно при улучшенной методике эксперимента Поливановым и Плаховым. Она имеет тот же «колоколообразный» вид, что и кривая, изображенная на рис. 8.

Согласно Глазеру [Л. 31] уравнение подобной колоколообразной кривой может быть представлено в виде:

$$H(z) = \frac{H_0}{\left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^\mu}; \quad (4,2)$$

здесь  $H(z)$  — значение напряженности магнитного поля вдоль оси линзы;  $H_0$  — напряженность магнитного поля в максимуме кривой;  $a$  и  $\mu$  — постоянные, связанные некоторой функциональной зависимостью и определяемые так, чтобы теоретическая кривая как можно лучше совпадала с эмпирической кривой.

Панцырные магнитные линзы с наконечниками и без них являются основными элементами всех современных магнитных электронных микроскопов. Их качество в очень сильной степени определяется точностью механической обработки и изготовления полюсных наконечников, качеством и однородностью магнитного материала и тому подобными факторами

Киндер [Л. 32] и Пендих [Л. 32] создали так называемую магнитную ярмовую линзу, однако вследствие своей малой разрешающей силы эта линза не получила дальнейшего развития.

**Электростатические линзы.** Выше было показано, что уменьшение фокусного расстояния одиночной электростатической линзы может быть осуществлено путем сближения электродов линзы. Напряжение между электродами в электростатических микроскопах составляет величину порядка 50—60 кВ. Легко сообразить, что уменьшение фокусного расстояния электростатической линзы путем сближения электродов имеет свои пределы. Они определяются вакуумом, материалом электродов и состоянием их поверхности. Лишь тщательное использование всего опыта техники высоких напряжений позволило Малю и Бершу [Л. 22] и независимо от них Арденне [Л. 34] создать одиночную электростатическую линзу с фокусным расстоянием в несколько миллиметров.

Длина свободного пробега молекул газа при давлениях порядка  $10^{-5}$  мм очень велика по сравнению с размером линзы, поэтому влиянием ударной ионизации на величину предельного расстояния электродов можно пренебречь. Расстояние между электродами, таким образом, определяется эмиссией электродов, вызванной бомбардировкой их поверхностей ионами. Отсюда возникает необходимость иметь в линзе, по возможности, хороший вакуум и пользоваться хорошо обезгаженными электродами, сделанными из материала с большой работой выхода. Не менее решающее влияние на электрическую прочность межэлектродного промежутка линзы имеет состояние их поверхности. Случайные неровности могут создать значительные градиенты поля, влекущие за собой появление холодной эмиссии. В короткофокусной электростатической линзе все острые части электродов линзы должны быть тщательно закруглены, электроды тщательно отполированы. На рис. 10 изображен разрез одиночной короткофокусной линзы, разработанной Бершем и Малем.

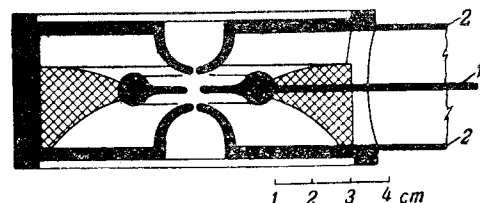


Рис. 10. Разрез одиночной электростатической линзы Малю и Берша.

1—центральный электрод; 2—крайние электроды.

Гольц показал [Л. 35], что наилучшим материалом для электродов короткофокусных электростатических линз является хромоникелевая сталь, могущая при хорошем качестве полировки выдерживать градиенты на поверхности порядка 44 kV/cm и не снижающая их ниже 275 kV/cm, даже после многочисленных пробоев.

Наилучшие электростатические линзы, которые удалось построить Малю для объективов своего электростатического микроскопа, имели главное фокусное расстояние около 3—5 мм при расстоянии между центральным электродом и каждым внешним в 3 мм. В конструкции Маля центральный электрод присоединяется к катоду, а крайние электроды к аноду высокого напряжения. Плавная регулировка оптической силы отдельной электростатической линзы обычно не производится. Ниже мы познакомимся с тем, как в электростатических микроскопах регулируют увеличение проекционной линзы.

**Недостатки электронных линз.** Подобно оптическим линзам электронные линзы также имеют свой предел разрешения. Кроме дифракции, хроматической и сферической аберраций, разрешающая сила этих линз определяется также рядом специфических причин: взаимным отталкиванием электронов, влиянием зарядов и посторонних магнитных полей и тому подобными факторами. Основными факторами, определяющими разрешающую силу электронных линз, являются дифракция, хроматическая и сферическая аберрация.

**Дифракция.** Разрешаемое расстояние  $d$  идеальных электронных линз при самосветящихся электронных объектах

$$d_{\text{диф}} = \frac{0,61 \lambda}{n \sin \alpha} \approx \frac{0,61 \lambda}{\alpha}, \quad (5,1)$$

где  $\lambda$  — длина де-Бройлевской волны электрона;  $\alpha$  — апертурный угол (всегда малый);  $n$  — показатель преломления, который для электронных линз следует положить равным единице.

В идеальных электронных линзах также выгодно было бы пользоваться большими апертурами  $\alpha$ . Однако, в отличие от хороших оптических линз, электронные линзы нельзя считать идеальными даже при тех незначительных апертурах, к которым приходится прибегать для уменьшения влияния аберраций<sup>5</sup>.

**Сферическая аберрация.** По Ребшу [Л. 36] разрешаемое расстояние электронной линзы, обусловленное сферической аберрацией,

$$d_{\text{сф}} = 0,4 C f \alpha^3, \quad (5,2)$$

где  $C$  — постоянная, зависящая от конфигурации поля линзы;  $\alpha = \frac{D}{2f}$  — апертура, измеряемая отношением половины диаметра отверстия  $D$  диафрагмы к фокусному расстоянию линзы  $f$ .

Формулы (5,2) и (5,1) показывают, что в то время как при заданном  $f$  разрешающая сила электронной линзы, зависящая от сферической аберрации, чрезвычайно быстро падает с увеличением апертуры  $\alpha$ , разрешающая сила, определяемая дифракцией, с увеличением апертуры растет. Принимая, что разрешаемое расстояние при нали-

ции сферической аберрации и дифракции определяется величиной

$$d = d_{\text{диф}} + d_{\text{сф}} \quad (5,3)$$

после подстановки сюда (5,2) и (5,1) получим:

$$d = \frac{0,61 \lambda}{\alpha} + 0,4 C f \alpha^3. \quad (5,4)$$

Считая  $f$  постоянной величиной, можно, следуя Шерцеру [Л. 37], легко найти то оптимальное значение апертуры, при которой разрешаемое расстояние  $d$  имеет минимальное значение, а следовательно, разрешающая сила максимальна. Эти величины:

$$\alpha_{\text{opt}} = \left( \frac{\lambda}{2 C f} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (5,5)$$

$$d_{\text{min}} = 0,95 \lambda^{\frac{3}{4}} (C f)^{\frac{1}{4}}. \quad (5,6)$$

Подсчет дает, что для лучших магнитных объективов, которыми пользуется современная электронная микроскопия, величина  $C f$  лежит в пределах между 0,2 и 2 см, а соответствующие величины  $\alpha_{\text{opt}}$  и  $d_{\text{min}}$  равны:

$$\alpha_{\text{opt}} = 6 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3} [\text{rad}],$$

$$d_{\text{min}} = 7 \div 13 [\text{Å}].$$

Фактически достижимое разрешаемое расстояние существующих электронных микроскопов не падает ниже  $d = 20-30 \text{ Å}$ .

Лишь в самое недавнее время Хийе [Л. 38, 61] опубликовал работу, в которой он получил разрешение электронного микроскопа, совпадающее с теоретическим, т. е. порядка 8—13 Å.

Изложенное показывает, что значения апертур, которыми приходится пользоваться в объективах электронных микроскопов, на 2—3 порядка меньше апертур, принятых в обычных оптических микроскопах. Наличие даже при этих значениях  $\alpha$  сферической аберрации вместе с заметным влиянием дифракции и некоторых других факторов (см. дальше) приводит к тому, что, несмотря на использование длин волн в 100 000 раз более коротких, чем в оптических микроскопах, разрешающая сила электронных микроскопов всего лишь в 100 раз больше оптических.

**Хроматическая аберрация.** Ограничимся рассмотрением так называемой простой хроматической аберрации, вызванной различным преломлением электронов, имеющих разные скорости.

Согласно Глазеру [Л. 63], в строго центрированных электронных линзах разрешаемое расстояние  $d_{xp}$ , зависящее от различного преломления электронов разной скорости,

$$d_{xp} = K \left( \frac{\Delta U}{U} \right) f \alpha, \quad (5,7)$$

где  $\Delta U$  — разброс скорости электронов в вольтах. Для магнитных линз постоянную  $K$  можно считать равной 0,75, для одиночных электростатических линз с центральным электродом, присоединенным к катоду,  $K$  в пять раз больше.

Разброс электронов по скорости обусловлен: 1) максимальным распределением электронов по скоростям по вылете из катода; 2) флуктуациями напряжения, ускоряющего электроны; 3) изменением скоростей электронов при взаимодействии с облачаемым объектом.

При вольфрамовом катоде, накаливаемом до 2960° K, средний разброс скоростей, обусловленный распределением электронов, вылетевших из катода, по закону Максвелла не превышает величины  $\Delta U = 0,25 \text{ V}$ . Для магнитного объектива ( $k = 0,75$ ) при ускоряющем напряжении  $U = 50 \text{ kV}$ , фокусном расстоянии  $f = 4 \text{ mm}$  и апертуре  $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$d_{xp} = 0,5 \text{ Å}$ , что на один порядок меньше, чем разрешаемое расстояние, определяющееся сферической аберрацией и дифракцией. Таким образом, хроматическую абер-

<sup>5</sup> Скорректировать аберрации каким-либо другим способом, кроме уменьшения отверстий диафрагмы, пока не удалось.

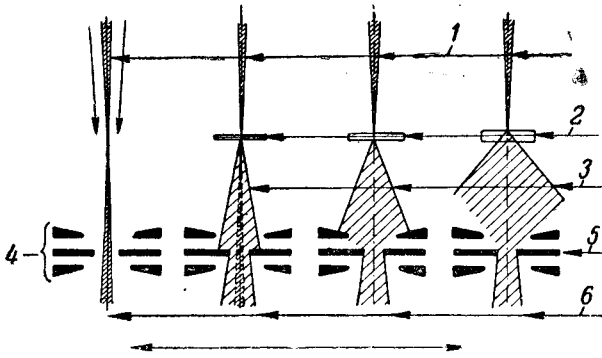


Рис. 11. Характер взаимодействия электронов с веществом объекта.

1—пучок электронов, падающий на объект; 2—объект; 3—рассеянный пучок электронов; 4—полюсные наконечники объективной линзы; 5—апертурная диафрагма; 6—пучок электронов, прошедший объективную линзу.

рацию, вызванную первоначальным разбросом по скоростям в случае катодов с накаливаемой нитью, можно не принимать во внимание. В случае использования холодного катода, бомбардируемого ионами, средний разброс скоростей возрастает до значения  $\Delta U \approx 10$  В, и это дает уже заметную хроматическую aberrацию. Именно поэтому в электронных микроскопах предпочтительно пользуются накаленными катодами.

Медленные флуктуации электрического напряжения, ускоряющего электроны, при сравнительно коротком времени экспозиций, используемых в электронной микроскопии, еще не приносили бы особого вреда. Однако, при использовании высоких напряжений, получающихся в результате выпрямления переменного тока, приходится принимать специальные меры для сглаживания пульсаций, обусловленных выпрямлением, а также вызванных случайными причинами. Расчет показывает, что для достижения разрешаемого расстояния порядка  $10 \text{ \AA}$  величина  $\frac{\Delta U}{U}$  при  $U = 50-100$  кВ не должна превышать 0,01%. Как будет показано ниже (раздел «схема питания»), такой процент пульсации напряжения может быть обеспечен при помощи специальных стабилизирующих устройств.

Хроматическая aberrация, вызванная изменением скоростей электронов при взаимодействии с «освещаемым» объектом, является наиболее трудно учитываемой величиной.

В электронных микроскопах, работающих на просвет, в которых объект «просвечивается» внешними по отношению к нему пучками электронов, следует различать случаи, когда просвечиваемый предмет представляет собой чередование совершенно прозрачных и совершенно непрозрачных для электронов участков (силуэтные объекты) и когда взаимодействие электронов с объектом приводит к рассеянию и частичному поглощению электронов.

При первом объекте хроматическая aberrация сведена фактически к нулю и ее можно игнорировать.

Характер взаимодействия электронов с веществом объекта схематически представлен на рис. 11. Если объект достаточно толст или плотен, то часть электронов, упавших на него, неизбежно поглощается и выбывает при этом из дальнейшей «игры». Поглощение электронов зависит от толщины объекта и происходит по экспоненциальному закону.

Что касается электронов, прошедших через объект, то, вообще говоря, они рассеиваются и теряют свою скорость. По вопросу рассеяния электронов в веществе существует много как теоретических, так и экспериментальных работ. Обстоятельный обзор на эту тему дан в известной статье Бете [Л. 62]. Мы ограничимся здесь только рассмотрением вопроса о потере электронами при рассеянии своей скорости. Другие проблемы рассеяния, важные для электронной микроскопии, будут рассмотрены ниже.

Рассеяние электронов вызывается их взаимодействием с атомами вещества. Оно может сопровождаться или значительной потерей энергии (неупругое рассеяние) или про-

исходить без потери энергии (упругое рассеяние). В первом случае энергия, потерянная электроном, идет на возбуждение атома или на его ионизацию. Когда электрон падает на твердое тело, неупругое рассеяние может быть вызвано также взаимодействием падающих электронов со свободными электронами материала. Точные количественные данные о процессах рассеяния могут быть получены только на базе квантово-механических методов. Однако, вполне удовлетворительные результаты можно получить на основе классической теории, рассматривая упругое рассеяние как результат столкновения электрона с ядрами, а неупругое — как результат последовательных столкновений с электронами.

Максимальная энергия, которую может потерять электрон при столкновении с протоном (ядром водорода), составляет  $\frac{1}{500}$  его первоначальной энергии [Л. 40]. Этот

случай соответствует углу отклонения в  $180^\circ$ . При меньших углах отклонения потеря энергии электроном совсем незначительна. В результате взаимодействия летящего электрона с электроном вещества будет передаваться значительно большая энергия. При этом для одинаковых углов отклонения потеря энергии электроном при столкновении

с электроном будет в  $\frac{M}{m}$  раз больше, чем при столкновении с ядром ( $M$  — масса протона;  $m$  — масса электрона; для ядра водородного атома отношение  $\frac{M}{m}$  наименьшее — 1 837).

Таким образом, главной причиной потери быстрыми электронами, прошедшими и вещество, своей скорости является их взаимодействие с электронами вещества.

Скорость электронов, проходящих через вещество объекта в электронном микроскопе, очень большая и можно считать все электроны вещества относительно них покоящимися.

Изменение энергии электрона, первоначально летящего со скоростью  $v_0$ , вызванное его столкновением с первоначально неподвижным электроном, определяется формулой [Л. 40]:

$$\Delta E = e \Delta U = \frac{mv_0^2}{2} \sin^2 \delta; \quad (5,8)$$

здесь  $\Delta E = e \Delta U$  — изменение, энергии электрона, выраженное через заряд и «эквивалентное» изменение напряжения, ускорявшего электроны;  $v_0$  — первоначальная скорость;  $\delta$  — угол отклонения электрона.

Проходя через вещество электронно-микроскопического объекта, электрон, даже в случае если объект тонок, испытывает много столкновений. При достаточной толщине объекта потеря скорости электронами, вышедшими из него, может быть весьма ощутительной. При толщине пленки в  $10^{-3}$  мкм и удельной плотности ее, равной единице, электроны, ускоренные напряжением в  $U=100$  кВ, теряют в среднем скорость, равную  $\Delta U=80$  В. Для разрешения порядка  $10 \text{ \AA}$  величина  $\frac{\Delta U}{U}$  не должна превышать 0,01%. Легко

понять, почему для получения изображений высокого качества в электронной микроскопии важно пользоваться тонкими объектами.

Если приспособить формулу для разрешаемого расстояния, вызванного хроматической aberrацией, к случаю, когда aberrация обусловлена только потерей скорости электронов в веществе объекта, то получается следующее выражение:

$$d_{xp} = kf \left( \frac{\Delta U}{U} \right) a = \frac{Ckf a}{U^2} x, \quad (5,9)$$

где  $x$  — толщина объекта;  $C$  — постоянная, зависящая от рода вещества. Ее можно определить, если известна плотность, порядковый номер и атомный вес вещества объекта.

Расчет показывает [Л. 40], что при толщине объекта в  $0,5 \cdot 10^{-4}$  мкм и плотности вещества  $\rho$ , равной единице, для [магнитной линзы, у которой  $k=0,75$  и  $f=0,3$  см и

$\alpha = 3,4 \cdot 10^{-3}$  рад, разрешаемое расстояние, обусловленное потерей скоростей электронами, проходящими через вещество,

$$d_{xp} = \frac{Ckf\alpha}{U^2} x = 10 \text{ \AA} \text{ при } U = 100 \text{ kV}, \quad (5,10)$$

$$d_{xp} = \frac{Ckf\alpha}{U^2} x = 25 \text{ \AA} \text{ при } U = 5 \text{ kV}. \quad (5,11)$$

Как видим, в ряде случаев  $d_{xp}$  может быть действительно довольно значительным <sup>6</sup>.

В то время как в микроскопах, работающих на просвечивание, величину  $\frac{\Delta U}{U}$  удается снизить до малых значений,

употребляя тонкие объекты и пользуясь электронами большой скорости, в отражательных системах, в результате вторичной эмиссии и неупругих отражений, электронные лучи, идущие от объекта в линзы, имеют большой разброс по скоростям. Именно этим обстоятельством, как мы увидим ниже, объясняется сравнительно невысокая разрешающая сила отражательных микроскопов.

### Основные системы электронных микроскопов.

По роду используемых электронных линз различают магнитные и электростатические системы микроскопов. По способу исследования объектов электронные микроскопы обеих систем могут быть разделены на следующие виды: 1) эмиссионные; 2) работающие на просвет; 3) отражательные; 4) растровые; 5) теневые. Наибольшие успехи были достигнуты при помощи электронного микроскопа, работающего на просвет. Хронологически первыми были эмиссионные микроскопы.

**Эмиссионный микроскоп.** В эмиссионных микроскопах исследуемый объект одновременно является и источником электронов. Ускоряясь и преломляясь в электрическом поле первой иммерсионной линзы, электроны проходят затем через систему магнитных или электростатических линз и дают на флуоресцирующем экране или фотопластинке изображение источника электронов.

На рис. 12 представлен в схематическом виде разрез первых эмиссионных микроскопов Кнолля-Руска [Л. 11, 12] и Брюхе-Иогансона [Л. 13].

В зависимости от способа, которым высвобождаются электроны из катодов, эмиссионные микроскопы делятся на термоэлектронные, фотоэлектронные, вторично-эмиссионные и микроскопы с холодной эмиссией.

Изучение катодов термоэлектрическим способом производили Иогансон-Брюхе [Л. 41, 42], Маль [Л. 43], Кнолль [Л. 44], Мекленбург [Л. 45], Бургер и Плюос фон Амстель [Л. 46], Гейнце [Л. 47], Мартин [Л. 48], Н. Г. Сушкин [Л. 49] и др. Фотоэлектрическим способом катоды эмиссионных микроскопов изучались Кноллем и Руска [Л. 12], Брюхе [Л. 50], Полем [Л. 51], Малем [Л. 52] и др. Изображения катодов при помощи вторичных электронов получали Зворыкин [Л. 53], Мештер [Л. 54], Бене [Л. 39] и др. Нако-

<sup>6</sup> Однако, следует учесть, что объекты, используемые обычно в электронной микроскопии, на порядок тоньше тех, для которых получились значения  $d_{xp}$  по формулам (5,10) и (5,11).

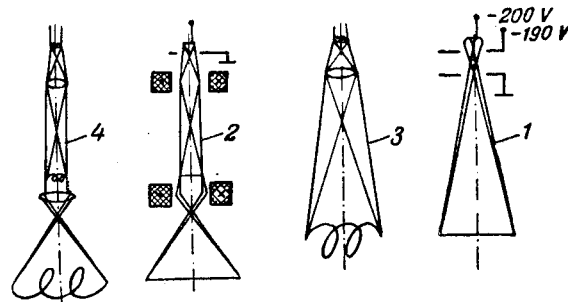


Рис. 12. Схематический разрез первых эмиссионных микроскопов.

1 - электростатический микроскоп Брюхе и Иогансона; 2 - магнитный микроскоп Руска и Кнолля; 3-4 - оптические аналогии микроскопов.

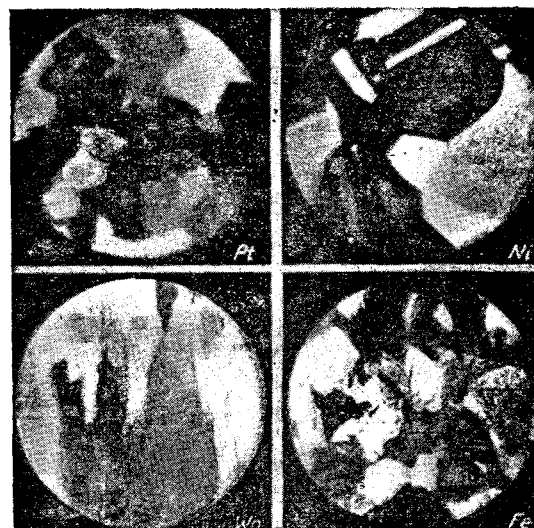


Рис. 13. Поверхностная структура платины, никеля, вольфрама и железа (термоэлектронный эмиссионный микроскоп).

нец эмиссионный электронный микроскоп без линз, в котором использовалось явление холодной эмиссии под действием поля с острия с радиусом кривизны в доли микрона, был впервые описан в 1937 г. Мюллером [Л. 55]. При помощи этого прибора исследовалось влияние кристаллической структуры острия и его покрытия на процессы электронной эмиссии. Увеличение, достигнутое Мюллером, равнялось 1 000 000 : 1 и определялось отношением радиуса шарового флуоресцирующего экрана, где рассматривалось изображение катода, к радиусу острия.

Наибольший интерес микроскопы этого вида в силу своей специфичности представляют для физики и техники катодов электровакуумных и газонаполненных приборов. Некоторое применение эмиссионный микроскоп получил, однако, и в области металлографии. Покрывая исследуемые металлы материалами, способствующими эмиссии электронов, удалось получить изображения поверхностей как бы в другом «свете».

Эмиссионный микроскоп обладает той специфической особенностью, что он позволяет наблюдать металл при нагреве и дает возможность видеть поверхности как бы в другом «свете».

На рис. 13 даны фотографии различного вида катодов, полученных при помощи эмиссионных микроскопов.

Работы по эмиссионной микроскопии дали много нового и интересного (изучение процессов в оксидных катодах, процессов рекристаллизации в железе при переходе из  $\alpha$ -фазы в  $\gamma$ -фазу и т. д.). Но все же микроскопы этого вида не получили серьезного развития вследствие их незначительной разрешающей силы. Разрешающая сила эмиссионных микроскопов, как правило, на целый порядок ниже разрешающей силы, даваемой хорошими оптическими микроскопами. Лишь в 1942 г. Мекленбургу [Л. 45] удалось, применив высоковольтные электростатические линзы, получить при исследовании оксидных катодов разрешение порядка 200 Å. Доссе и Мюллер [Л. 56], Пихт [Л. 57], Рекнагель [Л. 58] и др. рассчитывали теоретически пределы разрешения эмиссионных микроскопов.

*Микроскопы, работающие на просвет.* В этом типе микроскопа исследуемый объект не испускает самостоятельно электронов, а «просвечивается» электронами, летящими из электронной пушки. В системах, работающих на просвет могут быть, таким образом, исследованы объекты, для которых самостоятельная эмиссия электронов невозможна или нежелательна (например, биологические объекты). Единственное требование, которое предъявляется к объектам, если они не являются предметами силуэтного типа (сетки и тому подобные предметы), это быть прозрачными для электронов и сохранять устойчивость в вакууме при электронной бомбардировке (не испаряться, сохранять свою форму и т. д.).

В первых образцах электронных микроскопов, работающих на просвет исследовались мелкие металлические сетки—объекты силуэтного типа, в которых, как уже указывалось, участки абсолютно прозрачные для электронов чередовались с абсолютно непрозрачными. В результате на конечном экране получалось сильно увеличенное изображение сетки. Однако, очень скоро Руска и Боррис показали, что при помощи электронов можно получать на просвет изображение предметов, положенных на тонкие и поэтому прозрачные для электронов пленки (органические пленки, металлические фольги). В 1937 г. Мартон [Л. 59], поместив бактериологический препарат на коллодиевую пленку, впервые получил электронооптические изображения бактерий<sup>7</sup>.

На рис. 1 в схематическом виде дан разрез проекционного оптического и электронных микроскопов, работающих на просвет, магнитного и электростатического типов.

В магнитном электронном микроскопе электроны, вышедшие узким расходящимся пучком из электронной пушки, попадают в длиннофокусную конденсорную магнитную линзу (панцирная линза без наконечников), которая сводит эти

лучи на объекте. В случае электростатического микроскопа фокусировка электронов на объект производится непосредственно электронной пушкой при помощи цилиндра Венельта. Пройдя объект, находящийся вблизи главного фокуса объективной линзы, электроны попадают в преломляющее поле объективной линзы. Объектив дает первое увеличенное изображение предмета на специальном промежуточном экране, покрытом флюоресцирующим материалом. Изображение можно наблюдать через специальные стеклянные<sup>8</sup> окна, имеющиеся в колонне микроскопа. На промежуточном экране нанесена миллиметровая шкала; зная размер отверстий сетки или диаметр круглой диафрагмы, на которой находится объект, можно благодаря этой шкале из отношения размеров полученного изображения сетки или диафрагмы к ее действительным размерам определить увеличение объектива. Наличие промежуточного экрана позволяет производить грубую установку образцов во время их исследования, в то время как окончательная регулировка производится по наблюдению конечной картины. В центре промежуточного экрана имеется небольшое отверстие (порядка миллиметра), через которое центральная часть промежуточного изображения проходит дальше. Точки изображения, пришедшиеся как раз на это отверстие, являются «предметом» для второй и последней линзы микроскопа—проекционной. Эта линза дает второе увеличенное изображение предмета на флюоресцирующем экране или фотопластинке. Наблюдение окончательного изображения на флюоресцирующем экране производится через стеклянные окна нижней части колонны микроскопа. При фотографировании флюоресцирующий экран особой ручкой отводится в сторону и открывает тем самым доступ электронам к фотопластинке, находящейся в специальной фотокамере, представляющей собой самую нижнюю часть колонны микроскопа.

Как видим, между проекционным оптическим микроскопом и электронным микроскопом, работающим на просвет, несмотря на их принципиальное и конструктивное различие, имеется большое сходство.

*Образование изображения в электронных микроскопах, работающих на просвет.* Понимание процесса формирования изображения очень важно для правильной интерпретации результатов, получаемых при электронно-микроскопических исследованиях. По сравнению с образованием изображения в оптических микроскопах в электронных микроскопах есть два важных отличия: 1) характер взаимодействия электронов с объектом совсем не таков, как взаимодействие света и вещества; 2) значительные aberrации электронных линз требуют применения очень малых отверстий в диафрагме объектива.

<sup>7</sup> В опытах Мартона еще не было достигнуто сверхоптическое разрешение.

<sup>8</sup> Чтобы обезопасить работающих от влияния рентгеновских лучей, возникающих при торможении электронов веществом экранов, все окна микроскопа сделаны из свинцового стекла.

В оптической микроскопии контрастность различных точек изображения обусловлена в основном различной абсорбцией в разных точках объекта. В электронной же микроскопии обычная абсорбция электронов в тонких образцах играет очень малую роль. Наблюдаемая в электронном микроскопе контрастность обусловлена почти целиком рассеянием электронов в объекте. Чем большая доля рассеянных электронов лежит за пределами угла, определяемого апертурной диафрагмой объектива, тем менее интенсивным получится на флюоресцирующем экране или фотопластинке изображение соответствующего участка объекта.

Итак, для образования изображения в электронном микроскопе является существенным распределение рассеянных электронов по углам.

Будем считать, что рассеяние электронов при прохождении объекта вызывается, главным образом, взаимодействием электронов с ядрами атомов. То влияние, которое при этом оказывают атомные электроны, сказывается в так называемой экранировке кулоновского поля ядра. Можно считать, что при прохождении электронов через объект происходит не однократное, а многократное<sup>9</sup> рассеяние электронов, т. е. рассеяние, получающееся в результате большого количества единичных актов рассеяния. Суммирование углов отклонения ведется по самым разнообразным «случайным» направлениям по законам теории вероятности. Если отклонение электрона осуществляется путем соударений с многими атомами, то с точки зрения теории вероятностей следует ожидать для электронов по выходе из объекта распределения по гауссовской кривой.

На рис. 14 воспроизведены экспериментальные кривые, полученные Юнгенфельдом [Л. 60] для рассеяния  $\beta$ -лучей, имевших скорость в 800 экВ в тонких фольгах олова, в которых произведение плотности на толщину  $\rho x$  соответственно равнялось: 0,007, 0,013, 0,026, 0,1 г/см<sup>2</sup>.

Экспериментальные кривые действительно имеют форму кривых Гаусса. Кривые показывают, что чем толще фольга, тем больше рассеяние электронов.

Итак, теория и эксперимент показывают, что чем толще и плотнее электромикроскопический объект в целом или та или иная его часть, тем сильнее рассеяние электронов. Выше уже неоднократно указывалось, что в электронной линзе для ограничений aberrаций ставятся диафрагмы, диаметр отверстия которых составляет величину порядка сотых долей миллиметра. Соответственно этому апертурные углы объективных линз электронных микроскопов измеряются тысячами долями радиана. При столь незначительных апертурах даже слабое рассеяние электронов в тонкой пленке, носительнице объекта, повлечет за собой непопадание части электронов в апертурную диафрагму. Однако, если пленка имеет однородную массу и одинаковую толщину, то все ее точки будут давать одинаковое рассеяние электронов. Поэтому от каждой точки пленки пройдет через объективную линзу одинаковое количество электронов. В результате на флюоресцирующем экране или фотопластинке получится равномерное освещенное поле<sup>10</sup>. В этом случае пленка для микроскопа данной разрешающей силы будет казаться бесструктурной.

Совсем иное положение будет, когда пленка имеет в разных местах различную толщину или плотность, или ту, и другую неоднородность одновременно. В частности, такая ситуация будет иметь место, если на бесструктурной пленке лежат

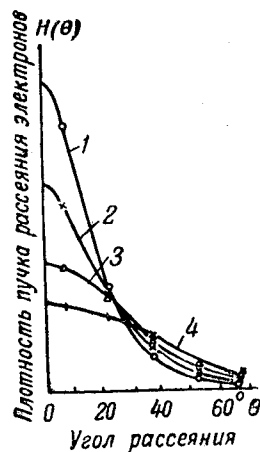


Рис. 14. Кривые распределения по углам электронов, прошедших через тонкие оловянные фольги.

Кривая 1 — фольга толщиной 0,010 мм; 2 — 0,018; 3 — 0,036; 4 — 0,14 мм.

металлические частицы, бактерии и т. д. В этом случае степень рассеяния электронов в объекте меняется от точки к точке и соответственно этому будет меняться количество электронов, пропущенных через объективную линзу. Очевидно, что контрастность получаемого изображения существенно образом определяется отношением числа электронов, пропущенных и непропущенных через апертурную диафрагму. В этом смысле можно утверждать, что увеличение диаметра апертурной диафрагмы привело бы не только к увеличению влияния aberrаций, но и к снижению контрастности изображения<sup>11</sup>.

Следует еще указать на связь разрешающей силы с толщиной объекта. Дело в том, что рассеяние электронов в объекте приводит к тому, что начало конусов рассеяния как бы смещается ближе к объективу. Расчет показывает, что это влечет за собой возникновение кружка рассеяния, снижающего разрешающую силу. Величина разрешаемого расстояния, определяемого этим фактором, оказывается при неизменной скорости

электронов прямо пропорциональной  $x^{\frac{3}{2}}$ , где  $x$  — толщина объекта. Таким образом, разрешаемое расстояние  $d$ , зависящее от всех перечисленных выше факторов [формулы (5,6) и (5,9)] может быть по Арденне определено формулой:

$$d = \sqrt{d_{\min}^2 + d_{xp}^2 + d_p^2}, \quad (6,2)$$

где  $d_p$  — разрешаемое расстояние, определяемое рассеянием в толще объекта.

В очень тонких образцах при скорости электронов в 50 — 100 экВ  $d_p$  меньше  $d_{xp}$  и обе величины по сравнению с  $d_{\min}$  не являются определяющими при установлении полного разрешаемого расстояния.

Таковы в общих чертах физические основы электронной микроскопии.

<sup>9</sup> Строго говоря, не однократное и не многократное, а промежуточное.

<sup>10</sup> Яркость свечения флюоресцирующего экрана и почернение пластинки при неизменной скорости электронов пропорциональны их числу.

<sup>11</sup> Изображение предметов получается, однако, даже при широких диафрагмах. Это объясняется тем, что возникновение контрастов вызвано именно влиянием aberrаций.



## Литература

1. А. И. Тудоровский. Теория оптических приборов. Изд. АН СССР, 1937.
2. Л. де-Бройль. Введение в волновую механику ГНТИ Украины, 1934.
3. E. Riecke. Wiedemann Ann., т. 13, стр. 191, 1881.
4. E. Wiechert. Wiedemann. Ann., т. 69, стр. 737, 1899.
5. H. J. Ryan. Trans. Am. Inst. Electr. Eng., т. 22, стр. 539, 1903.
6. R. Rankin. USA Patent 838273 от 23 августа 1905.
7. H. Busch. Ann. d. Physik, т. 81, стр. 974, 1926.
8. H. Busch. A. f. E., т. 18, стр. 583, 1927.
9. C. J. Davisson and Calbick. Physic. Rev., т. 38, стр. 585, 1931.
10. H. Johanson u. O. Scherzer. Z. f. Physik, т. 80, стр. 183, 1932.
11. M. Knoll u. E. Ruska. Ann. Physik (5), т. 12, стр. 607, 1932.
12. M. Knoll u. E. Ruska. Z. f. Phys., т. 78, стр. 318, 1932.
13. H. Brüche u. H. Johanson, Naturwiss., т. 20, 353, 1932.
14. V. B. Borries u. E. Ruska. Naturwissenschaft, т. 27, стр. 577, 1939.
15. V. B. Borries u. E. Ruska. S. Z., т. 20, стр. 217, 1940.
16. A. Prebus and J. Hillier. Canad Journ. Research, т. 17 (sec. A), 49, 1939.
17. E. и F. Burton. A. Prebus and J. Hillier. Phys. Rev., т. 56, стр. 1171, 1939.
18. H. Marton. Phys. Rev., т. 58, стр. 57, 1940.
19. H. Marton, M. C. Ванса, J. F. Bender. RCA, Rev., т. 5, стр. 232, 1940.
20. V. K. Zworykin, J. Hillier, A. W. Vance. El Eng., т. 60, стр. 157, 1911.
21. В. Н. Вернер. Диссертация. Государственный оптический институт, 1945.
22. H. Mahl. Jahrbuch AEG Forsch., т. 7, стр. 43, 1940.
23. V. B. Borries u. E. Ruska. DRP 678857 от 16 марта 1932. DRP 680284 от 17 марта 1932.
24. E. Ruska. Z. f. Phys., т. 87, стр. 580, 1934.
25. E. Ruska. Z. f. Phys., т. 89, стр. 90, 1934.
26. E. Ruska. Kolloid-Zeitschrift, т. 107, № 1, 1944.
27. E. Ruska. A. f. E., т. 38, № 3—4, стр. 10—130, 1944.
28. V. B. Borries u. E. Ruska. Zeitsch. Wiss. Mikroskopie, т. 6, стр. 317, 1939.
29. V. B. Borries u. E. Ruska. Ergebniss d. Exakt. Naturwiss., т. 19, стр. 283, 1940.
30. J. Dosse. Z. f. Physik, т. 117, № 7 и 8, стр. 437, 1941.
31. W. Glaser. Z. f. Physik, т. 117, 285, 1941.
32. E. Kinder u. Jb. Pendizch. AEG Forsch., т. 7, стр. 23, 1940.
33. H. Boersch. Jahrbuch AEG Forsch., т. 7, стр. 34, 1940.
34. V. M. Ardenne. Elektronen-Übermikroskopie, 1940.
35. E. Götz. Jahrbuch AEG Forsch., т. 7, стр. 57, 1940.
36. R. Rebsch. Ann. Physik., т. 31, стр. 501, 1938.
37. O. Scherzer. Z. Phys., т. 114, № 7—8, стр. 427, 1939.
38. J. Hillier. J. Appl. Phys., т. 17, № 4, стр. 307, 1946.
39. R. Behne. Ann. Physik, т. 29, стр. 385, 1936.
40. V. K. Zworykin, G. A. Morton, E. G. Romberg, J. Hillier, A. W. Vance. Electron Optics and the Electron Microscope, 1945, New-York, John Wiley & sons.
41. E. Brüche u. H. Johanson. Ann. Physik, т. 15, стр. 145, 1932.
42. E. Brüche u. H. Johanson. Z. techn. Physik, т. 14, стр. 487, 1933.
43. H. Mahl. Z. Physik, т. 108, стр. 771, 1938.
44. M. Knoll, F. G. Houtermans, W. Schulze. Z. Physik, т. 78, стр. 318, 1932.
45. W. Mecklenburg. W. Z. Physik, т. 20, стр. 21, 1942.
46. W. G. Burgers a. Ploos van J. J. Amstel. Physica, т. 4, стр. 5—14, 15—27, 1937; стр. 305—312, 313—319, 1938.
47. W. Heinze u. S. Wagener. Z. techn. Physik, т. 17, стр. 645, 1936.
48. S. T. Martin. Phys. Rev., т. 56, стр. 947, 1939.
49. П. Г. Сушкин. Фізичні записки Академії наук УССР, т. IX, вып. 2, стр. 152, 1941.
50. E. Brüche. Z. Physik, т. 86, стр. 448, 1933.
51. J. Pohl. Z. tech. Physik, т. 10, стр. 579, 1934.
52. H. Mahl u. J. Pohl. Z. tech. Physik, т. 16, стр. 219, 1935.
53. V. K. Zworykin. J. Franklin Inst., 215, стр. 525, 1933.
54. E. Meschter. Rev. Sci Instrument, т. 9, стр. 12, 1938.
55. E. W. Müller. Z. Physik, т. 106, стр. 511, 1937.
56. I. Dosse u. H. O. Müller. Z. f. Phys., т. 119, стр. 415, 1942.
57. J. Picht. Z. f. techn. Physik, т. 9, стр. 211, 1943.
58. A. Recknagel. Z. Physik, т. 120, стр. 331, 1943.
59. L. Marton. Bull. acad. roy. Belg. Class des Sciences, т. 23, стр. 672, 1937.
60. O. Klemperer. Einführung in die Elektronik, стр. 222, 1933.
61. I. Hillier and E. G. Ramberg. J. Appl. Phys., т. 18, стр. 48, № 1, 1947.
62. H. Bethe. Handbuch d. Physik, т. 22, ч. 2-ая, 1933.
63. W. Glaser. Z. f. Physik, т. 116, стр. 56—67, 1940.



# Модель электрических систем

Кандидат техн. наук, доц. Д. И. АЗАРЬЕВ

Теплоэлектротехник

С развитием современных электрических систем изучение их режимов работы и расчет различных явлений и процессов с помощью аналитических методов становились все более затруднительными.

Настоятельная потребность быстрых и точных расчетов этих режимов и процессов заставила искать новых методов исследования.

Первые попытки применить лабораторные методы привели к созданию в 1916 г. в Америке специальных расчетных щитов, на которых с помощью активных сопротивлений и соединительных проводов воспроизводилась электрическая схема исследуемой системы. Напряжение к схеме подводилось от источника постоянного тока и с помощью вольтметра и амперметра можно было замерять напряжение и ток в различных звеньях схемы.

Несмотря на примитивность первых конструкций, этот способ анализа работы систем сразу нашел широкое применение для целей расчета токов короткого замыкания, и подобные установки в несколько усовершенствованном виде для этих целей используются до настоящего времени.

В 1929 г. фирмы Westinghouse и GEC, а в СССР ВЭИ, соорудили первые модели, работающие на переменном токе, что значительно расширило область применения моделей и дало возможность использования их в расчетах устойчивости параллельной работы энергосистем, расчетах напряжения, потокораспределения и т. п.

Однако, сложность моделей, работающих на переменном токе, до сих пор ограничивала их распространение.

С целью создания установки, доступной для широкого использования как в энергосистемах, так и в проектных и научных учреждениях, автором предложена новая конструкция модели, более простая в изготовлении и более совершенная по своим эксплуатационным и техническим качествам<sup>1</sup>.

По инициативе проф. П. В. Жданова модель сооружена для Московского энергетического института им. Молотова.

*Описывается новая конструкция установки для моделирования электрических систем переменного тока, состоящих из нескольких электрических станций и связывающих их линий электропередач. Модель позволяет быстро производить расчеты установившихся режимов и переходных процессов в системе. Установка сооружена в Московском энергетическом институте им. Молотова.*

**Основные элементы новой модели.** Принципиальными и конструктивными особенностями новой модели, обеспечившими, с одной стороны, ее широкие технические возможности и эффективность

в решении основных вопросов проектирования и эксплуатации, а с другой,—простоту ее изготовления и эксплуатации, являются:

1. Система моделирования генераторных станций с помощью делителей напряжения и лишь одного трехфазного автотрансформатора фазы, общего для любого числа генераторных станций, позволившая сильно сократить габариты и питать модель током промышленной частоты.

2. Малогабаритные линейные и трансформаторные элементы для моделирования линий, реакторов, трансформаторов и т. п., отличающиеся постоянством индуктивных сопротивлений при широких изменениях проходящего по ним тока и относительно малыми паразитными потерями активной мощности (т. е. малым отношением  $\frac{R}{X}$ )

даже при питании током промышленной частоты, позволившие использовать обычную трансформаторную сталь, выпускаемую союзными заводами.

3. Коммутационно-измерительные панели с наглядной мнемонической схемой, дающие возможность удобно и без значительных затрат времени собирать любую схему сложной системы и производить замеры токов, мощностей и напряжения в любых элементах схемы.

4. Возможность при малых габаритах удобно расположить аппаратуру модели так, чтобы один оператор мог управлять несколькими генераторными станциями и нагрузочными сопротивлениями и одновременно наблюдать и записывать показания приборов.

Общий вид модели показан на рис. 1. Модель состоит из: 1) генераторных станций, предназначенных для моделирования синхронных машин; 2) нагрузочных элементов для воспроизведения режима работ потребителей; 3) трансформаторных элементов с изменяемым коэффициентом трансформации и системой индуктивных сопротивлений, позволяющих установить нужное значение реактивного сопротивления рассеяния мо-

<sup>1</sup> Авторское свидетельство № 69283.

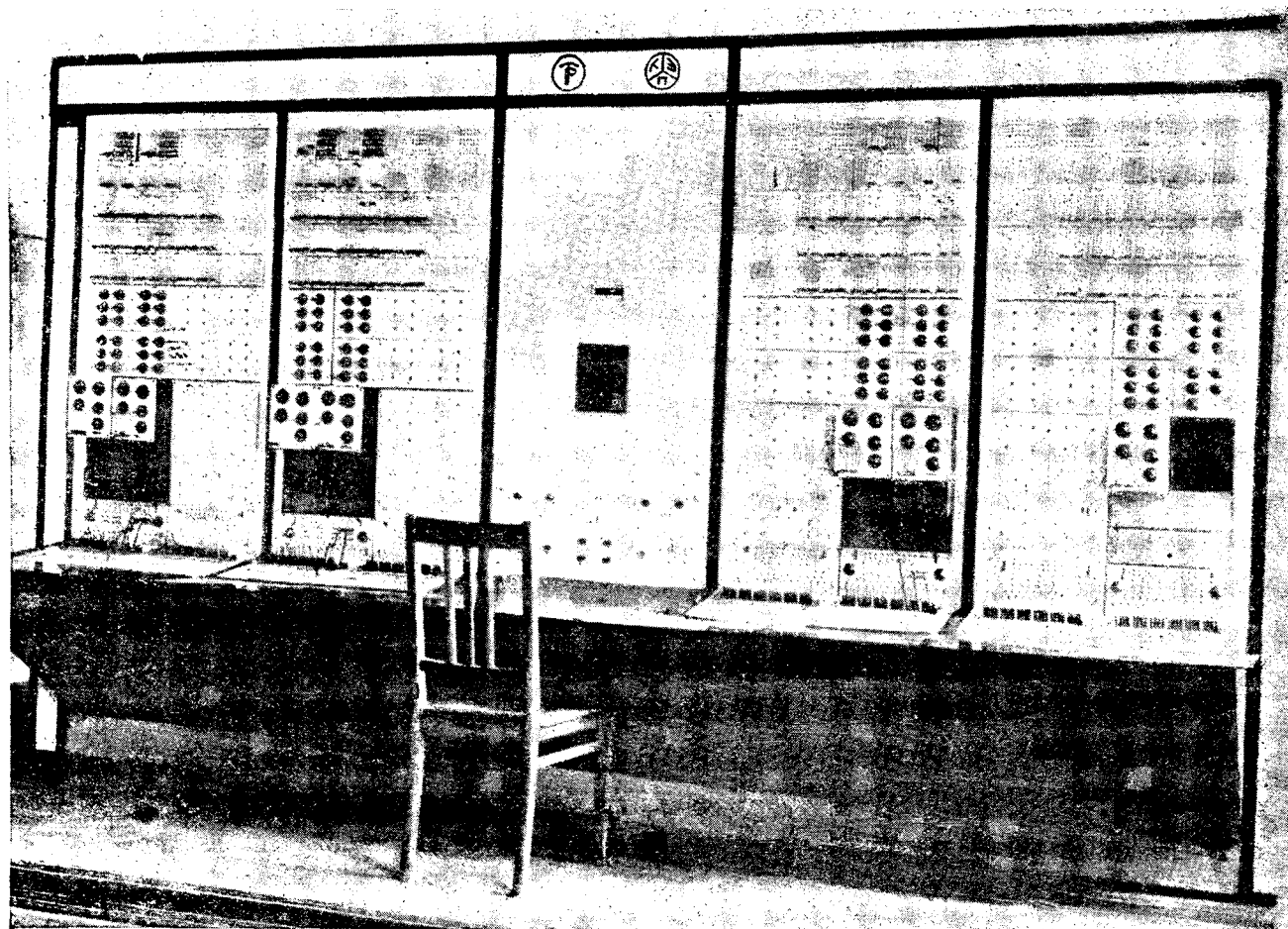


Рис. 1. Общий вид модели электрических систем.

делируемого трансформатора или группы их; 4) линейных элементов с последовательным включением индуктивных и активных сопротивлений; 5) магазинов емкостей; 6) панелей линейных сопротивлений и коммутационных панелей; 7) измерительных приборов с малым собственным потреблением мощности.

**Коммутационные панели.** Сборка схемы исследуемой системы осуществляется из перечисленных выше элементов модели с помощью коммутационных панелей.

Для того, чтобы облегчить сборку схемы и сделать ее достаточно наглядной, коммутационные панели в отличие от американских моделей имеют наглядную мнемоническую схему и систему гнезд, к которым подсоединены провода от трансформаторных, нагрузочных и генераторных элементов модели. Элементы схемы и гнезда подобраны так, что обычные соединения этих элементов легко могут осуществляться с помощью вилок, дополняющих мнемоническую схему.

Линейные элементы, проводники от которых подключены к гнездам панели линейных сопротивлений, могут быть введены в схему с помощью шнуров, отходящих от шин подстанций, изображенных на мнемонической схеме коммутационных панелей (рис. 2). Шнуры имеют блоки

и отгорожены друг от друга перегородками, не позволяющими им запутываться. Каждый из соединительных шнуров имеет измерительное гнездо, что позволяет измерять ток и мощность в любой линии. На коммутационных панелях расположены также измерительные гнезда трансформаторных, нагрузочных и генераторных элементов. Для включения в измерительное гнездо измерительных приборов служит специальный измерительный штеккер, расположенный также на коммутационной панели.

**Генераторные станции** модели служат для воспроизведения режима работ синхронных машин энергосистемы. Для этого каждая генераторная станция модели имеет индуктивные сопротивления для воспроизведения синхронного и переходного реактивного сопротивления и устройство для регулирования фазы и величины э. д. с. моделируемой синхронной машины.

В американских моделях применены индукционные фазорегуляторы, использование которых практически возможно лишь при работе на частотах, значительно выше промышленной. В моделях ВЭИ применены индивидуальные трансформаторы фазы специального изготовления, что значительно утяжеляет и удорожает модель. В отличие от этих моделей в данной модели разработана и использована система регулирования

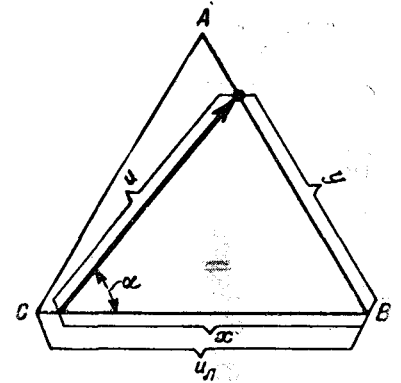
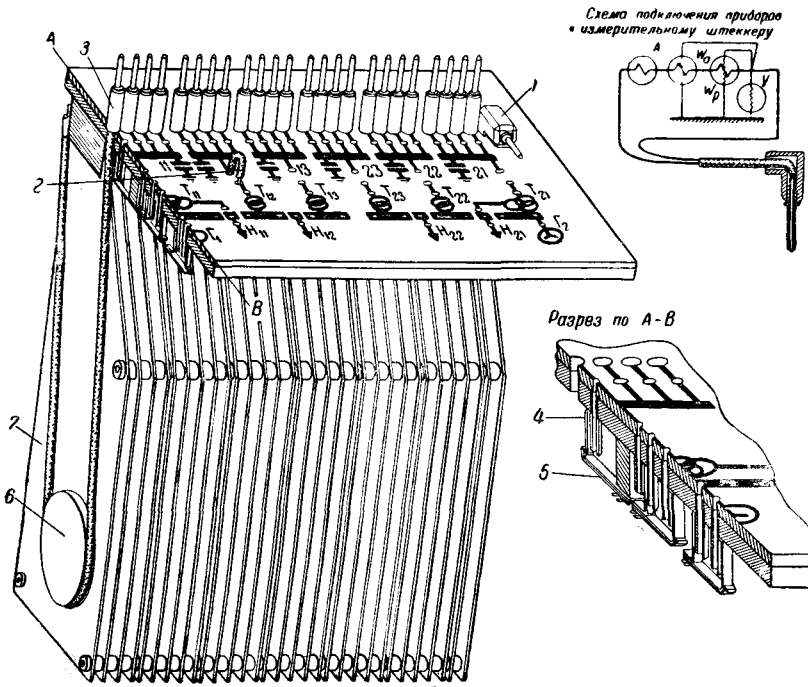


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений трансформатора фазы.

Рис. 2. Коммутационная панель модели.

э. д. с. генераторной станции с помощью делителей напряжения и лишь одного трехфазного автотрансформатора, общего для любого числа генераторных станций.

Как нетрудно убедиться из нижеследующего, в этом случае изменение фазы э. д. с.<sup>2</sup> генератора, без изменения ее величины, может быть также легко достигнуто.

Действительно, если принять за исходное напряжение  $U = U_a \frac{2}{\sqrt{3}}$ , где  $U_a$  — линейное напря-

жение, подводимое к автотрансформатору, и внести обозначения, показанные на рис. 3, то нетрудно определить закон изменения напряжений, снимаемых с каждой фазы, в функции угла:

$$x = U \cos \alpha - y \cos 60^\circ;$$

$$U = \sin \alpha = y \sin 60^\circ; y = \frac{2}{\sqrt{3}} U \sin \alpha; \quad (1)$$

$$x = U \cos \alpha + \frac{U}{\sqrt{3}} \sin \alpha = U \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\sqrt{3}} \right). \quad (2)$$

Подставляя в выражения (1) и (2) значение угла  $\alpha$ , нетрудно определить величины  $y$  и  $x$ , т. е. напряжения, снимаемые одновременно с одной и другой фазы обмоток автотрансформатора. При этом надо иметь в виду, что напряжение, снимаемое, например, с фазы  $CB$ :

$$\text{при изменении } \alpha \text{ от } 30^\circ \text{ до } 90^\circ \quad x = \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\sqrt{3}} \right) U;$$

<sup>2</sup> Здесь и далее термин э. д. с. (а не напряжение) применяется как относящийся к моделируемому генератору, а не к напряжению, снимаемому с трансформатора фазы.

$$\text{при изменении } \alpha \text{ от } 90^\circ \text{ до } 150^\circ \quad x = U_a + \left( \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{3}} \right) U.$$

Значение  $x$  не определяется целым числом для любых  $\alpha$ , и чтобы не иметь очень большого числа витков обмотки и вместе с тем получить достаточно точные результаты, последовательно с некоторыми из отпаек включается то или иное число витков добавочной обмотки, охватывающей не весь магнитопровод, а лишь часть его ( $1/10$  общего сечения).

С целью уменьшения габаритов контакторов, с помощью которых достигается нужная подача напряжения с одной и другой фазы, целесообразна трехступенчатая система регулирования фазы и величины э. д. с. генераторной станции, принципиальная схема которой дана на рис. 4.

Минимальная ступень регулирования величины напряжения 0,2 V, а фазы  $0,2^\circ$  (часть генераторов имеет ступень регулировки фазы в  $0,1^\circ$ ).

Конструкция как контакторов фазы, так и контакторов напряжения отличается тем, что ламели, к которым подводится напряжение от трансформаторов и делителей напряжения, с целью уменьшения габаритов, расположены по образующим цилиндров, по которым скользят щетки, укрепленные на траверзах, вращающихся вокруг оси цилиндров. Для устранения обгорания материала цилиндров ламели запрессовываются в пазы цилиндров вместе со слюдой. Щетки контактора фазы расположены попарно в диаметрально противоположных положениях.

Переход с одной ламели коллектора на другую достигается без разрыва цепи, что осуществлено путем дублирования всех щеток контакторов вспомогательными щетками, соединенными

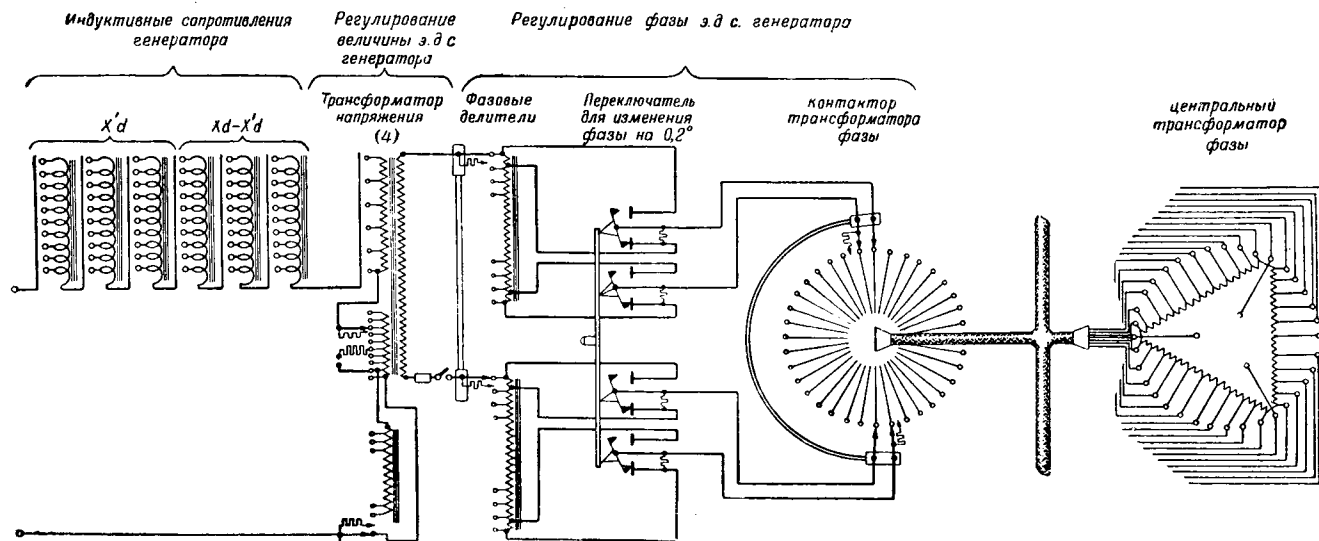


Рис. 4. Принципиальная схема генераторной станции модели.

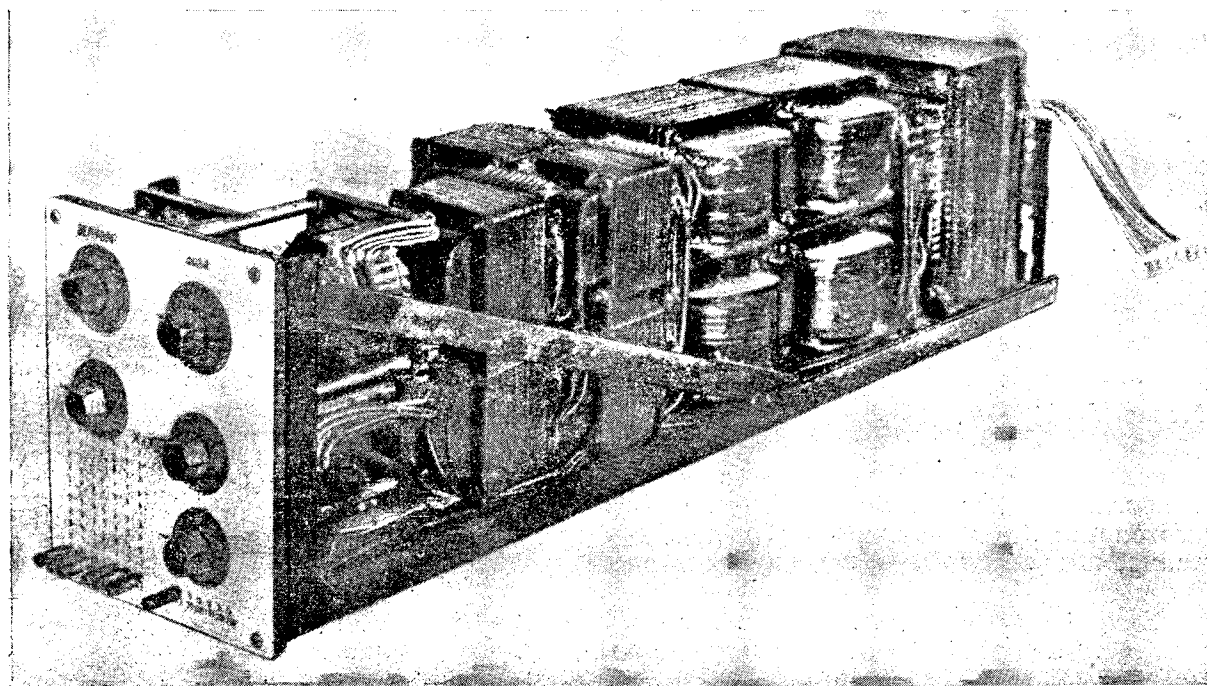


Рис. 5. Генераторная станция модели электрических систем.

с основными через сопротивления из нихромовой проволоки.

Для получения минимального сопротивления короткого замыкания слои первичной и вторичной обмоток трансформатора 4 (рис. 4) чередуются между собой. Обмотки как трансформатора 4, выполненного на железе Ш-40, так и делителей напряжения, выполненных на железе Ш-19, изготавливаются из провода сечением, максимально возможным по габаритам выбранного железа. В результате генераторные станции имеют полное сопротивление короткого замыкания, отнесенное к мощности 450 VA, всего 2—2,5%, а реактивная составляющая не превосходит 0,2—0,3%.

Для имитации переходных и синхронных

реактивных сопротивлений генераторы модели имеют индуктивные сопротивления и контакторы такие же, как у линейных или трансформаторных элементов.

Все детали генераторной станции, как-то: индуктивные сопротивления, замещающие реактивные сопротивления генератора, делители напряжения для средней и точной регулировки фазы э. д. с. генератора, трансформатор напряжения для регулирования величины э. д. с., а также все контакторы, скомпонованы в одном блоке (рис. 5), что создает удобство как при монтаже, так и при эксплуатации и позволяет легко вынуть генераторную станцию из ее ячейки для ремонта или осмотра.

**Линейные и трансформаторные элементы.** Для моделирования линий и трансформаторов энергосистемы предназначаются линейные и конструктивно им близкие по оформлению трансформаторные элементы (рис. 6).

Линейные элементы состоят из активных и индуктивных сопротивлений, последовательно включенных, а трансформаторные—из автотрансформатора и индуктивных сопротивлений для воспроизведения реактивного сопротивления рассеяния моделируемого трансформатора силовой системы.

Отношение активного сопротивления обмоток силовых трансформаторов к реактивному невелико (5—10%) и весьма важно, чтобы  $\frac{R}{X}$  в индуктивных сопротивлениях модели было возможно меньше. Кроме того, необходимо, чтобы величины индуктивных сопротивлений не менялись вместе с проходящим по ним током. Удовлетворение этих требований не является столь простой задачей.

Еще более жесткие условия создаются при моделировании реактивных сопротивлений генераторов. Отношение  $\frac{R}{X}$  для переходных реактивных сопротивлений обычно лежит в пределах 0,7—1,5%, а для синхронных—в пределах 0,07—0,25%. Такие отношения  $\frac{R}{X}$  простым способом не могут быть достигнуты не только при частоте 50 Hz, но и при частоте 500 Hz.

Индуктивные сопротивления были выполнены на железе III-19, которая позволяет получить отношение  $\frac{R}{X} = 4,5 \div 5\%$ , что достаточно для точного моделирования как линий, так и трансформаторов.

Исследование параметров индуктивных сопротивлений при частотах выше 50 Hz показало, что при обычной трансформаторной стали с потерями 1,6 W/kg при 10 000 G отношение  $\frac{R}{X}$  с ростом частоты уменьшается незначительно и при частоте 500 Hz лишь в 1,2—1,5 раза меньше, чем при частоте 50 Hz. В американских моделях, где применены специальные магнитные материалы с весьма малыми активными потерями, не превышающими 0,6 W/kg, отношение  $\frac{R}{X}$  не опускается ниже 3%. Таким образом, с целью уменьшения  $\frac{R}{X}$  нет суще-

ственной разницы, принять ли рабочую частоту 50 или 500 Hz. Что же касается габаритов, то они и при частоте 50 Hz в данной конструкции получились столь малыми (III-19), что дальнейшее их уменьшение вряд ли можно было считать необходимым.

В данной модели индуктивные сопротивления имеют трехдекадную регулировку, но в отличие от американских моделей и моделей ВЭИ

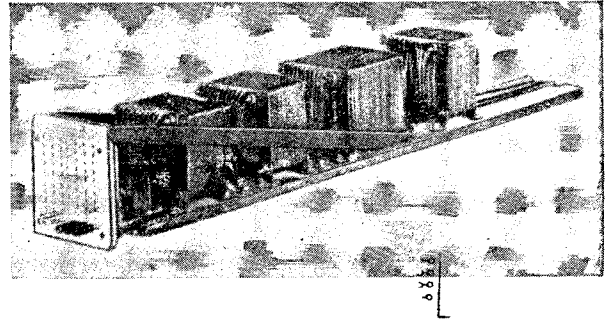


Рис. 6. Трансформаторный элемент модели.

первая декада (наибольшие сопротивления) состоит из двух катушек 20 и 70  $\Omega$  (или 200 и 700  $\Omega$  и т. д.), включенных последовательно и рассчитанных на минимальное отношение  $\frac{R}{X}$  (т. е. на равенство потерь в железе и меди при всех включенных секциях обмотки)<sup>3</sup>.

Такая система позволяет, как показал опыт, иметь даже при низкосортной трансформаторной стали отношение  $\frac{R}{X}$ , не превосходящее 5,0—6,5% для любой отпайки.

Индуктивные сопротивления второй и третьей декады с целью экономии места и материалов состоят из одной катушки на каждую декаду, так как их влияние на общее сопротивление невелико.

Для достижения постоянства индуктивного сопротивления при широких пределах протекающего по нему тока был применен комбинированный магнитопровод, состоящий из трансформаторной стали (основная часть) со сравнительно небольшим воздушным зазором и одной-двух пластин пермаллоя без зазора (точнее, с весьма малым зазором). При такой комбинации при малых токах и, следовательно, при малых напряженностях поля магнитная проницаемость трансформаторной стали мала, но зато велика магнитная проницаемость пермаллоя. При увеличении же тока магнитная проницаемость стали растет, а пермаллоя начинает падать. При определенных соотношениях пермаллоя и стали суммарная магнитная проницаемость такого магнитопровода оказывается почти постоянной при весьма широких изменениях напряженности магнитного поля и, следовательно, индуктивное сопротивление будет тоже постоянным.

Для установки нужной величины индуктивного сопротивления линейного или трансформаторного элемента разработан специальный малогабаритный контактор, весьма простой в изготовлении.

С целью уменьшения занимаемого места по фронту модели активные сопротивления линейных элементов и автотрансформаторы в трансформаторных расположены за индуктивными сопротивлениями. Активные сопротивления линейных элементов выполнены из голого и изолированного манганинового провода, намотанного

<sup>3</sup> В модели, изготовленной для МЭИ, такая система применена, однако, не для всех элементов.

Схема блока модели электрических систем

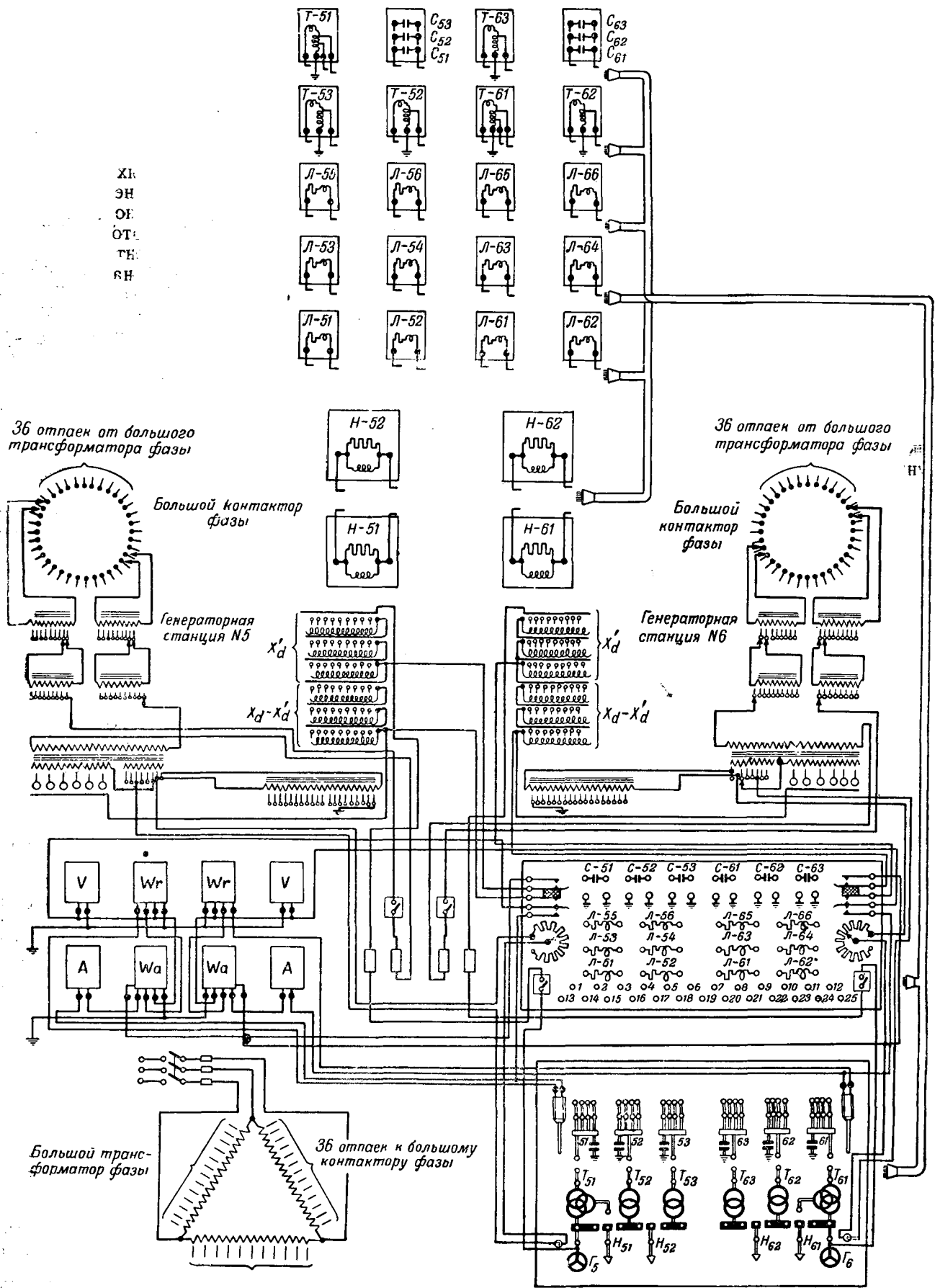


Рис. 7. Схема блока модели электрических систем.

на гетинаксовые платы. Малоомные сопротивления выполнены из голого провода, свитого в спираль, высокоомные—из изолированного, намотанного непосредственно на платы.

Для уменьшения тока холостого хода автотрансформаторы выполнены с большим числом витков, а для уменьшения потерь напряжения в активном сопротивлении вольтодобавочных витков эта часть обмотки выполнена проводом большего сечения.

**Нагрузочные элементы.** Для воспроизведения режимов работы потребителей энергосистемы модель имеет нагрузочные элементы, отличающиеся от линейных элементов лишь контакторами. Так как в процессе установки режима работ исследуемой системы контакторы нагрузочных элементов находятся постоянно в работе, то необходимо иметь не только надежную, но и удобную для частой регулировки контактную систему. По этим соображениям принят контактор с пружинящими щетками, посаженными на втулки и скользящими по плоским головкам латунных контактов. Для фиксации правильного положения щеток на контактах использован фиксатор со звездочкой, ограничителем и роликком.

**Емкостный элемент.** Емкостный элемент состоит из трех групп конденсаторов и общего контактора. С помощью вилок, вставляемых в гнезда контактора, из каждой группы может быть набрано нужное значение емкости в пределах от 0,1 до 7,85  $\mu\text{F}$ . Емкостный элемент подключается к панели линейных сопротивлений и с помощью штеккеров или вилок может быть введен в исследуемую схему.

**Компоновка аппаратуры модели.** Все элементы модели размещены в однотипных блоках. В среднем блоке размещена аппаратура питающих агрегатов и контрольные измерительные приборы. Блоки электрически связаны между собой лишь трансферными шинами и проводами, идущими к генераторным станциям от общего автотрансформатора фазы. Схема блока модели показана на рис. 7.

Все элементы модели, за исключением коммутационно-измерительных панелей и панелей линейных сопротивлений, сконструированы так, что каждый из них может быть легко вынут из своей ячейки для ремонта или осмотра.

Малые габариты элементов модели позволили разместить их с максимальным удобством для обслуживающего персонала. В нижней части блоков на наклонных плоскостях размещены коммутационно-измерительные панели. В вертикальной плоскости непосредственно к ним примыкают панели с гнездами, к которым подпаяны провода от линейных элементов, а также трансферные шины. Выше, почти на уровне глаза сидящего оператора, располагаются измерительные приборы. Непосредственно над приборами расположены генераторные станции, и над ними в два ряда расположены нагрузочные элементы. Над нагрузочными элементами расположены два ряда ячеек с трансформаторными и емкостными элементами и, наконец, еще выше расположены три ряда линейных элементов. Такое расположение элементов в сочетании их с малыми габаритами позволяет одному оператору управлять несколькими генераторными станциями и нагрузочными сопротивлениями и одновременно записывать показания приборов.

Первый экземпляр новой установки изготовлен для Московского энергетического института им. Молотова силами мастеров и учащихся ремесленных училищ и техникума трудовых резервов. Техническое и организационное руководство в системе трудовых резервов осуществлял инж. А. И. Глаз. Общее руководство работами со стороны Теплоэлектропроекта осуществлял кандидат техн. наук, доц. А. М. Федосеев, а со стороны МЭИ им. Молотова зав. кафедрой электрических сетей и систем проф. П. С. Жданов. Все измерительные приборы изготовлены мастерами МЭИ.

В настоящее время предложенные автором модели сооружаются для Энергетического института Академии наук Узбекской ССР и для Института энергетики Академии наук Украинской ССР.





# Экономическое распределение активной нагрузки между электростанциями в энергосистеме

Кандидат техн. наук, доц. В. М. СИНЬКОВ

Уральский индустриальный институт им. Кирова

**Исходные положения.** Известно, что условие оптимального распределения нагрузки между агрегатами станции выражается равенством их относительных приростов, т. е. производных затрачиваемой мощности по полезно отдаваемой мощности. Если станция питает нагрузку через линию электропередачи, то необходимо учесть относительный прирост потерь в сети, представляющий собой производную потерь по передаваемой мощности. В этом случае полный относительный прирост системы «станция — линия электропередачи» выражается так:

$$H = H_s(1 + h_l) = H_s + H_s h_l \quad (1)$$

Здесь  $H_s$  — относительный прирост расхода топлива при изменении нагрузки на шинах станции в тоннах условного топлива на тысячу киловаттчасов; будем в дальнейшем называть его «станционным приростом»<sup>1</sup>;  $h_l$  — относительный прирост потерь в линии при изменении нагрузки на конце ее; назовем его «сетевым приростом»<sup>1</sup>.

При исследовании возможности построения электрического расчетного устройства для распределения активной нагрузки мы убеждаемся, что при любом способе осуществления схемы замещения выражение (1) требует введения зависимости элементов, имитирующих линии передачи, от характеристик тепловой части электростанции. Как показано ниже, это внесло бы столь большие осложнения в схему и конструкцию расчетного устройства, что сделало бы его неприменимым на практике. Следующее допущение позволяет отказаться от этой зависимости без внесения неприемлемых погрешностей.

Примем, что прирост расхода мощности на выработку мощности потерь может произво-

*В связи с ростом мощности энергетических систем и протяженности их высоковольтных сетей все более актуальным становится вопрос о практических методах отыскания оптимального (по минимуму затрат топлива) распределения активной нагрузки между параллельно работающими электростанциями в системе с учетом потерь энергии в сети. Дано теоретическое обоснование возможности построения простого электрического устройства для расчета распределения активной нагрузки между станциями в системе. Исследована область применения его и вероятные погрешности. Даны основы проектирования расчетных устройств. Работа выполнена для Свердловского энерго в 1944—1945 гг.*

диться не по действительным станционным приростам  $H_s$ , а по некоторому среднему расчетному значению его, не зависящему от нагрузки станции. Введем во второй член уравнения (1) это среднее значение станционного прироста  $H_{s0}$ , постоянное для данной системы (вместо действительного значе-

ния  $H_s$ , являющегося функцией нагрузки), и разделим на это значение уравнение (1):

$$\frac{H}{H_{s0}} = \frac{H_s}{H_{s0}} + h_l$$

или, вводя новые обозначения,

$$h = h_s + h_l \quad (2)$$

В (2) полный относительный прирост представляет собой сумму двух независимых величин.

Делением станционного прироста на «базисный» относительный прирост  $H_{s0}$ , мы вводим новую систему относительных единиц, в которой  $h_{s0} = \frac{H_{s0}}{H_{s0}} = 1$ . Все станционные и полные приросты оказываются как бы приведенными к шинам станции, так как в этой системе сетевые приросты выражаются своими натуральными величинами  $h_l$  без умножения на станционный прирост.

Преимущество этой системы относительных единиц ясно из простого физического объяснения: если величины сетевых приростов принимаются не зависящими от станционных приростов, то становится безразличным распределение между станциями потерь мощности и, следовательно, направления мощностей в системе.

В результате преобразования уравнения (1) в выражение (2):

а) элементы схемы замещения, имитирующие

<sup>1</sup> Термин предложен доктором техн. наук, проф. А. А. Глазуновым.

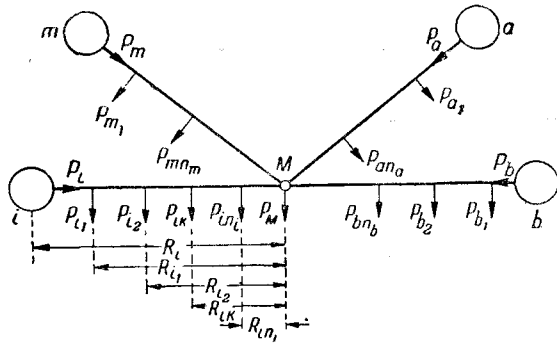


Рис. 1. Схема многолучевой звезды со многими нагрузками.

сеть, становятся независимыми от элементов, имитирующих станции;

б) величины полных приростов не зависят от направления мощностей, следовательно, и от числа и расположения точек встречи их в системе, имеющей несколько электростанций. Это позволяет находить оптимальные нагрузки станций распределением между ними суммы полезных нагрузок сети.

Рассмотрим систему с  $m$  станциями, связанную сетью в виде многолучевой звезды с  $n_i$  нагрузками в луче (рис. 1) и найдем выражения оптимальных нагрузок станций. Принцип равенства относительных приростов в данном случае следует распространить на полные приросты. С учетом уравнения (2) при любом числе и расположении точек встречи мощностей можно в общем виде для  $i$ -й станции написать:

$$h_i = h_{st} + h_{ii} = c, \quad (3)$$

где  $c$  — некоторая постоянная величина.

Используя известную формулу для прироста потерь в луче с «отсосами» нагрузки, можно написать для сетевого прироста  $i$ -й станции:

$$h_{ii} = \frac{2}{U^2} \left[ P_i R_i - \sum_{k=1}^{n_i} P_{ik} R_{ik} \right], \quad (4)$$

где  $P_i$  — активная нагрузка  $i$ -й станции в тыс. kW;

$U$  — напряжение сети в kV;

$P_{ik}$  — нагрузки  $k$ -го луча в тыс. kW ( $k=1,2, \dots, n_i$ );

$R_{ik}$  — сопротивления в  $\Omega$ .

Подставляя это значение  $h_{ii}$  в (3), найдем оптимальное значение активной нагрузки  $i$ -й станции:

$$P_i = \frac{1}{R_i} \left[ \left( \sum_{k=1}^{n_i} P_{ik} R_{ik} - h_{st} \frac{U^2}{2} \right) - \left( -c \frac{U^2}{2} \right) \right]. \quad (5)$$

Постоянная  $c$  может быть определена из условия равенства суммы нагрузок станций сумме нагрузок сети (с учетом упомянутого допущения):

$$\sum_{i=1}^m P_i = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n_i} P_{ik} + P_m = P_{\Sigma}. \quad (6)$$

Подставив сюда величину  $P_i$  по уравнению (5) и определив  $c$ , находим:

$$P_i = \frac{1}{R_i} \left\{ \left[ \sum_{k=1}^{n_i} P_{ik} R_{ik} - h_{st} \frac{U^2}{2} \right] - \left[ \sum_{i=1}^m k_i \left( \sum_{k=1}^{n_i} P_{ik} R_{ik} - h_{st} \frac{U^2}{2} \right) - P_{\Sigma} R_{\Sigma} \right] \right\}. \quad (7)$$

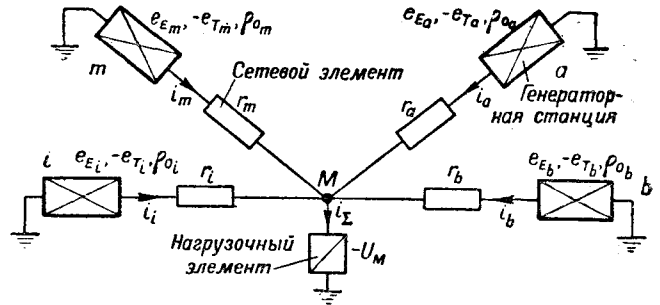


Рис. 2. Схема расчетного устройства для системы по рис. 1.  $e_E$  — сетевая э. д. с. ( $e_i$ );  $e_T$  — станционная э. д. с. ( $e_s$ ).

Здесь  $R_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{R_i}}$  — общее сопротивление линий системы, полученное параллельным суммированием сопротивлений всех лучей;

$k_i = \frac{1}{R_i}$  — коэффициент токораспределения для  $i$ -го луча звезды, найденный по общему сопротивлению системы.

Уравнение (7), являющееся исходным для построения расчетного устройства, может быть представлено в виде:

$$i_i = \frac{1}{r_i} [(e_{ii} - e_{si}) - (e_{i\Sigma} - e_{s\Sigma} - i_{\Sigma} r_{\Sigma})]. \quad (8)$$

В схеме расчетного устройства:  $i$  — токи имитирующие мощности;  $r$  — сопротивления, соответствующие действительным сопротивлениям сети;  $e$  — э. д. с., определяющие характеристики относительных приростов станций и расположением нагрузок в сети. Вообще говоря, это могут быть характеристики относительных приростов расхода топлива или характеристики относительных приростов денежных затрат.

Вводя масштабные коэффициенты: для сопротивления —  $a_R$  в  $\Omega/\Omega$ , для мощностей —  $a_p$  в  $\text{mA}/\text{kW} \cdot 10^3$  и для напряжений —  $a_U$ ,  $\text{V}/\text{kV}^2$ , напишем соотношения для схемы расчетного устройства:

$$\begin{aligned} i_i &= a_p P_i && \text{— ток } i\text{-й станции в mA;} \\ i_{\Sigma} &= a_p P_{\Sigma} && \text{— суммарный ток всех станций в mA;} \\ r_i &= a_R R_i && \text{— сопротивление } i\text{-го луча звезды в } \Omega; \\ r_{\Sigma} &= a_R R_{\Sigma} && \text{— суммарное (параллельное) сопротивление всех лучей звезды в } \Omega; \end{aligned}$$

$$e_{ii} = a_U \sum_{k=1}^{n_i} P_{ik} R_{ik} \text{— так называемая «сетевая» э. д. с. } i\text{-й станции в V;} \quad (9)$$

$$e_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^m k_i e_{ii} \text{— эквивалентная «сетевая» э. д. с. системы;} \quad (9)$$

$$e_{si} = a_U h_{st} \frac{U^2}{2} \text{— так называемая «станционная» э. д. с. } i\text{-й станции в V;} \quad (9)$$

$$e_{s\Sigma} = \sum_{i=1}^m k_i e_{si} \quad (9)$$

эквивалентная «станционная» э. д. с. системы.

Схема замещения, удовлетворяющая (8), представлена на рис. 2. Число станций и лучей, как и в исходной схеме, равно  $m$ , но вся нагрузка сосредоточена в центре звезды. Напряжение

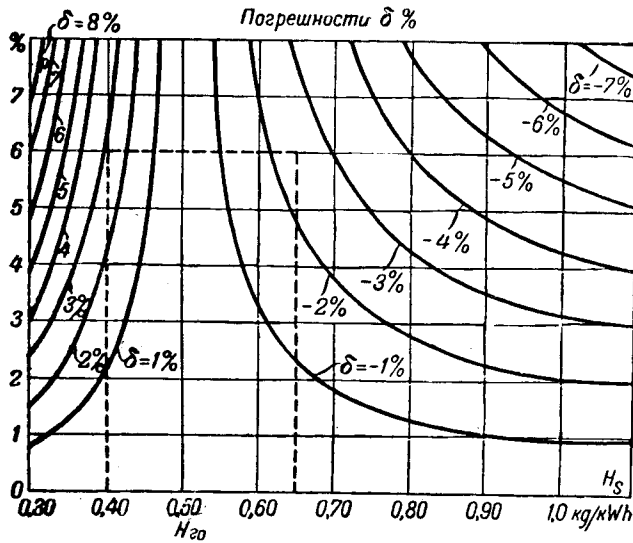


Рис. 3. Погрешность  $\delta$  в определении полного относительного прироста в зависимости относительных потерь в линии  $p$  и станционного прироста  $H_s$  (при  $H_{s0} = 0,5$  kg/kWh).

в узле  $M$  определяется выражением во вторых простых скобках уравнения (8). Заметим, что перенос всей нагрузки в центр звезды не имеет принципиального значения. Это диктуется стремлением упростить схему расчетного устройства, уменьшив до предела число нагрузочных элементов.

**Анализ погрешностей, вносимых в расчет введением  $H_{s0}$ .** Для большей части станций и агрегатов системы целесообразно найти средневзвешенные максимальные и минимальные станционные приросты  $H_{s \max}$  и  $H_{s \min}$ . Используя принцип равенства положительных и отрицательных погрешностей, можно принять

$$H_{s0} = \frac{2H_{s \max} H_{s \min}}{H_{s \max} + H_{s \min}} \quad (10)$$

Для станции, имеющей ненормально высокий относительный прирост, например для станции  $D$ , следует умножить сопротивления соответствующих лучей схемы на коэффициент

$$\xi_D = \frac{H_{sD0}}{H_{s0}}, \quad (11)$$

где  $H_{sD0}$  — среднее значение относительного, станционного прироста этой станции.

Погрешность  $\delta$  в определении полных приростов, вносимая введением понятия о среднем станционном приросте [уравнение (2)], может быть найдена в зависимости от действительного значения станционного прироста  $H_s$  и относительных потерь в сети  $p$ .

Обозначив действительное значение полного прироста

$$H = H_s + H_s h_i$$

и приближенное значение его

$$H_a = H_s + H_{s0} h_i,$$

найдем

$$\delta = \frac{H_a - H}{H} = \frac{h_i(H_{s0} - H_s)}{H_s(1 + h_i)}. \quad (12)$$

Для простой схемы «станция — линия без промежуточных нагрузок» относительные потери

$$p = \frac{P^2 R}{U^2}; P = \frac{PR}{U^2}$$

и относительный прирост потерь

$$h_i = \frac{2PR}{U^2},$$

откуда

$$h_i = 2p. \quad (13)$$

Подставляя эту зависимость в (12), найдем после преобразования

$$H_s = \frac{H_{s0}}{\delta \left( \frac{1}{2p} + 1 \right) + 1}. \quad (14)$$

По этой формуле построены кривые рис. 3, причем принято  $H_{s0} = 0,5$  kg/kWh. Область максимальных вероятных значений, очерченная пунктиром, характеризуется значением  $\delta \approx 2\%$ . Так как точность исходных данных (станционных приростов) определяется погрешностями до  $5\%$ , то допустимость введения «базисного» станционного прироста можно считать несомненной.

**Сложные сети.** Всякую замкнутую сеть можно представить как сочетание нескольких звезд, в том числе двухлучевых. Для некоторых из них, с целью упрощения схемы замещения, можно центр звезды совмещать с той или другой станцией, принимая сопротивление одного из лучей равным нулю. Эти априорные положения подтверждаются математическим анализом, сделанным для ряда содержащих замкнутые контуры сетей путем исследования расхода топлива в системе в зависимости от нагрузок станций<sup>2</sup>.

Найденные по выведенным формулам или измеренные с помощью расчетного устройства оптимальные потоки в ветвях отвечают требованию минимального расхода топлива в системе. Не всегда окажется возможным практическое осуществление такого распределения мощности без применения специальных мер управления ими. Это будет иметь место в тех случаях, когда замкнутые контуры неоднородны, т. е. на различных участках их отношения реактивного сопротивления к активному неодинаковы.

Мы считаем, что задачей любого метода и должно быть нахождение оптимального распределения мощностей с тем, чтобы районные управления имели возможность в каждом отдельном случае сравнить его с действительным (при оптимальных нагрузках станций) и решить, будет ли экономически оправданным применение регулирующих устройств.

Сделанное автором исследование показывает, что при наиболее распространенных значениях станционных приростов (3,5 ÷ 4,2 относительных единиц) потери в сети играют подчиненную роль.

<sup>2</sup> В этой работе принимали участие ассистенты И. А. Веселова и М. Д. Долматова.

Наиболее существенным с экономической точки зрения является сохранение действительных нагрузок возможно более близкими к оптимальным значениям.

Пренебрежение неоднородностью сети может быть причиной погрешности в определении полных относительных приростов, величина которой при наиболее неблагоприятных сочетаниях параметров сети не превышает  $0,7 \div 1,0\%$ . В отдельных случаях с целью избежания более крупных погрешностей следует корректировать величины сопротивлений, имитирующих сеть, с таким расчетом, чтобы увеличение их компенсировало возрастание потерь за счет неоднородности сети.

Вычисление токов в ветвях схемы расчетного устройства, построенного по формулам раздела (1), и сравнение их с оптимальными мощностями в исходной схеме сети показывают, что пропорциональность между ними сохраняется и в том случае, когда оптимальная нагрузка одной или нескольких станций оказывается выше номинальной мощности. Искусственное снижение нагрузки станции в схеме расчетного устройства достигается весьма просто введением дополнительного сопротивления в цепь ее и увеличением отрицательной величины напряжения в узлах схемы, к которым присоединены нагрузочные элементы.

Может оказаться, что экономический режим работы станций требует передачи по одному из участков сети большей мощности, чем это допустимо по его пропускной способности (по плотности тока, режиму напряжений и пр.). Тогда мощность, передаваемая по этому участку системы, замещается постоянными нагрузками, определяющимися пропускной способностью перегруженных участков и «отсосами» нагрузки.

Гидроэлектростанции обычно работают в режиме, позволяющем наиболее целесообразно использовать энергию водотока. При этом допущении гидроэлектростанции можно ввести в схему как отрицательные нагрузки (или станции с ограниченной мощностью).

**Определение действительных нагрузок станций.** С помощью расчетного устройства, равно как и при использовании других методов, определяются доли полезной нагрузки системы, которые должны нести те или иные станции. Действительные их нагрузки несколько выше, отличаясь от найденных на величину потерь в сети. В большинстве случаев необходимая поправка столь невелика, что ею можно пренебречь (так, очевидно, и делают некоторые авторы, не упоминая об этом). Однако, для районных электростанций, передающих энергию в систему по длинным линиям, учет потерь необходим, так же как и учет потерь в линиях интерконнекции систем. В этих случаях возможно получить действительные нагрузки с наибольшей точностью.

Общий метод нахождения истинных нагрузок таков. Намечается ряд вероятных режимов работы станции, например, одновременное и равномерное изменение нагрузки шин генераторного напряжения или нагрузки шин повышенного напряжения или изменение одной составляющей при постоянстве другой и т. п. Строят зависи-

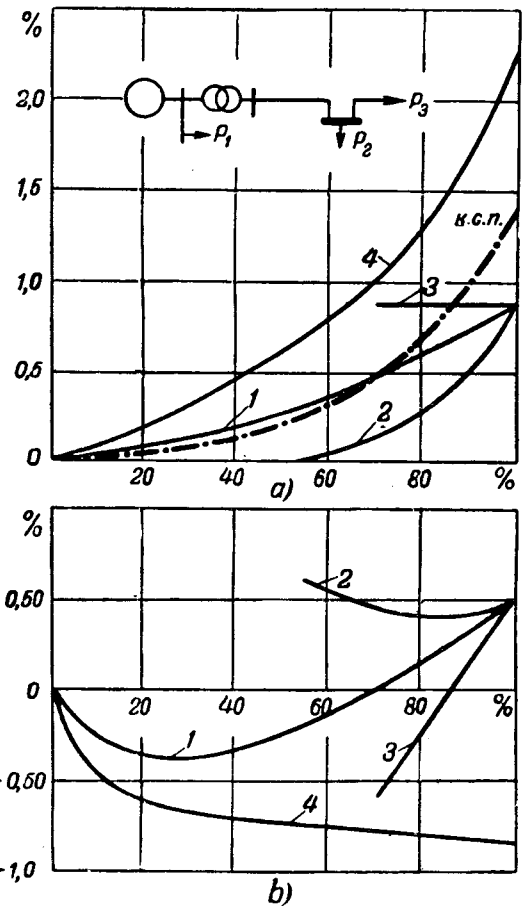


Рис. 4. а—Потери в сети в зависимости от нагрузки станции при различных режимах; б—погрешности при использовании кривой средних потерь (к. с. п.).

1—вся нагрузка изменяется равномерно; 2— $P_1 = \text{const}$ ,  $P_2 + P_3$  изменяется равномерно; 3— $P_2 + P_3 = \text{const}$ , изменяется только  $P_1$ ; 4— $P_1$ ,  $P_2$  снижена до 60%, вся нагрузка изменяется равномерно.

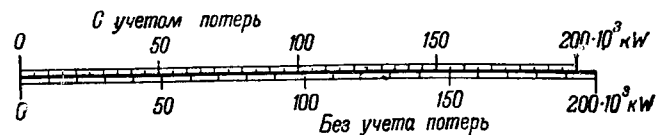


Рис. 5. Пример переводной шкалы для градуировки измерительных приборов.

мость потерь в сети от общей полезной нагрузки станции для различных режимов. Затем находят средние значения потерь для нескольких величин нагрузок станции и по точкам строят кривую средних потерь. На рис. 4,а приведено построение кривой средних потерь для одной из уральских грэс. Для иллюстрации ошибок, получающихся при применении этой кривой, на рис. 4, б показаны кривые погрешностей для тех же режимов.

Прибавляя величины средних потерь к соответствующим нагрузкам, строим переводную шкалу, пример которой показан на рис. 5. Измерительные приборы расчетного устройства градуируются с помощью переводной шкалы таким образом, чтобы они показывали действительные значения оптимальных нагрузок станций с учетом потерь.

Расчеты, сделанные для ряда уральских электростанций<sup>3</sup>, показали, что погрешности при ис-

<sup>3</sup> В этой работе принимал участие ассистент В. Ю. Сродных.

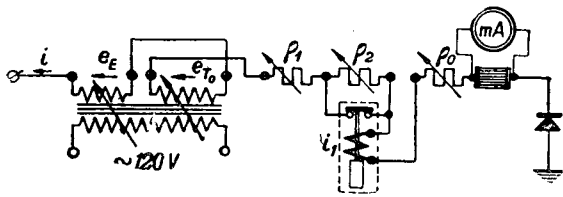


Рис. 6. Схема генераторной станции.  
 $e_E$  — сетевая э. д. с. ( $e_1$ );  $e_T$  — станционная э. д. с. ( $e_s$ ).

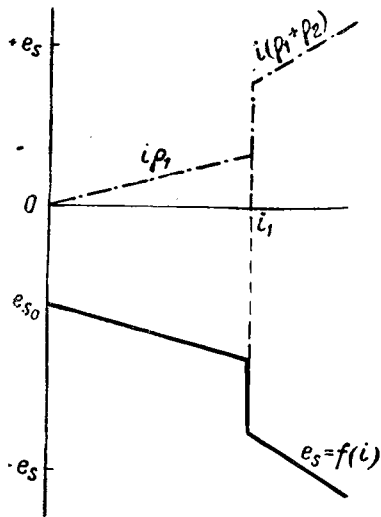


Рис. 7. Зависимость «станционной» э. д. с. от тока.

пользовании кривой средних потерь не превосходят 0,6—0,8% и лишь в одном случае составили 1,5%, что вполне допустимо.

**Возможность построения точной схемы замещения.** Анализ уравнений, определяющих оптимальные нагрузки станций без применения допущения по формуле (2), показывает, что вид их остается неизменным при условии введения в уравнение (7) вместо:

- приведенных относительных приростов  $h_s = \frac{H_s}{H_{s0}}$  — значений  $H_s$ , выраженных относительными числами (например,  $\text{kCal} \cdot 10^3 / \text{kCal} \cdot 10^3$ );
- сопротивлений  $R_i$  и  $R_{ik}$  — приведенных сопротивлений

$$R_i^* = H_s R_i \text{ и } R_{ik}^* = H_s R_{ik}.$$

Осуществление подобной схемы усложняет конструкцию сетевых элементов. Но главное затруднение состоит в том, что это соотношение вносит зависимость величин сопротивления от величины и направления потока мощности. В сложных сетях подбор надлежащих значений  $H_s$  оказывается практически очень трудным, пожалуй, неосуществимым. Уточнение результатов расчета путем применения указанной зависимости ничтожно, а подчас и спорно, поэтому приходим к выводу о целесообразности использования понятия о «базисном» станционном относительном приросте.

**Основы проектирования расчетных устройств.** С целью упрощения конструкции сопротивлений, исключения возможной взаимоиндукции и для

повышения точности измерений целесообразно проектировать расчетное устройство на постоянном токе. В качестве источника питания наилучшее решение дают многообмоточные трансформаторы, питаемые от сети через стабилизатор напряжения, с твердыми выпрямителями в общей вторичной цепи. При расчете сопротивлений следует не забывать о возможном влиянии высших гармонических в цепи выпрямленного тока.

Масштаб мощности следует выбрать таким, чтобы возможно было применить магнитоэлектрические или тепловые миллиамперметры со шкалой до 100 мА для станций и 250 мА для нагрузочных цепей, расширяя, если это требуется, шкалу с помощью шунтов (например,  $a_p = 0,8 \text{ mA}/10^3 \text{ kW}$ ). Масштаб напряжений для линий 110 кВ  $a_U = 0,01 \text{ V}/\text{kV}^2$  (и для линий 35 кВ  $a_U = 0,10 \text{ V}/\text{kV}^2$ ) дает общее напряжение не выше 100 В и обеспечивает достаточную точность изготовления сопротивлений. Для сопротивлений масштаб получается из предыдущих:  $a_R = \frac{a_U}{a_p} 1000$  (для указанных примерных значений  $a_R = 12,5 \Omega/\Omega$ ).

Схема генераторной станции дана на рис. 6. Обмотка  $e_i$  создает «сетевую» э. д. с. [см. (9)], сопротивление  $\rho_0$  служит для ограничения нагрузки. Обмотка  $e_{s0}$  в сочетании с сопротивлениями  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и реле создают «станционную» э. д. с. Зависимость ее от тока показана на рис. 7. Отрицательное значение  $e_{s0}$ , складываясь с падением напряжения от положительного тока  $i$  в сопротивлениях  $\rho_1$  и  $\rho_2$  (здесь  $i_1$  — уставка реле), дает ступенчатую характеристику  $e_s = f(i)$ , близкую к действительным характеристикам относительных приростов паротурбинных станций  $h_s = f(P_0)$ . Анализ этих характеристик для нескольких станций Урала в различных режимах работы показал, что подобные идеализированные характеристики могут имитировать<sup>4</sup> действительные с погрешностью 1,0—1,5% (и не более 2,0—2,5%) — рис. 8.

Эти характеристики должны быть построены в координатах  $P_0$ ,  $h_s$ , т. е. должны давать зависимость станционных приростов, отнесенных к базисному приросту  $H_{s0}$ , от полезной нагрузки станции. Их легко получить из обычных графиков зависимости относительных приростов от действительной нагрузки станции изменением шкалы нагрузок с помощью построенной по разделу определения действительных нагрузок станций переводной шкалы.

Изменению режима работы станции, — не нагрузки ее, а состава работающих агрегатов, — соответствует изменение уставок  $e_{s0}$ ,  $i_1$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  по заранее разработанной таблице. Применяемое в схеме реле должно иметь коэффициент возврата, близкий единице, что может быть достигнуто использованием искусственных схем.

Элементы сети представляют собой сопротивления, которые должны быть регулируемы в

<sup>4</sup> В пределах нагрузок, вероятных при данном числе работающих машин.

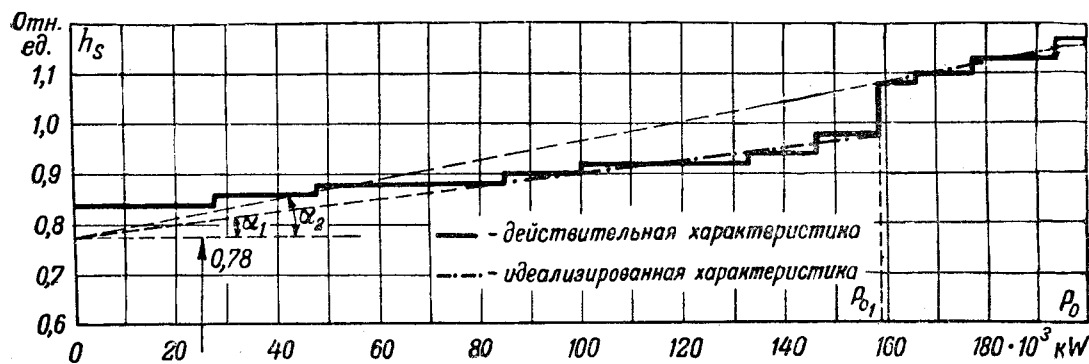


Рис. 8. Пример построения идеализированной характеристики относительных приростов. Начальное значение прироста, равное 0,78, определяет э. д. с.  $e_{s0}$ ;  $\operatorname{tg} \alpha_1$ —сопротивление  $\rho_1$ ;  $\operatorname{tg} \alpha_2$ — сумму сопротивлений  $\rho_1 + \rho_2$ .  $P_{01}$ —уставку реле  $i$ .

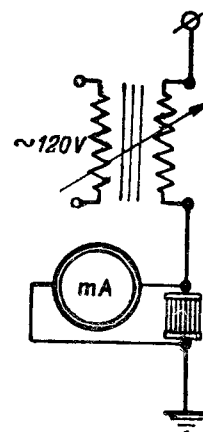


Рис. 9. Схема нагрузочного элемента.

тех случаях, когда возможно изменение числа включенных линий или трансформаторов (их приведенные сопротивления следует складывать с сопротивлениями линий).

Нагрузочный элемент, показанный на рис. 9, состоит всего лишь из трансформатора, создающего отрицательную э. д. с. Регулировка его производится непосредственно по показаниям миллиамперметра, градуированного в мегаваттах.

Определение оптимальных нагрузок с помощью расчетного устройства<sup>5</sup>, названного нами «экран» (экономическое распределение активной нагрузки), производится следующим образом:

1. Проверяется соответствие комбинаций уставок всех элементов режиму работы системы (уставок  $e_{s0}$ ,  $i$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$ —режиму станции; уставка  $e_r$ —режиму сети и нагрузки; уставка  $r$ —режиму сети и подстанций) и, если надо, вносятся поправки.

2. Напряжения нагрузочных узлов устанавливаются на нуль и включается питание. Увеличе-

нием отрицательной величины напряжения повышают нагрузки до заданной величины. Показания миллиамперметров станций дадут их экономические (оптимальные) нагрузки.

3. Если при увеличении напряжения нагрузочных узлов нагрузка одной из станций превзойдет допустимую для нее величину, нужно одновременно с увеличением  $-u_m$  снизить нагрузку этой станции введением сопротивления  $\rho_0$ , что потребует увеличения  $-u_m$  сверхзначения, отвечающего режиму неограниченных мощностей всех станций.

Целесообразно держать расчетное устройство всегда включенным. Тогда все манипуляции будут заключаться во внесении поправок в уставки при изменении режима.

Применение в цепях станций стабилизаторов тока позволило бы ускорить подгонку нагрузки при ограничении мощности станций. Сочетание миллиамперметров станций с датчиками устройства телеуправления или телеизмерения было бы существенным вкладом в автоматизацию энергосистем и способствовало бы повышению экономичности их работы.

<sup>5</sup> Постановление Технического отдела НКЭС от 20 марта 1946 г. о выдаче авторского свидетельства по заявке № 418/337528—III от 26 марта 1945 г.



# Новые низковольтные предохранители с большой отключающей способностью

Кандидат техн. наук А. М. МЕЛЬКУМОВ и инж. З. Л. ЖИРОНКИНА

Всесоюзный электротехнический институт

В настоящее время заводы выпускают лишь один тип предохранителя для защиты мощных низковольтных цепей — это тип ПР-1. Предохранители типа ПР-1 работают без выброса пламени и обладают значительной отключающей способностью.

Предохранители ПР-1 достаточно проверены как испытаниями, так и в эксплуатации, однако производство их связано с расходом значительных количеств дефицитных материалов, таких, как фибра, медь, цинк, и с трудоемкой станочной обработкой. Это затрудняет выпуск их в количествах, необходимых для удовлетворения потребности. Кроме того, выпуск штампованных цин-

Ощущаемый потребителями недостаток низковольтных предохранителей вызвал большое количество предложений новых конструкций и технологических улучшений, направленных к облегчению производства и увеличению выпуска предохранителей. Анализ существующих конструкций и проведенная исследовательская работа позволили авторам предложить новую, отвечающую современным требованиям, конструкцию низковольтных предохранителей на 550 В с наполнением кварцевым песком. Приведено описание конструкции и результатов исследования этих предохранителей.

ковых плавких вставок для этих предохранителей настолько недостаточен, что зачастую потребители вынуждены ставить вставки собственного изготовления, не всегда обеспечивающие правильную и надежную работу предохранителей.

В иностранной практике имеют распространение два основных типа мощных низковольтных предохранителей — трубчатые и с мелкозернистыми наполнителями.

Трубчатые предохранители аналогичны нашим предохранителям типа ПР-1. Лучшее качество фибры позволяет обеспечить несколько более высокую отключающую способность, либо иметь облегченную и менее трудоемкую конструкцию (например, предохранители, изображенные на рис. 1).

Предохранители с мелкозернистыми наполнителями получают в последнее время все большее распространение. Они изготавливаются либо непереаряжаемыми (неразборными) и могут быть переаряжены лишь на заводе-изготовителе, либо переаряжаемыми, но с применением сменных плавких вставок заводского изготовления. На рис. 2 показаны типичные непереаряжаемые и переаряжаемые предохранители. Для обоих предохранителей (рис. 2) обычно применяется хорошего качества пресованный фарфор с выдержанными размерами. Иногда вместо фарфора применяется пластмасса.

Плавкие вставки таких предохранителей обычно выполняются из нескольких параллельных серебряных проволок или лент и имеют суженные участки. В качестве наполнителя обычно используется чистый и сухой мелкозернистый кварцевый песок. Отключающая способность таких предохранителей достигает 25 000—30 000 А при 500 В.

Исходные исследования. Исследования гашения дуги в кварцевом песке, проведенные нами ранее в связи с разработкой высоковольтных предохранителей [Л. 1, 2], показали большую

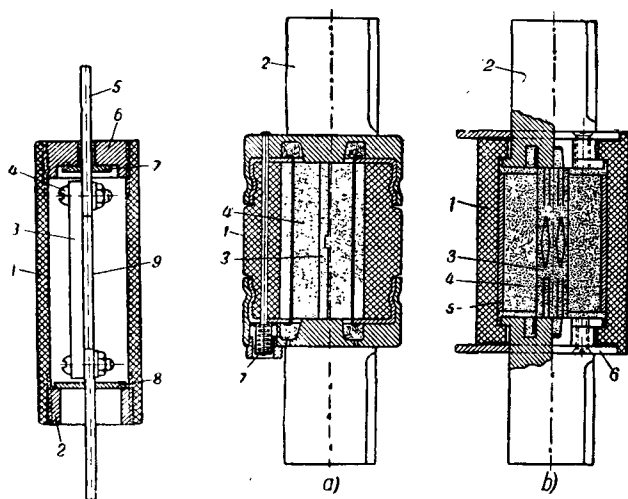


Рис. 1. Облегченный трубчатый предохранитель.

1—фибровая трубка; 2—кольцевая гайка; 3—фибровая пластина, скрепляющая винтами 4 оба контактных ножа 5; 6—пробка; 7 и 8—шайбы, закрепленные на ножках; 9—цинковая плавкая вставка.

Рис. 2. Патроны предохранителей с мелкозернистым наполнителем.

а—непереаряжаемый (Dellé); б—переаряжаемый (АSEA), 1—фарфоровая трубка; 2—контактный нож с креплением к трубке; 3—плавкая вставка; 4—мелкозернистый наполнитель; 5—асбестовая обкладка; 6—шайба; 7—указатель срабатывания.

эффективность этого метода гашения дуги и позволили установить основные особенности его и параметры конструкции, оказывающие влияние на процесс отключения. Так, была установлена целесообразность применения плавких вставок из нескольких параллельных проволок, а также, что эффективность гашения дуги возрастает с уменьшением диаметра отдельной проволоки и увеличением количества их, а также с увеличением степени чистоты кварцевого песка. Было также выявлено, что наибольшие трудности возникают при отключении токов малых перегрузок, требующие специальных мер, снижающих тепловую нагрузку патрона как во время плавления вставки, так и во время гашения дуги. Наконец, было установлено, что работа предохранителей сопровождается перенапряжениями, связанными с токоограничивающим действием, растущими с увеличением длины отдельной плавкой проволоки и увеличением отключаемого тока.

Предварительные опыты, проведенные с нормальными предохранителями типа ПР-1 на 200 А, но с заполнением кварцевым песком, показали, что они способны отключать токи короткого замыкания даже при условии применения нормальной пластинчатой цинковой вставки от предохранителя ПР-1. Однако, форма этой вставки для применения ее в кварцевом песке обладает существенными недостатками: в предохранителях ПР-1 уширения на плавкой вставке, не расплавляющиеся при его срабатывании, падают в пустом кожухе на дно, освобождая все пространство между выводами, в кварцевом же песке они остаются на месте и являются металлическими мостиками между перегоревшими частями. При малых отключаемых токах (перегрузки) длина суженных частей вставки недостаточна для гашения дуги, уширенные же части содержат слишком много металла, что неблагоприятно отзывается на гашении дуги. Опыты отключения токов перегрузок предохранителями типа НП-5 Уфимского завода, заполнявшимися различным песком (речным, кварцевым), подтверждают это: с цинковыми вставками от предохранителя типа ПР-1 они не отключали токов перегрузок и разрушались.

При применении пластинчатых вставок из медной ленты толщиной 0,25 и 0,18 мм условия гашения дуги ухудшались, предохранители не отключали токов коротких замыканий и разрушались.

Учитывая все это, основные усилия были направлены на достижение хороших результатов с применением медных проволок. При этом также имелось в виду, что применение обычной медной проволоки позволит потребителям в случае необходимости без затруднений своими силами изготовить новые вставки для перезарядки.

Для выбора основных размеров плавких вставок была проделана серия опытов отключения токов коротких замыканий с единичными медными проволоками различного диаметра и длины, помещенными в кварцевый песок.

При этом выяснилось, что, как и в высоковольтных предохранителях, эффективность гашения

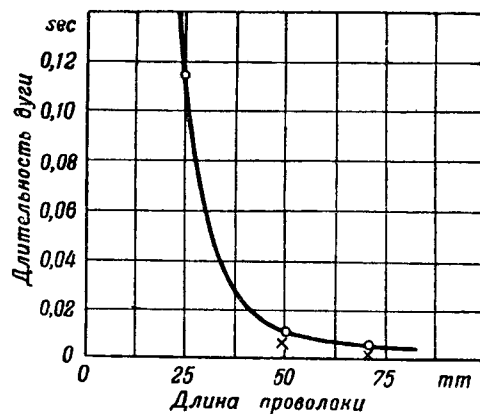


Рис. 3. Длительность горения дуги в зависимости от длины плавкой проволоки.

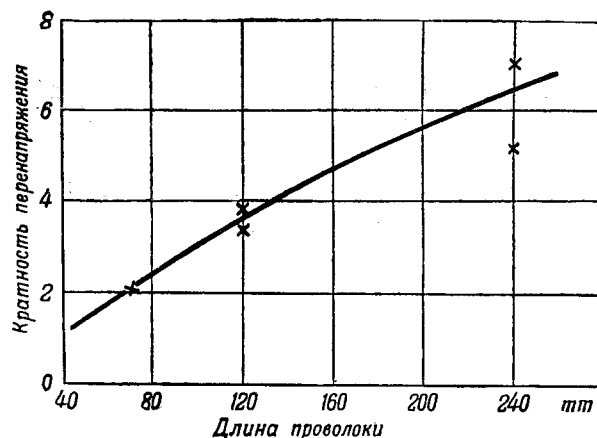


Рис. 4. Кратность перенапряжений в зависимости от длины плавкой проволоки.

дуги растет с уменьшением диаметра и увеличением длины проволоки. Для медной проволоки диаметром 1,45 мм критическая длина, т. е. та длина проволоки, ниже которой гашение уже не происходит, составила 25 мм, при отключении тока около 10 000 А (эффективных) при 550 В. Сопоставление длительности гашения дуги при различных длинах проволоки, приведенное на рис. 3, показывает, что время горения дуги растет с уменьшением длины проволоки и что для надежного гашения дуги следует длину проволоки иметь не ниже 50 мм.

Отключение токов коротких замыканий предохранителями с кварцевым песком производится с токоограничением, и работа их, следовательно, неизбежно должна сопровождаться перенапряжениями. Для проверки возможных пределов величин перенапряжений, с помощью катодного осциллографа была получена приведенная на рис. 4 зависимость кратности перенапряжений от длины плавкой проволоки. Учитывая установленный для высоковольтных предохранителей рост перенапряжений с увеличением отключаемого тока, опыты производились при наибольшей величине отключаемого тока около 11 000 А (эффективных), которую можно было получить в лаборатории при 550 В.

Как видно из рис. 4, перенапряжения растут почти прямо пропорционально длине плавкой



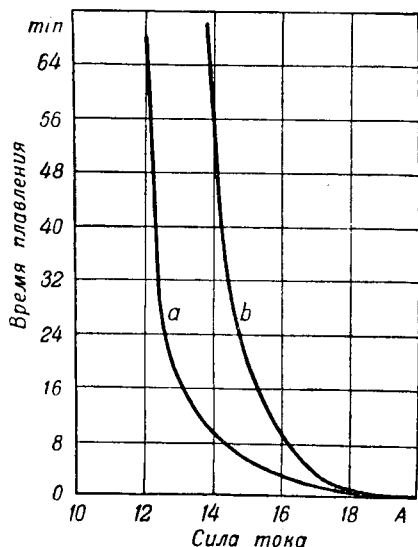


Рис. 5. Сравнение характеристик плавления медной проволоки с растворителем (а) и без него.

проволоки и достигают семикратной величины при длине проволоки 240 мм.

Если за допустимую величину перенапряжений принять испытательное напряжение электрических машин (около четырехкратного значения линейного напряжения), то наибольшая допустимая длина проволоки не должна превышать 140 мм. Практически, имея в виду импульсный характер перенапряжений, а также, что импульсная прочность машин должна быть несколько больше, можно предполагать, что безопасный предел перенапряжений лежит несколько выше.

Таким образом, произведенные исследования позволили установить нижний и верхний пределы длины плавкой проволоки, а именно 50 и 140 мм.

Дальнейшими исследованиями была установлена нецелесообразность применения проволоки диаметром больше 1 мм и необходимость увеличения нижнего предела длины проволоки до 70 мм для проволоки диаметром 0,55 мм и выше, для надежного отключения токов перегрузки.

Одним из серьезных затруднений при применении простых медных проволок в высоковольтных предохранителях являлось большое выделение тепла при малых перегрузках, что приводило к тепловому разрушению предохранителя и вынуждало применять специальные меры для снижения тепловой нагрузки. Такая же картина наблюдается и в низковольтных предохранителях, особенно на большие номинальные силы тока: при малых перегрузках фарфоровая трубка предохранителя трескается. Кроме того, характеристики плавления вставки при допустимом значении температур длительного нагрева предохранителя не удовлетворяют требованиям.

Для получения требуемых характеристик плавления и снижения тепловой нагрузки предохранителя при перегрузках, нужно снизить среднюю температуру вставки в момент плавления. Этого можно достигнуть либо сужением части длины вставки, либо применением растворителя в виде оловянного шарика, напаянного на плавкий эле-

мент вставки, аналогично применяемому в высоковольтных предохранителях [Л. 1, 2].

Изготовление плавкой вставки с суженными частями из круглой проволоки связано с технологическими трудностями и не может быть выполнено потребителями, тогда как напайка шарика растворителя легко может быть выполнена в любых условиях.

Растворитель не изменяет температуры нагрева предохранителя при нормальной нагрузке и не влияет на его отключающую способность. При перегрузках же оловянный шарик растворяет металл плавкой проволоки и приводит к перегоранию ее при температурах, значительно более низких, чем температура плавления меди. Благодаря этому ускоряется плавление вставки при перегрузках и ее характеристика становится более полой (рис. 5). Эффект действия растворителя зависит от диаметра оловянного шарика. Нашими исследованиями было установлено, что наиболее устойчивые времена плавления получаются при шарике диаметром около 1 мм, для проволок диаметром до 0,3 мм и около 2 мм для проволок большего диаметра.

**Конструкция новых предохранителей.** При конструировании низковольтных предохранителей необходимо считаться с двумя особенностями применения их—массовостью, требующей большого внимания к технологии изготовления, и относительно частым срабатыванием, требующим быстрой смены сработавшей вставки. Новое включение цепи может быть произведено либо после замены сработавшего патрона новым, либо после замены сгоревшей плавкой вставки в том же патроне. В первом случае сработавший патрон может быть перезаряжен либо в мастерской потребителя, либо только на заводе-изготовителе. Немедленное использование сработавшего патрона с новой вставкой всегда связано с большим перерывом в питании цепи, чем при смене патрона резервным, и не может быть признано целесообразным. С другой стороны, отправка патронов на завод-изготовитель для перезарядки в наших условиях большой протяженности территории потребовало бы наличия значительного резерва патронов, что не может быть обеспечено в ближайшие годы. Поэтому следует признать целесообразным иметь предохранители, допускающие перезарядку силами и средствами потребителей.

Существует точка зрения, что наибольшие удобства достигаются при конструкции, собранной на винтах, допускающей разборку и перезарядку предохранителей на месте эксплуатации. Однако, это не всегда оправдано. В предохранителях с кварцевым песком, имеющих плавкую вставку из нескольких проволок, свинчивание проволок с контактным ножом патрона не дает надлежащей устойчивости характеристик. Поэтому, как правило, даже в перезаряжаемых конструкциях соединение плавких элементов с контактным ножом производится либо точечным свариванием (в заводском выполнении), либо спайкой соответствующим припоем, причем для предохранителей на значительный номинальный ток приходится применять твердые припой.

Сказанное подтвердилось при испытаниях разработанной нами по типу Delle [Л. 3] свинчиваемой конструкции предохранителей, изображенной на рис. 6 и 7. В этой конструкции плавкая проволока монтирована на асбоцементной пластине, скрепляющей оба контактных ножа. Крепление плавких проводов и асбоцементной пластины к ножу осуществляется двумя винтами с накладками. К одному из ножей припаяна крышка. После вставления выемной части в фарфоровую трубку и заполнения ее песком на второй нож надевается другая крышка и привинчивается винтами.

При испытаниях конструкции обнаружилось, что характеристики плавления вставки сильно колеблются в зависимости от степени затяжки винтов, скрепляющих плавкие проволоки, и от степени их окисления. Поэтому, несмотря на благоприятные характеристики по отключающей способности [при испытаниях предохранителями на 200 и 400 А надежно отключались токи от двухкратного до 11 000 А (эффективных)], нам пришлось от конструкции с привинчиваемыми плавкими проволоками отказаться.

Возможно, что применением плавких элементов из серебра и посеребренных контактных ножей, как это принято в иностранной практике, можно достичь устойчивых характеристик, однако для наших условий более удобны в эксплуатации обычные медные проволоки, которые всегда доступны.

По приведенным соображениям новая конструкция выполнена без применения винтовых соединений, и она позволяет довольно легко произвести перезарядку на месте эксплуатации.

Патрон предохранителя (рис. 8) состоит из изолирующей трубки, по концам которой армированы цементом латунные колпачки; к колпачкам припаяны плавкие проволоки, натянутые внутри трубки параллельно ее оси. Трубка заполнена чистым кварцевым песком и закрыта припаяваемыми крышками. Предохранители на 15, 60 и 100 А имеют стеклянные трубки, а на 200 и 400 А — фарфоровые.

Плавкие проволоки вставок снабжены растворителем в виде одного оловянного шарика, напаянного посредине каждой проволоки. В табл. 1 приведены размеры плавких вставок предохранителей. Описываемые предохранители допускают применение вставок на любую силу тока, не превышающую номинального тока патрона. Например, в патроне на 100 или 200 А может быть применена любая вставка от 4 А до соответ-

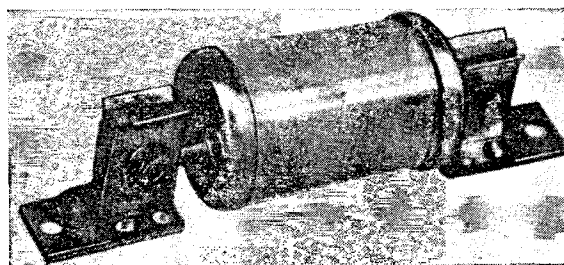


Рис. 6. Предохранитель с кварцевым песком на 550 В со свинчиваемым патроном.

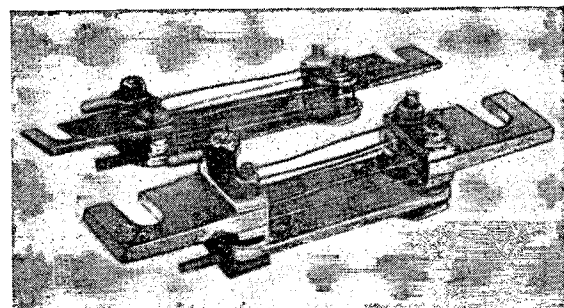


Рис. 7. Выемная часть патронов предохранителей на 200 (вверху) и на 400 А.

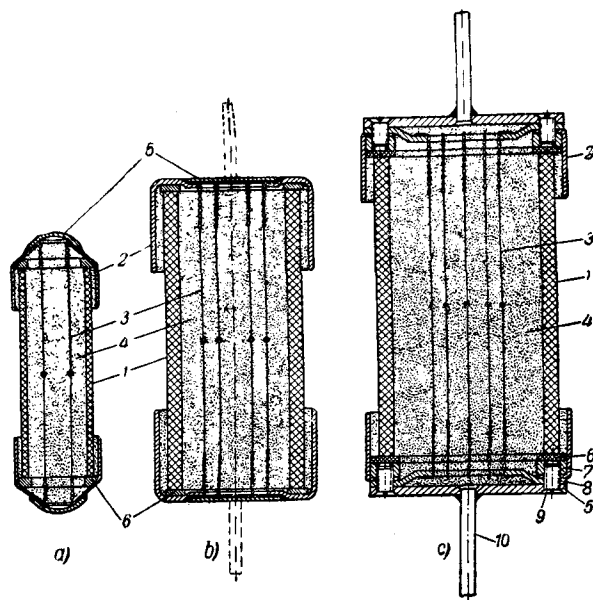


Рис. 8. Патроны предохранителей с кварцевым песком на 550 В.  
 а — на 15 и 60 А; б — на 100 и 200 А; с — на 400 А; 1 — трубка; 2 — колпачок; 3 — плавкая проволока; 4 — кварцевый песок; 5 — крышка; 6 — прокладка; 7 — кольцо; 8 — шайба; 9 — винт.

Таблица 1

Номинальный ток вставки, А	4	6	10	15	25	50	60	80	100	125	160	200	350
Плавкая вставка	Диаметр проволоки, мм	0,11	0,15	0,25	0,3	0,3	0,47	0,55	0,47	0,6	0,6	0,6	1,0
	Количество проволок	2	2	2	2	4	4	4	6	6	8	10	12
	Рабочая длина проволок, мм	60	60	60	60	70	70	70	70	70	75	75	75
Номинальный ток патрона, А	15				60			100		200			400

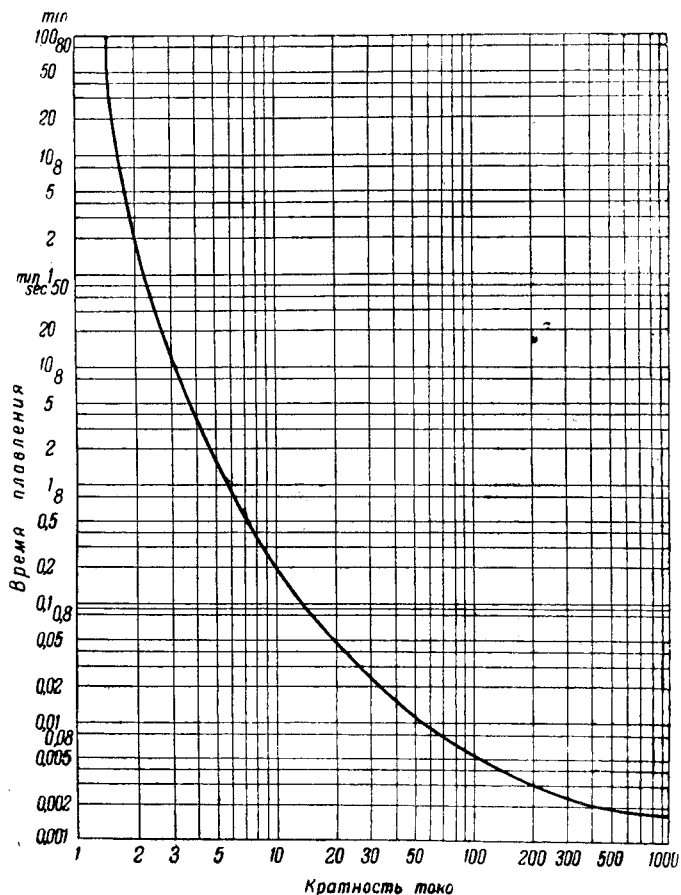


Рис. 9. Характеристика плавления предохранителей на 550 В до 200 А.

ственно 100 А или 200 А. Это является преимуществом данных предохранителей по сравнению с ПР-1.

Плавкие проволоки скручены по концам вдвое и припаяны (в заводском исполнении могут быть приварены на аппарате для точечной сварки) к тонким медным штампованным колпачкам. Колпачки для предохранителей на 15 и 60 А имеют толщину 0,5 мм, на 100 А—1 и на 200 А—1,5 мм.

Для заполнения предохранителей применяется чистый сухой кварцевый песок. Вероятно благоприятные результаты могут быть получены с некоторыми сортами речного песка, имеющими высокое содержание кварца (98—99%).

Для предохранителей на 15 и 60 А использованы контактные гнезда существующих предохранителей ПР-1. Для предохранителей на 100 и 200 А применены аналогичные контактные гнезда больших размеров. Однако, возможно применение контактов ПР-1 и для предохранителей на 100 и 200 А. В этом случае патроны снабжаются контактными ножами как показано пунктиром на рис. 8 б).

Габариты предохранителей новой конструкции (см. ниже табл. 3) на 550 В, 15, 60 и 400 А, а также на 100 и 200 А с ножами, в точности соответствуют габаритам ПР-1 на 250 В и на соответствующие токи.

**Результаты испытания.** Новые предохранители были подвергнуты всесторонним испытаниям. По своим характеристикам они удовлетворяют существующим требованиям.

На рис. 9 приведена ампервременная характеристика плавления предохранителей, построенная на основании значительного числа опытов. Из кривой рис. 9 видно, что предохранители удовлетворяют требованиям в отношении времен плавления при токах 1,3 номинального (время плавления больше часа) и 1,6 номинального (время плавления меньше часа), а также по инерционности характеристики—при пятикратном значении тока время плавления больше 1 sec.

Отключающая способность предохранителей проверялась при переменном токе частотой 50 и 25 Hz. Большое количество опытов отключения токов двухполюсных и трехполюсных коротких замыканий соответственно одним патроном при полном линейном напряжении 550 В (восстанавливающееся напряжение доходило до 600 и даже до 800 В) и тремя патронами, а также опыты отключения токов перегрузок, показали большую надежность действия (без выброса пламени или дыма, шума). Отключение коротких замыканий происходило в тысячные доли секунды и с ограничением величины тока до сравнительно небольших значений (табл. 2). На рис. 10 приведены характерные осциллограммы отключения токов предохранителями.

Таблица 2

Номинальный ток предохранителя, А	Испытан при токе ( $A_{eff}$ )		Наибольший пик тока через предохранитель, $A_{max}$
	от	до	
15	40	11 000	2 500
60	170	11 000	8 500
100	165	11 000	12 500
200	410	11 000	15 000
400	600	11 000	Без токоограничения

В табл. 2 приведены предельные величины токов, при которых испытывались предохранители, а также наибольшие величины токов, пропущенных предохранителями (токоограничение). При этих испытаниях предел отключающей способности не был достигнут вследствие ограниченных возможностей испытательной установки.

Для проверки запасов надежности работы предохранителей были проведены испытания на отключение токов коротких замыканий 5 500 и 11 000 А (эффективных) с плавкими вставками, значительно превышающими номинальный ток патронов. Так, например, предохранитель на 15 А испытывался с вставкой на 30 А, предохранитель на 60 А с вставкой на 100, предохранитель на 200 А—с вставкой на 260 А. При этом ни одного случая отказа предохранителями на 15 и 200 А не имело места, предохранители на 60 А отказали в гашении дуги лишь в двух случаях из восьми.

Таким образом, эти испытания показали, что предохранители обладают значительным запасом

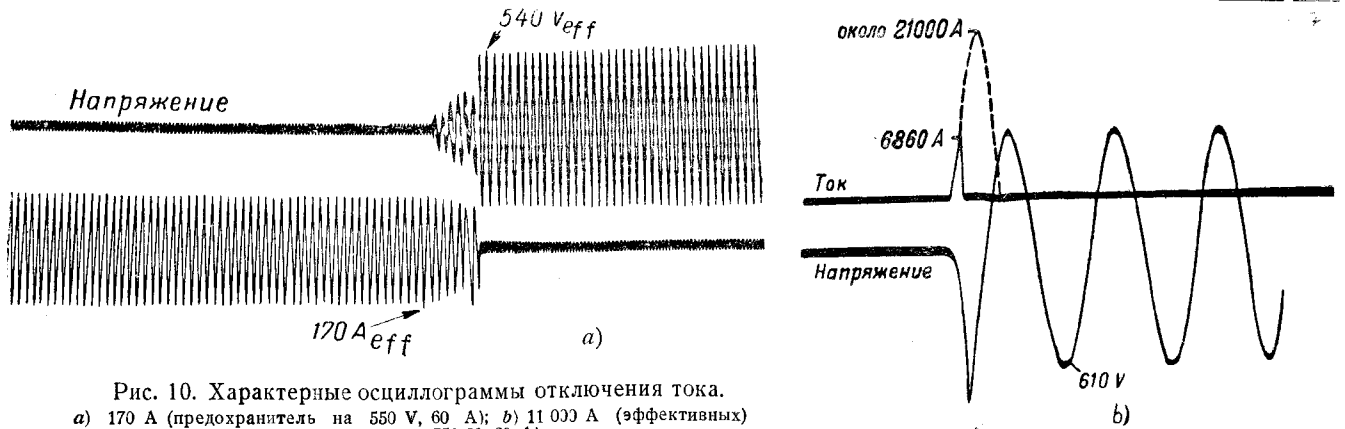


Рис. 10. Характерные осциллограммы отключения тока.  
 а) 170 А (предохранитель на 550 В, 60 А); б) 11 000 А (эффективных)  
 предохранитель на 550 В, 60 А).

Таблица 3

Номинальный ток патрона	А	15	60	100	200	400
Расход меди на один патрон, g	Кварцевый ПР-1*	20 —	30 —	70 770	210 1 480	— —
Габариты предохранителя, mm на 550 В (диаметр / полная длина)	Кварцевый ПР-1	22/75 22/125	28/85 28/129	36/105* 54/200	55/105* 70/225	70/195 86/270
Наибольший отключаемый ток А (эффективных)	Кварцевый ПР-1	Больше 11 000 1 200	Больше 11 000 3 000	Больше 11 000 10 000	Больше 11 000 10 000	Больше 11 000 12 000

\* Данные завода № 656; сюда не включен вес выводных ножей.  
 \* В случае выполнения с контактными жоками длина увеличивается до 155 mm.

надежности и позволяют предполагать, что отключающая способность их значительно выше значений, достигнутых при испытаниях. Имея в виду, что разработанные нами предохранители на 6 600 В надежно отключают токи до 20 000 А, а предохранители на 3 300 В—токи до 40 000 А (эффективных), имеются большие основания считать, что аналогичные по принципу действия и конструкции предохранители на 550 В также будут отключать токи свыше 20 000 А (эффективных).

**Сравнительная оценка новых предохранителей.** Для суждения о производственных и эксплуатационных преимуществах описанных предохранителей сравним их с предохранителями типа ПР-1, производимыми и эксплуатируемыми ныне.

С точки зрения производства можно отметить следующие преимущества новых предохранителей: 1. Исключена всякая станочная обработка и исключен крепеж. 2. Вместо фибровой трубки применена стеклянная или фарфоровая трубка. 3. Вместо штампованной цинковой вставки применена медная проволока, что исключает необходимость в заводском изготовлении сменных плавких вставок. 4. Они требуют значительно меньшего расхода цветных металлов (табл. 3).

С точки зрения эксплуатации отмечаются следующие преимущества новых предохранителей: 1. Значительно меньшие габариты, чем ПР-1

(табл. 3), что позволит сократить размеры щитов и занимаемое ими место. 2. Более высокая отключающая способность, чем предохранителей ПР-1 (табл. 3). 3. Бесшумная работа, без выброса пламени или дыма и с ограничением тока короткого замыкания. 4. Плавкая вставка легко может быть изготовлена на месте эксплуатации.

Указанные здесь преимущества новых предохранителей настолько бесспорны, что отодвигают на второй план эксплуатационные неудобства, связанные с необходимостью иметь чистый кварцевый песок для перезарядки.

Можно полагать, что опыт эксплуатации предохранителей нового типа, выпуск которых осваивается Курским аппаратным заводом, рассеет сомнения и позволит преодолеть технический консерватизм в этом вопросе и будет содействовать дальнейшему внедрению надежных современных предохранителей.

Литература

1. А. М. Мелькумов. Разработка и исследование высоковольтных предохранителей. Бюллетень ВЭИ, № 2, 1940. Мощные высоковольтные предохранители с кварцевым песком. Электричество, № 7, 1946.  
 2. А. М. Мелькумов. Разработка и исследование высоковольтных предохранителей с кварцевым песком. Технические отчеты ВЭИ.  
 3. J. Grillet. Coup-circuit à grand pouvoir de coupure, Rev. Gén. de l'Electricite, № 20, 1938.



# Переходные процессы и резонансные явления в оперативных цепях постоянного тока

Кандидат техн. наук Г. Г. КОСТЯНЯН

Грузэнерго

Система постоянного тока на электрических станциях и подстанциях, используемая для сигнализации и управления в схемах релейной защиты и автоматики, часто объединяет десятки и сотни километров жил контрольного кабеля и сотни электромагнитных механизмов (реле, приборы сигнализации, включающие и отключающие катушки и т. п.). Благодаря значительной емкости этих цепей, обусловленной протяженностью контрольных кабелей, и индуктивности обмоток электромагнитных механизмов возникающие в рассматриваемых цепях электрические явления могут быть причиной аварий [Л. 1—3].

На электрических станциях и подстанциях известны аварии, причиной которых являются переходные процессы и резонансные явления, возникающие в оперативных цепях постоянного тока при замыканиях их на землю или при попадании в них переменного тока. Дана математическая трактовка этих процессов, приведены некоторые данные их экспериментального исследования и предлагаются мероприятия, устраняющие опасность, связанную с рассматриваемыми явлениями.

Исследуя подобные аварии, мы пришли к убеждению, что большинство их является следствием переходных процессов, возникающих при повреждении изоляции цепи на землю, или следствием резонансных явлений,

сопутствующих попаданию переменного тока в цепь постоянного.

О практической возможности ложного срабатывания электромагнитных механизмов в рассматриваемых цепях в результате указанных переходных процессов и резонансных явлений, а также о величинах индуктивности некоторых реле ХЭМЗ дает представление табл. 1.

Таблица 1

Номинальное напряжение обмоток реле	220 В постоянного тока			110 В постоянного тока		
	Промежуточное типа ЭП-231	Промежуточное типа РП-2	Времени типа ЭВ-180	Промежуточное типа ЭП-231	Промежуточное типа РП-2	Времени типа ЭВ-180
Наименование и тип реле						
Среднее значение тока трогания,* мА	12	14	120	25	30	250
Омическое сопротивление обмотки, кΩ	10	10	1,2	2,5	2,5	0,25
Индуктивность обмотки до срабатывания реле, Н	700	95	7	160	25	1,6
Реактивное сопротивление обмотки при переменном токе частоты 50 Hz, кΩ	220	30	2,2	50	8	0,5
Ориентировочная длина кабеля КСРБ 10 × 2,5 мм <sup>2</sup> , полностью компенсирующего емкостью одной своей жилы относительно земли индуктивность обмотки реле, км	0,1	0,7	10	0,4	2,7	43
Напряжение переменного тока, способное вызвать ложное срабатывание реле в схеме рис. 5, при полной компенсации реактивности реле емкостью кабеля, В	120	140	145	63	75	63
Напряжение на клеммах реле от переменного тока 220 В, 50 Hz в одиночном контуре, изображенном на рис. 5, при полной компенсации реактивных напряжений, после срабатывания реле, V	более** 3 000	1 100	800	более** 3 000	1 000	750
Емкость цепи, способная быть причиной ложного срабатывания реле при переходных процессах в момент замыканий на землю в соответствии со схемой рис. 1 при $i_a = 0, \mu F$	8	9	—	20	25	—

\* Токи трогания реле в зависимости от начального голожения якоря реле, натяжения пружины (для реле типа ЭП-231 и ЭВ) отклоняются от средних данных, приведенных в таблице, иногда на 30—50%.

\*\* Замерить не удалось, так как до срабатывания реле возникла пробой обмотки.

Примечание. Все размеры, кроме приведенных в первых двух строках, относятся к реле со средним ходом якоря.

Данные табл. 1 дают основание утверждать, что при большой протяженности рассматриваемых цепей и в случае применения реле ХЭМЗ, обладающих большой индуктивностью (например, реле типа ЭП-231), указанные переходные процессы и резонансные явления могут представлять реальную опасность.

Этим и следует объяснить, что с 1940 г. в периодической литературе появились статьи, описывающие аварии, возникающие в результате переходных процессов и резонансных явлений в рассматриваемых цепях [Л. 1—3]. Однако, эти работы ограничиваются описанием отдельных аварийных случаев, теоретически не обобщенных и не подтверждающихся исследованиями. Между тем, неизученность этого вопроса значительно затрудняет анализ аварий, вызванных указанными явлениями, и борьбу с ними.

Ниже приведены некоторые наши теоретические и экспериментальные исследования в области резонансных явлений и переходных процессов, возникающих при замыкании на землю в указанных цепях постоянного тока.

**Переходные процессы при замыкании на землю.** В свое время в целях повышения надежности работы рассматриваемых цепей был принят принцип изолированной их работы относительно земли, в отмену практиковавшегося ранее глухому заземлению отрицательного полюса батареи. Разземление отрицательного полюса батареи расценивалось тогда как мероприятие, сокращающее вероятность ложного срабатывания и отказа в действии реле при повреждении изоляции цепи на землю (к тому времени не был узаконен порядок жесткого подсоединения обмоток реле только к отрицательному полюсу цепи). Имелось в виду, что при изолированной работе цепи ложное срабатывание реле может возникнуть только при маловероятном нарушении изоляции на землю одновременно в двух точках цепи [Л. 4, 6].

Однако, эти взгляды, имевшие свои основания в период первоначального развития рассматриваемых цепей (1920—1930 гг.), сейчас устарели. В частности, эти соображения вовсе не учитывают возможностей срабатывания реле в результате переходных процессов при замыкании на землю только в одной точке цепи. Между тем, при условии, когда цепь изолирована относительно земли, эти переходные процессы могут быть непосредственной причиной ложного срабатывания некоторых промежуточных реле ХЭМЗ.

Возможность ложного срабатывания реле объясняется внезапным изменением (в момент замыкания на землю) параметров цепи относительно земли, в результате чего изменяются напряжения между полюсами батареи и землей и заряды емкостей положительного и отрицательного полюсов батареи. В этом случае через обмотку реле могут протекать токи, которые при известных условиях как по величине, так и по времени оказываются достаточными для срабатывания реле.

В дальнейшем нашем изложении дана математическая трактовка процессам, возникающим

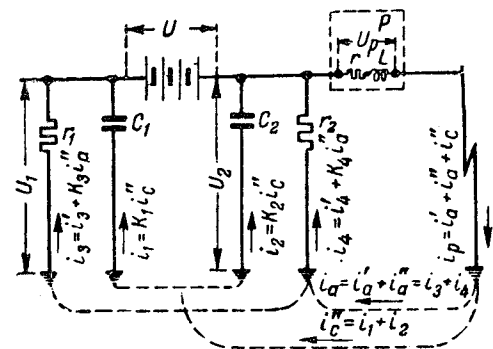


Рис. 1.

при замыкании на землю за обмоткой реле  $P$ , в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

На этой схеме  $C_1$  и  $C_2$ —эквивалентные емкости отдельных полюсов цепи относительно земли;  $r_1$  и  $r_2$ —соответственно сопротивления изоляции полюсов;  $r$  и  $L$ —омическое сопротивление и индуктивность реле  $P$ .

Величины этих емкостей, омических сопротивлений и индуктивностей определяются параметрами подключенного к сети оборудования, состоянием изоляции цепи и т. п.

В рассматриваемых переходных процессах особый интерес представляют емкости  $C_1$  и  $C_2$ , так как при достаточной их величине реле  $P$  может срабатывать даже при  $i_a = 0$ . Однако, даже при больших значениях  $C_1$  и  $C_2$  (десятки микрофард) возможность срабатывания реле  $P$  зависит также от величин  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r$  и  $L$ . Увеличение  $r_1$  и уменьшение  $r_2$  значительно снижают возможность срабатывания реле  $P$ , в то время как возрастание  $r$  и уменьшение  $L$  благоприятствуют этой возможности.

На том же рис. 1 показано распределение токов в ветвях цепи, а в табл. 2 приведены выражения, устанавливающие величины этих токов с учетом предварительного заряда емкостей  $C_1$  и  $C_2$  напряжением  $U_1$  и  $U_2$ .

Выражения, приведенные в табл. 2, определены в предположении, что рассматриваемая нами схема представляет собой цепь со сосредоточенными постоянными. Это предположение, как известно, дает возможность определить токи в цепи (с учетом предварительного заряда емкостей  $C_1$  и  $C_2$ ) из системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Однако, благодаря значительному числу ветвей в схеме рис. 1 эта задача достаточно сложна.

Анализ схемы рис. 1 показывает, что для определения тока  $i$  в реле  $P$  схему рис. 1 можно заменить схемой рис. 2. Такое замещение в рас-

<sup>1</sup> На основании схемы замещения, приведенной на рис. 2, и выражений табл. 2 могут быть определены не только токи в реле, но также все токи в ветвях рис. 1. При этом  $i_1$  и  $i_2$  находятся непосредственно умножением  $i''_c$  на  $k_1$  и  $k_2$ , а токи  $i_3$  и  $i_4$  путем сложения токов  $i_a k_3$  и  $i_a k_4$  с начальными токами предшествовавшего режима в ветвях  $r_1$  и  $r_2$  с учетом принятых для этих токов на рис. 1 положительных направлений.

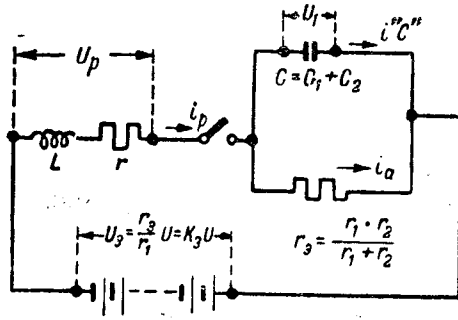


Рис. 2.

смаатриваемом случае оказывается допустимым, так как в начальный момент процесса  $i''$  в течение всего процесса  $U = U_1 + U_2$ .

Следует иметь в виду, что токи  $i_p, i''_c, i_a$  в схеме рис. 1 в точности соответствуют этим же токам в схеме рис. 2. Однако, условия начального заряда емкостей в этих двух схемах различны; на рис. 1.  $C_1$  имеет начальный заряд  $q_1 = \frac{U r_1}{r_1 + r_2} C_1$ , а  $C_2$  соответственно  $q_2 = \frac{U r_2}{r_1 + r_2} C_2$ , в то время как на рис. 2 начальные заряды емкостей  $q_1 = q_2 = 0$ .

Эквивалентная схема рис. 2 дает возможность значительно упростить анализ переходных процессов, возникающих в схеме рис. 1. Схема позволяет легко судить о влиянии отдельных параметров цепи на величину тока в реле. В частности, очевидно, что ток в реле зависит от величины суммарной емкости цепи, но не от соотношения между  $C_1$  и  $C_2$ . В то же время, даже при весьма надежном состоянии изоляции цепи (когда ток утечки несоизмеримо мал по сравнению с током реле) и даже неизменном суммарном сопротивлении изоляции цепи ( $r_3 = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$ ) ток в реле определяется соотношением между  $r_1$  и  $r_2$ , возрастая при увеличении  $r_1$  и падая при увеличении  $r_2$ .

Это дает основание считать, что в расчетной схеме, выясняющей возможность срабатывания

реле, следует учитывать максимально возможную емкость цепи, принимая  $k_3 \approx 1$ , что соответствует возможному в практике состоянию изоляции рассматриваемых цепей, когда  $r_2$  весьма велико по сравнению с  $r_1$ .

Схема замещения рис. 2 дает также возможность в некоторых случаях использовать общеизвестные из теории переменных токов выражения, определяющие переходные процессы в простейших цепях, содержащих  $R, L$  и  $C$ , если учесть то обстоятельство, что изменение тока  $i_a$  в функции от времени соответствует изменению напряжения, приложенного к емкости  $C$ , так как  $i_a = \frac{U}{r_3}$ .

В частности, когда током  $i_a$  можно пренебречь ( $r_1$  и  $r_2$  несоизмеримо велики по сравнению с  $r$ , что имеет место при нормальном состоянии изоляции цепи [Л. 8]), схема рис. 2 преобразуется в общеизвестную простейшую схему включения последовательно соединенных  $R, L$  и  $C$  на постоянную э. д. с.

Переходные процессы в схеме рис. 1 могут носить:

1) аperiodический характер, когда  $r > \frac{L}{r_3 C}$

$\Rightarrow \sqrt{\frac{L}{C}}$ ; при этом ток в реле

$$i_p \max = \frac{U}{r + r_3} \left[ 1 + \frac{r + r_3 - \beta \alpha}{\beta \alpha} A^{-\frac{\alpha}{\alpha - \beta}} \right]; \quad (1)$$

2) колебательный характер, когда  $r < \frac{L}{r_3 C}$

$\Rightarrow \sqrt{\frac{L}{C}}$ ; при этом ток в реле

$$i_p \max = \frac{U}{r + r_3} \left[ 1 + e^{-\frac{\phi + \varphi}{\sin \phi}} \frac{\sin \phi}{\sin \varphi} \right],$$

Таблица 2

Выражения, определяющие токи в схеме рис. 1

Независимые от времени составляющие токов в цепи

$$i'_a = i'_3 + i'_4 = \frac{k_3 U}{r + r_3}; \quad i'_3 = \frac{U}{r + r_2} + k_3 i'_a; \quad i'_4 = -\frac{U}{r_1 + r_2} + k_4 i'_a$$

Затухающие составляющие переходных токов в цепи

$$i''_c = \frac{k_3 U}{L(\alpha - \beta)} (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}); \quad i_a'' = -\frac{k_3 U}{(r + r_3)(\alpha - \beta)} (ae^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha t})$$

Полный ток в реле

$$i_p = \frac{k_3 U}{r + r_3} + \frac{k_3 U}{(r + r_3)(\alpha - \beta)L} \left[ (r + r_3 - \alpha L) e^{-\beta t} - (r + r_3 - \beta L) e^{-\alpha t} \right]$$

Коэффициенты распределения токов в цепи и другие соотношения

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4 = 1; \quad k_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}; \quad k_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}; \quad k_3 = \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \quad k_4 = \frac{r_1}{r_1 + r_2}; \quad i_a = i'_a + i''_a; \quad i'_a = i'_3 + i'_4$$

Принятые обозначения

$$\alpha = m + \sqrt{m^2 - n}; \quad m = \frac{r}{2L} + \frac{1}{2r_3 C}; \quad n = \frac{1}{LC} \frac{r + r_3}{r_3}; \quad r_3 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}; \quad \beta = m - \sqrt{m^2 - n}$$

где

$$A = \frac{\alpha(r + r_a - \beta x)}{\beta(r + r_a - \alpha L)}, \quad (2)$$

$$\psi = \text{artg} \frac{\sqrt{n - m^2}}{m}, \quad \varphi = \text{artg} \frac{2L\sqrt{n - m^2}}{r + r_a - mL}.$$

Остальные обозначения пояснены в табл. 2.

Характер рассматриваемых процессов в цепях постоянного тока 220 В иллюстрирует рис. 3 с учетом параметров реле ЭП-231.

Практически наибольшую опасность для ложного срабатывания реле представляют апериодические процессы, однако в некоторых случаях колебательные процессы также могут быть причиной ложного срабатывания реле.

Результаты экспериментальных замеров, подтверждающих возможность срабатывания некоторых реле ХЭМЗ при рассматриваемых переходных процессах, даны на рис. 4. Кривые рис. 4 устанавливают значения емкостей  $C = C_1 + C_2$ , достаточные для срабатывания реле типа ЭП-231, в зависимости от тока трогания реле и в зависимости от  $r_1$  при  $r_2 = \infty$  и постоянном токе трогания реле ( $i_{mp} = 8$  мА для реле на 220 В и  $i_{mp} = 16$  мА для реле на 110 В). Как видно из этих кривых (сплошные), при емкостях, превосходящих некоторые значения, реле могут срабатывать независимо от величины  $r_1$ .

Это приводит к заключению, что в цепях постоянного тока, если емкость превосходит некоторые значения, рассматриваемые переходные процессы могут быть причиной ложного срабатывания реле даже при вполне исправном состоянии изоляции цепи. Поэтому требования противоаварийного циркуляра НКЭС [Л. 7], задающие минимально допустимые в эксплуатации сопротивления изоляции цепи, не обеспечивают бездействия реле при рассмотренных выше замыканиях на землю в одной точке цепи.

**Резонансные явления при попадании переменного тока в цепь постоянного.** Возможность попадания [Л. 1, 3, 5] переменного тока в цепь постоянного объясняется близостью расположения их цепей, которые подходят к общим клеммным сборкам, блокшайбам, реле и т. п., и значительно разветвлены, охватывая весьма большой объем оборудования.

Ниже рассматривается случай непосредственного попадания переменного тока промышленной частоты от заземленного источника (например, трансформатора собственных нужд, трансформатора напряжения) в цепь постоянного тока или попадание его через обмотку прибора, обладающего индуктивным сопротивлением. В первом случае резонансные явления ограничиваются одиночными контурами, во втором случае они могут возникнуть в связанных контурах.

На рис. 5, а представлен один из возможных одиночных контуров, в котором индуктивность обмотки реле компенсируется емкостью относительно земли, приключенного к реле индивидуального кабеля. На рис. 5, б и с показаны схемы эквивалентных сопротивлений такого контура и векторная диаграмма возникающих в контуре

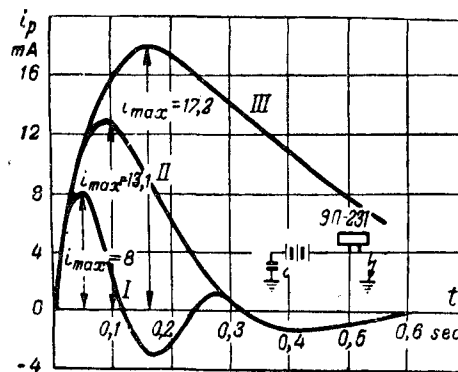


Рис. 3.

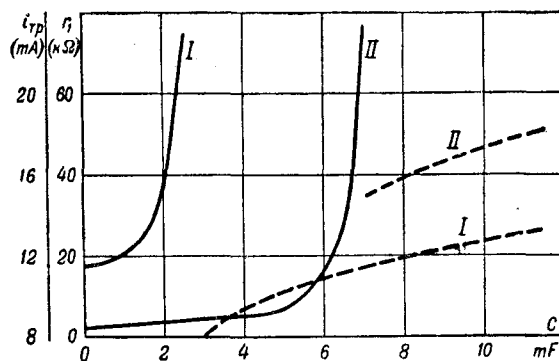


Рис. 4.

напряжений, которые благодаря явлению резонанса напряжения могут достигнуть значительных величин.

Следует иметь в виду, что переменный ток может найти себе путь и в других ветвях цепи, помимо контура, показанного на рисунке, создавая в каждой ветви одиночный контур наподобие изображенного.

На рис. 6 представлен связанный контур, где индуктивность обмотки прибора II компенсируется емкостью всей цепи и где напряжение между шинами батареи и землей может значительно превышать напряжение источника переменного тока. На рис. 6, а, б, с даны эквивалентные схемы и векторная диаграмма напряжений связанного контура.

В табл. 3 приведены выражения, определяющие максимально возможные токи и напряжения в контурах рис. 5 и 6 при условии полной компенсации реактивных напряжений. В таблице символы:

$$P = \frac{X_L}{r}; \quad P_1 = \frac{Z_0}{R_n + R_0}; \quad Z_0 = \frac{X_c R}{\sqrt{X_c^2 + R}};$$

$$R_n = \frac{r'' R_3}{r'' + R_3}; \quad q = \frac{X_c}{r}; \quad P_2 = \frac{X''_c}{r''}; \quad R_0 = \frac{X_c^2 R}{R^2 + X_c^2};$$

$Z_0$  и  $R_0$  (эквивалентные сопротивления всей цепи постоянного тока, приведенные к шинам батареи) имеют определенный физический смысл и, как известно, могут быть определены замерами с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра.

Резонансные явления в отдельных ветвях по-



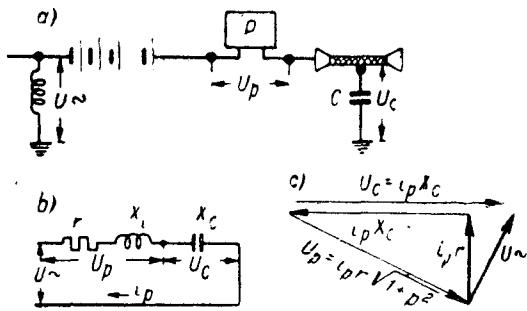


Рис. 5.

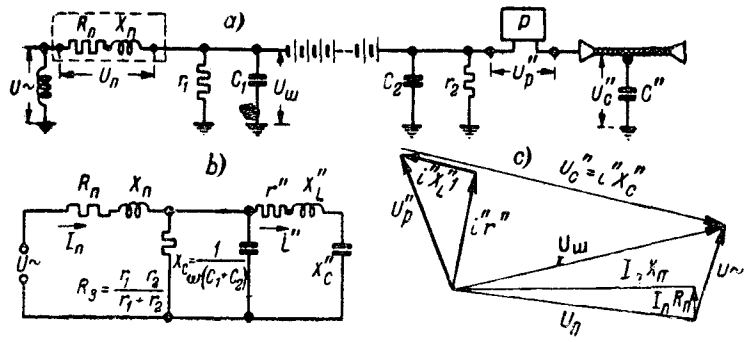


Рис. 6.

Таблица 3

Характер связи переменного тока с постоянным	В соответствии с рис. 5	В соответствии с рис. 6	
		в первичной цепи контура	во вторичной цепи контура
Наименование напряжения и токов			
Напряжение между цепью постоянного тока и землей	$U_{c \max} = U_{\sim} q$	$U_{m \max} = U_{\sim} p_1$	$U''_{c \max} = U_{\sim} p_1 p_2$
Напряжение на клеммах реле	$U_{p \max} = U_2 \sqrt{1 + p^2}$	$U_{n \max} = U_2 p_1 \frac{\sqrt{x_n^2 R_n^2}}{Z_0}$	$U''_{p \max} = U_{\sim} p_1 \sqrt{1 + p^2}$
Ток в реле	$i_{p \max} = \frac{U_{\sim}}{r}$	$I_{n \max} = \frac{I_{\sim} p_1}{Z_0}$	$i''_{\max} = \frac{U_{\sim} p_1}{r''}$

стоянного тока не представляют опасности, если удовлетворено неравенство:

$$X_L - X_C > \sqrt{\left(\frac{J}{U_{\Delta.p}}\right)^2 (X_L^2 + r^2) - r^2} \quad (3)$$

где  $U_{\Delta.p}$  — допустимое по состоянию изоляции и обеспечивающее бездействие реле напряжение на клеммах реле.

Сопоставляя данные о емкости цепи и индуктивности реле, приведенные в табл. 1, можно убедиться, что описанные резонансные явления представляют действительную опасность в цепях постоянного тока напряжением 110 и особенно 220 В. Основная опасность этих резонансных явлений заключается в возможностях: 1) ложного срабатывания реле и 2) значительного повышения напряжения, сопровождающегося повреждением изоляции цепи.

Возможность ложного срабатывания многих промежуточных реле ХЭМЗ и возникновения опасных напряжений, способных повредить изоляцию цепи, подтверждается результатами эксплуатации рассматриваемых цепей.

В частности, установлено, что в одиночном контуре, состоящем из 220-В обмотки реле типа ЭП-231 ХЭМЗ и емкости порядка 100 пФ одножильного кабеля, переменный ток промышленной частоты напряжением 220 В вызывает срабатывание реле и пробой его обмотки.

В связанных контурах напряжение между шинами батареи и землей может практически достигать нескольких тысяч вольт, а токи и напряжения в цепи вторичного контура могут много-

кратно превышать предельные напряжения и токи, возникающие в одиночных контурах<sup>2</sup>. Такие значительные напряжения между шинами батареи и землей в некоторых случаях могут представлять опасность не только для большого количества оборудования цепи, но и для жизни обслуживающего установку персонала, поскольку сопротивление пораженного человека вряд ли окажется способным нарушить резонансные явления в контуре.

**Предлагаемые мероприятия.** Описанные выше опасности, связанные с резонансными явлениями и переходными процессами при замыкании на землю, практически полностью исключаются глухим заземлением одного полюса батареи. При условии соблюдения принятого в настоящее время порядка жесткого подсоединения обмоток реле только к минусу батареи глухое заземление минуса батареи также исключает возможность ложного срабатывания реле по любой обходной цепи через землю (например, при нарушении изоляции одновременно в двух точках цепи).

Однако, учитывая некоторые недостатки глухого заземления, в частности повышения вероятности перегорания предохранителей в цепи постоянного тока, и затруднительность осуществить систематический контроль состояния изоляции заземленной цепи, мы выдвигаем это решение

<sup>2</sup> Замерами было установлено, что переменный ток напряжением 220 В, получивший связь с цепью постоянного через катушку реле типа ПН-2, на Ткварцелгрэс был причиной повышения напряжения между шинами батареи и землей, превосходящего 2000 В.

только в порядке обсуждения и предлагаем высказаться по этому вопросу.

При изолированной работе цепи постоянного тока описанные выше опасности резонансных явлений и переходных процессов могут быть устранены с помощью разрядников, предотвращающих возможность повышения напряжения между шинами батареи и землей и путем шунтирования обмоток реле омическим сопротивлением.

Алюминиевые разрядники, используемые на установках связи (типа РА-350), оказываются достаточно надежной защитой, исключающей возможность повышения напряжения между шинами батареи и землей в результате резонансных явлений, а шунтирование обмоток реле сопротивлением исключает возможность ложного срабатывания реле. Шунтирующие омические сопротивления следует устанавливать во всех случаях, когда ветви постоянного тока не удовлетворяют неравенству (3) или когда возможно ложное срабатывание реле при замыкании на землю одной точки цепи.

В первом случае шунтирующее обмотку реле сопротивление должно расстраивать опасный резонансный контур. Величина сопротивления может быть для этого случая определена, исходя из недопустимости повышения напряжения на клеммах реле до величины  $U_{д.р}$  как положительный корень уравнения:

$$Ar_m^2 + Br_m + C = 0, \quad (4)$$

где

$$A = \left( \frac{U_{д.р}^2}{U_{д.р}^2} - 1 \right) \frac{X_L^2 + r^2}{X_c} - (X_c - 2X_l); B = -2rX_c;$$

$$C = -(X_L^2 + r^2)X_c.$$

Во втором случае величина омического сопротивления должна быть выбрана, исходя из условия бездействия реле при  $r_1 = \infty$ , при допустимом в эксплуатации минимальном значе-

нии  $r_2$  [Л. 8] и максимально возможном значении емкости цепи.

В ряде случаев для многих промежуточных реле ХЭМЗ можно достигнуть бездействия реле при замыкании на землю путем повышения тока трогания реле, например, увеличивая ход якоря реле.

Следует, однако, иметь в виду, что предлагаемые шунтирования обмоток реле и повышение тока трогания в ряде случаев могут оказаться практически неприемлемыми при наличии достаточно протяженной цепи и значительного количества реле, подлежащих обработке.

**Выводы.** 1. Современные цепи оперативного (постоянного) тока на электроустановках могут содержать емкости и индуктивности, представляющие источник опасности. Это относится в первую очередь к достаточно протяженным цепям напряжением 220 и 110 В, которые содержат реле завода ХЭМЗ.

2. Изолированная относительно земли работа указанных цепей не исключает возможности ложного срабатывания реле при замыкании на землю только в одной точке цепи и опасных резонансных явлений при попадании переменного тока в цепь постоянного.

Заводам необходимо добиться сокращения индуктивности изготавливаемых ими промежуточных реле, а эксплуатирующим организациям следует принять меры, предотвращающие опасности, связанные с описанными выше явлениями в указанных цепях.

#### Литература

1. Д. Могилевкин. Эл. станции, № 13—14, 1941.
2. В. С. Кондахчан. Эл. станции, № 13—14, 1941.
3. Г. Г. Костанян. Эл. станции, № 7, 1941.
4. И. В. Лиманов. Эл. станции, № 5, 1930.
5. В. Н. Степанов и В. И. Тарасов. Эл. станции, № 8, 1931.
6. В. Н. Нелюлекин. Эл. станции, № 6, 1931.
7. НКЭС. Сборник противоаварийных циркуляров. изд. 1942.
8. ОРГРЭС. Информационное письмо № 8/216, 1944.



# Теория фазометров

Доктор техн. наук, проф. А. Д. НЕСТЕРЕНКО и инж. Е. Т. ПОЕДИНОК

Институт энергетики Академии наук УССР и Киевский политехнический институт

Фазометры всех существующих типов как для однофазной, так и для трехфазной цепи в принципе представляют собой логометр переменного тока. В приборе имеется

система из двух или трех жестко скрепленных катушек, расположенных в пространстве друг относительно друга под некоторым углом и обтекаемых переменными токами, отличающиеся друг от друга по фазе. Магнитные потоки этих катушек, взаимодействуя с переменным магнитным потоком другой системы катушек (обычно с осями, совпадающими в пространстве), создают вращающие моменты разных знаков, величина которых зависит от относительного положения подвижной системы. Если одна система катушек включена в цепь последовательно, а другая обтекается токами, пропорциональными напряжению той же цепи, то угол поворота подвижной части прибора относительно неподвижной однозначно определяется отношением реактивной мощности к активной. Прибор в данном случае может быть непосредственно отградуирован в величинах коэффициента мощности этой цепи.

Для нахождения основных соотношений для фазометра можно, как и в любом логометре, определить моменты взаимодействия каждой из подвижных катушек с неподвижной и затем рассмотреть их отношение. Можно также, исходя из того, что первая система катушек создает вращающееся в пространстве магнитное поле, а вторая — пульсирующее, рассматривать непосредственно взаимодействие этих двух видов полей. В настоящей работе применен второй метод.

Некоторые конструкции фазометров имеют магнитно разобщенные системы, у которых поле каждой подвижной катушки взаимодействует с полем независимой неподвижной катушки. Однако, наложением можно рассмотреть и этого типа свести к типу со скрещенными катушками, т. е. считать, что и в данном случае имеет место взаимодействие пульсирующего поля с вращающимся.

Принципиально не имеет значения, какая система полей, вращающаяся или пульсирующая,

Дается вывод основного соотношения между углом отклонения подвижной части фазометров и их параметрами. Рассматривается влияние изменения параметров прибора на раствор шкалы и на ее характер. В заключении приведено выражение для удельного устанавливающего момента и показывается влияние выбранных параметров на изменение этого момента вдоль шкалы.

будет включена в цепь последовательно и какая параллельно, а также, какая является подвижной и какая неподвижной. В осуществленных фазометрах встречаются все

эти случаи в различных возможных комбинациях.

Выводимые ниже зависимости относятся к случаю гомогенных магнитных полей. Это практически и имеет место в большинстве выполненных конструкций электродинамических фазометров благодаря выбору соответствующих соотношений между размерами подвижных и неподвижных катушек.

В дальнейших рассуждениях, там, где это будет иметь значение, мы будем рассматривать прибор, у которого вращающееся поле создается подвижной системой из двух катушек 1 и 2, включенных в цепь параллельно (рис. 1). Векторная диаграмма схемы для общего случая представлена на рис 2. Указанный на диаграмме сдвиг фаз  $\psi_3$  между током  $I$  и индукцией  $B$  потока последовательной цепи практически имеет место только в ферродинамических приборах. Сдвиг фаз  $\psi_1$  между напряжением сети  $U$  и индукцией  $B_1$  потока катушки 1 зависит как от схемы, так и от угла потерь в сердечнике этой цепи (последнее также только в ферродинамических приборах).

Найдем выражение для вращающегося поля, получающегося при сложении двух пульсирующих магнитных полей, создаваемых катушками

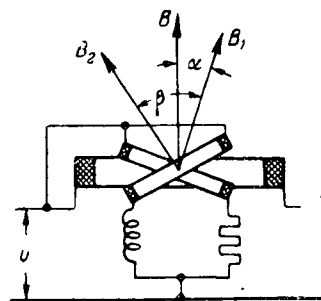


Рис. 1.

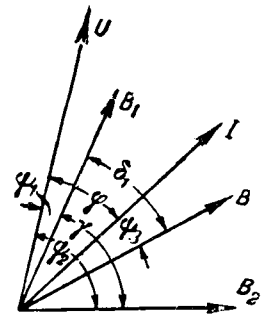


Рис. 2.

1 и 2. Эти поля определяются переменными по времени векторами индукции  $B(t)_1$  и  $B(t)_2$ , совпадающими в пространстве с осями катушек 1 и 2.

Предположим, что ось, от которой производится отсчет пространственных углов, совпадает с направлением вектора  $B(t)_1$ , тогда

$$\bar{B}(t)_0 = B(t)_1 + B(t)_2 e^{j\beta}, \quad (1)$$

где  $\bar{B}(t)_0$  — вращающийся в пространстве вектор индукции и  $\beta$  — пространственный угол между осями катушек 1 и 2.

Разложим каждое из пульсирующих полей, определяемых векторами  $B(t)_1$  и  $B(t)_2$ , на два прямо и инверсно вращающихся круговых поля, причем за начало счета времени примем момент прохождения  $B(t)_1$  через максимум:

$$\begin{aligned} \bar{B}(t)_1 &= \left(\frac{\bar{B}_{1m}}{2}\right)_{0+} + \left(\frac{\bar{B}_{1m}}{2}\right)_{0-} = \frac{B_{1m}}{2} e^{j\omega t} + \frac{B_{1m}}{2} e^{-j\omega t}, \\ \bar{B}(t)_2 &= \left(\frac{\bar{B}_{2m}}{2}\right)_{0+} + \left(\frac{\bar{B}_{2m}}{2}\right)_{0-} = \frac{B_{2m}}{2} e^{j(\omega t - \gamma)} + \frac{B_{2m}}{2} e^{-j(\omega t - \gamma)}, \end{aligned}$$

где  $\gamma$  — сдвиг фаз между  $B(t)_1$  и  $B(t)_2$ . Относительное пространственное положение этих векторов для некоторого момента представлено на рис. 3.

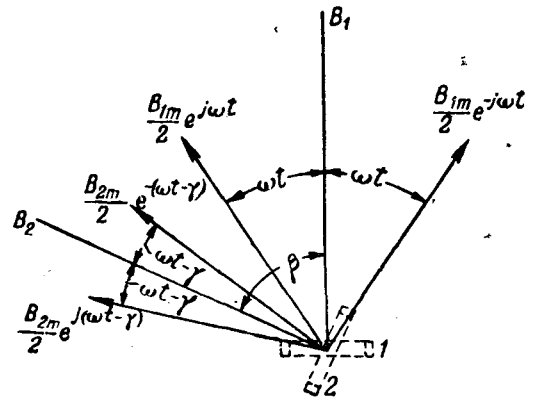


Рис. 3.

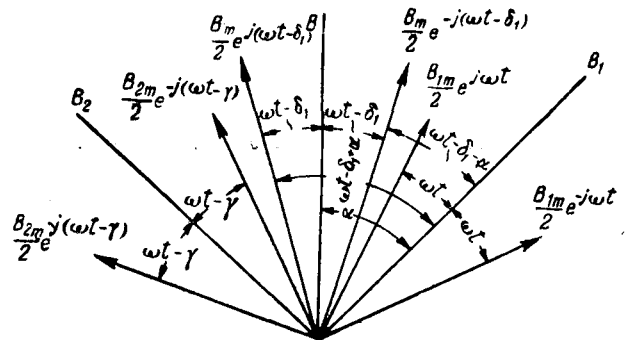


Рис. 4.

Суммарное поле

$$\begin{aligned} \bar{B}(t)_0 &= \left[ \frac{B_{1m}}{2} + \frac{B_{2m}}{2} e^{j(\beta - \gamma)} \right] e^{j\omega t} + \\ &+ \left[ \frac{B_{1m}}{2} + \frac{B_{2m}}{2} e^{j(\beta + \gamma)} \right] e^{-j\omega t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как

$$e^{\pm j\omega t} = \cos \omega t \pm j \sin \omega t,$$

то

$$\begin{aligned} \bar{B}(t)_0 &= \left\{ B_{1m} = \frac{B_{2m}}{2} \left[ e^{j(\beta - \gamma)} + e^{j(\beta + \gamma)} \right] \right\} \cos \omega t + \\ &+ \frac{B_{2m}}{2} \left[ e^{j(\beta - \gamma)} - e^{j(\beta + \gamma)} \right] j \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3)$$

Величины в скобках являются постоянными, поэтому выражение (3) может быть представлено в виде:

$$\bar{B}(t)_0 = \bar{a} \cos \omega t + j \bar{b} \sin \omega t,$$

т. е. в общем случае вращающееся поле имеет эллиптическую форму. Вращающееся поле получит круговую форму при условии равенства членов при  $\cos \omega t$  и  $\sin \omega t$  в выражении (3), т. е. при

$$\begin{aligned} B_{1m} + \frac{B_{2m}}{2} \left[ e^{j(\beta - \gamma)} + e^{j(\beta + \gamma)} \right] &= \\ = \frac{B_{2m}}{2} \left[ e^{j(\beta - \gamma)} - e^{j(\beta + \gamma)} \right] & \end{aligned}$$

или

$$B_{1m} + B_{2m} e^{j(\beta + \gamma)} = 0,$$

откуда

$$e^{j(\beta + \gamma)} = -\frac{B_{1m}}{B_{2m}}. \quad (4)$$

Последнее равенство удовлетворяется при соблюдении двух условий:

$$\cos(\beta + \gamma) = -\frac{B_{1m}}{B_{2m}} \quad (a)$$

$$\text{и } \sin(\beta + \gamma) = 0. \quad (b)$$

Из равенства (b)

$$\beta + \gamma = 180^\circ \quad (5)$$

и из равенства (a)

$$\frac{B_{1m}}{B_{2m}} = -\cos 180^\circ = 1. \quad (6)$$

Таким образом, условием получения равномерно вращающегося поля в пространстве поля постоянной величины является соблюдение обоих равенств (5) и (6).

Подставляя из (4) значения  $B_{2m}$  в (3) и принимая во внимание равенства (5) и (6), получим следующее выражение для величины вращающейся индукции кругового поля:

$$\bar{B}_0 = B_{1m} \sin \gamma e^{j(90^\circ - \gamma)} e^{j\omega t} \quad (7)$$

Таким образом, величина индукции кругового поля равна  $B_{1m} \sin \gamma$  и наибольшей величины она достигает при  $\gamma = 90^\circ$ .

Определим величину вращающегося момента, действующего на подвижную часть фазометра при произвольном относительном положении ее, когда ось поля, создаваемого током цепи I, составляет с осью катушки I пространственный угол  $\alpha_1$  (рис. 4). Сдвиг фаз между  $B$  и  $B_1$  обозначим через  $\delta_1$ .

Разложим пульсирующее поле, изображаемое вектором  $\bar{B}(t) = \bar{B}_m \cos(\omega t - \delta_1)$ , на два вращающихся поля — прямое и инверсное:

$$\bar{B}(t) = \left(\frac{\bar{B}_m}{2}\right)_{0+} + \left(\frac{\bar{B}_m}{2}\right)_{0-} = \frac{B_m}{2} e^{j(\omega t - \delta_1 + \alpha_1)} + \frac{B_m}{2} e^{-j(\omega t - \delta_1 - \alpha_1)} \quad (8)$$

Мгновенное значение момента взаимодействия полей, представляемых индукциями  $B(t)_0$  и  $B(t)$ ,

$$M' = cB(t) \cdot B(t)_0 \sin[\bar{B}(t), \bar{B}(t)_0], \quad (9)$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности, который может быть принят постоянной величиной.

Средняя величина этого взаимодействия

$$M_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T M' dt. \quad (10)$$

После подстановки соответствующих значений  $B(t)$  и  $B(t)_0$  и интегрирования в пределах от 0 до  $T$  получим:

$$\begin{aligned} M_{cp} = c & \left[ \frac{B_{1m}}{2} \frac{B_m}{2} \sin(\delta_1 - \alpha_1) + \frac{B_{2m}}{2} \frac{B_m}{2} \sin(\beta - \right. \\ & \left. - \gamma + \delta_1 - \alpha_1) - \frac{B_{1m}}{2} \frac{B_m}{2} \sin(\delta_1 + \alpha_1) + \right. \\ & \left. + \frac{B_{2m}}{2} \frac{B_m}{2} \sin(\beta + \gamma - \delta_1 - \alpha_1) \right] = \\ & = -c \frac{B_{1m}}{2} \frac{B_m}{2} \sin \alpha_1 \cos \delta_1 + \\ & + c \frac{B_{2m}}{2} \frac{B_m}{2} \sin(\beta - \alpha_1) \cos(\delta_1 - \gamma). \quad (11) \end{aligned}$$

Для случая кругового поля, когда  $B_{1m} = B_{2m}$  и  $\beta + \gamma = 180^\circ$ , выражение (11) примет вид:

$$M_{cp} = c \frac{B_{1m} B_m}{2} \sin \gamma \cos(\alpha - \delta_1 + \gamma). \quad (12)$$

Приравняв нулю выражение вращающегося момента (11), получим после соответствующих преобразований величину отклонения для положения равновесия системы при эллиптическом поле:

$$\alpha'_p = \text{arccctg} \left( \frac{B_{1m}}{B_{2m}} \cdot \frac{\cos \delta_1}{\cos(\delta_1 - \gamma) \sin \beta} + \text{ctg} \beta \right), \quad (13)$$

$$\alpha''_p = \alpha'_p \pm 180^\circ. \quad (13a)$$

Для кругового поля величину  $\alpha_p$  определим, приравняв нулю выражение (12):

$$\alpha'_p = 90^\circ + \delta_1 - \gamma, \quad (14)$$

$$\alpha''_p = \alpha'_p \pm 180^\circ. \quad (14a)$$

Значения  $\alpha'_p$  равенств (13) и (14) соответствуют устойчивому равновесию, а  $\alpha''_p$  — неустойчивому.

Подставляя значение  $\delta_1$  из диаграммы рис. 2, получим для эллиптического поля:

$$\alpha_p = \text{arccctg} \left[ \frac{B_{1m}}{B_{2m}} \cdot \frac{\cos(\varphi - \psi)}{(\cos \varphi - \psi - \gamma) \sin \beta} + \text{ctg} \beta \right] \quad (15)$$

и для кругового поля:

$$\alpha_p = 90^\circ + \gamma - \psi - \gamma. \quad (16)$$

Из выражения (15) следует, что в общем случае при эллиптической форме вращающегося поля связь между сдвигом фаз в сети  $\varphi$  и положением равновесия подвижной системы (определяемым углом  $\alpha_p$ ) нелинейна. При круговом поле эта зависимость имеет линейный характер, т. е. градуировка фазометра, выраженная в электрических градусах, совпадает с разметкой шкалы в геометрических градусах.

Подставляя значение  $\alpha_p$  в выражение вращающегося момента, получим зависимость вращающегося момента от угла отклонения системы от положения равновесия.

Для частного случая кругового поля, полагая попрежнему  $\alpha_1 = \alpha_p + \alpha$ , получим:

$$M_{cp} = c \frac{B_{1m} B_m}{2} \sin \gamma \cos(\alpha + \alpha_p - \delta + \gamma)$$

или, так как  $\alpha_p = 90^\circ + \delta_1 - \gamma$ , то

$$M_{cp} = -c \frac{B_{1m} B_m}{2} \sin \gamma \sin \alpha, \quad (17)$$

т. е. величина момента, стремящегося возвратить подвижную часть фазометра в положение равновесия, так называемый „устанавливающий момент“, при круговой форме поля пропорциональна синусу угла отклонения от положения равновесия и во всех точках шкалы одинакова.

Выражения (15)–(17) являются общими для всех фазометров, основанных на взаимодействии вращающегося поля с пульсирующим. В случае сложных схем или в трехфазных фазометрах, когда для получения вращающегося поля используются фазные сдвиги между токами или напряжениями трехфазной цепи, также остаются в силе все выведенные выше соотношения. Необходимо в каждом случае только определить значения  $\psi$  и  $\gamma$  для данной схемы и подставить в выражения (15)–(17).

Из равенства (16) явствует, что при круговой форме поля характер шкалы всегда будет одним и тем же, и при заданном геометрическом угле раствора шкалы диапазон измерения электрического угла равен этому геометрическому углу. Так, при шкале  $90^\circ$  диапазон измерений может быть только в пределах  $90$  электрических градусов. Например, возможны только такие пределы измерения:

либо от индуктивной  $1,0$  ( $\cos 0$ ) до индуктивной  $0,0$  ( $\cos 90^\circ$ );  
либо от емкостной  $0,9$  ( $\cos -25^\circ$ ) до индуктивной  $0,4$  ( $\cos 66^\circ$ );  
либо от емкостной  $0,8$  ( $\cos -37^\circ$ ) до индуктивной  $0,5$  ( $\cos 60^\circ$ ).

Получение других диапазонов может быть достигнуто только изменением угла раствора шкалы, либо изменением формы вращающегося поля. Изменение пределов измерения при круговом поле достигается простым смещением стрелки относительно подвижной части прибора.

Применение систем с эллиптическим вращающимся полем дает более широкие возможности в смысле вида шкалы и зависимости между пределами измерения и углом раствора шкалы. Представления об этих возможностях дают на рис. 5 растворы в геометрических градусах шкал для предела измерения от  $\cos \varphi = 1$  (крайние точки прямых слева) до  $\cos \varphi = 0$  для различных значений  $\beta$  ( $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  и  $150^\circ$ ),  $\gamma$  ( $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  и  $90^\circ$ ), трех значений угла  $\psi$  ( $+30^\circ, 0^\circ$  и

—30°) и при постоянном значении отношения  $\frac{B_{1m}}{B_{2m}} = 1$ . Цифры, стоящие у левых концов прямых, указывают величину раствора в геометрических градусах.

График позволяет определить, как может быть получен тот или иной предел измерения при заданном растворе шкалы при помощи изменения параметров  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\psi$ . Получение одинаковых растворов возможно при различных соотношениях между основными параметрами цепей, однако, как мы увидим ниже, изменение этих соотношений влияет на величину удельного устанавливающего момента прибора, поэтому выбор этих величин должен быть произведен с учетом получения требуемого удельного устанавливающего момента.

Изменение соотношений между основными параметрами прибора влияет также и на характер шкалы. На рис. 6 приведено распределение делений вдоль шкалы для случая кругового поля и ряда других, когда форма поля эллиптическая (для возможности суждения об изменении распределения линейная длина шкал для всех случаев принята одинаковой).

Характерным является влияние угла  $\psi$ . При круговой форме поля, как это вытекает из выражения (17), изменение  $\psi$  не искажает вида шкалы, а лишь смещает ее. При эллиптической форме поля этот угол оказывает значительное влияние на вид шкалы.

Перейдем теперь к определению удельного устанавливающего момента. Величина удельного устанавливающего момента должна быть больше момента трения и противодействия «безмоментных подводков» настолько, чтобы вариации, вызываемые этими факторами, не превосходили максимально допустимых величин.

Величина удельного устанавливающего момента, в данном случае величина момента, соответствующая отклонению системы на 1°

$$M_{y\delta} = \frac{1}{57,3} \frac{dM_{cp}}{d\alpha}$$

если  $M_{y\delta}$  определять на 1 геометрический градус шкалы, или

$$M''_{y\delta} = \frac{1}{57,3} \frac{dM_{cp}}{d\varphi}$$

если  $M_{y\delta}$  определять на 1 электрический градус шкалы.

Для случая эллиптического поля найдем из (11):

$$M'_{y\delta} = \frac{c}{57,3} \left[ -\frac{B_{1m}B_m}{2} \cos \alpha_1 \cos \delta_1 + \frac{B_{2m}B_m}{2} \cos (\beta - \alpha_1) \cos (\delta_1 - \gamma) \right]. \quad (18)$$

После соответствующих преобразований для замены  $\delta_1$  через  $\alpha_p$ :

$$M'_{y\delta} = \frac{c}{57,3} \frac{B_{1m}B_m \sin \beta}{2 \sin (\beta - \alpha_p) \sqrt{1 + \left[ \frac{B_{1m}}{B_{2m}} \frac{\sin \alpha_p}{\sin (\beta - \alpha_p)} \sin \gamma - \text{ctg } \alpha \right]^2}}. \quad (19)$$

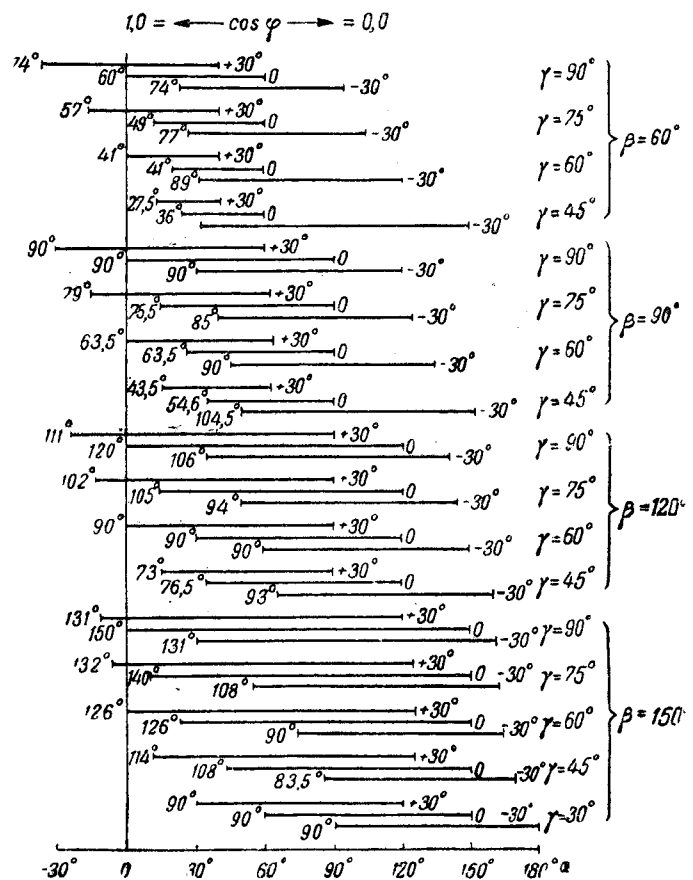


Рис. 5.

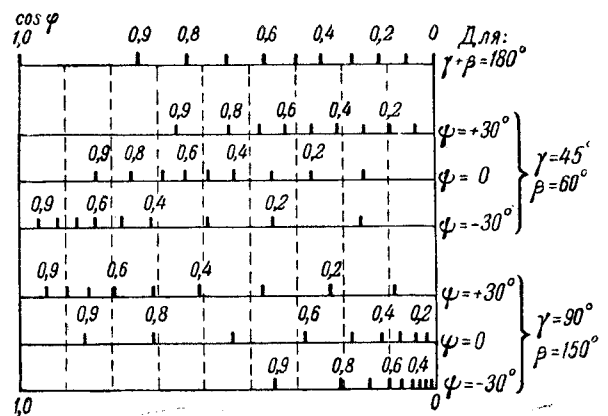


Рис. 6.

Произведя преобразования для замены  $\alpha_p$  через  $\delta_1$  в выражении

$$M''_{y\delta} = \frac{c}{57,3} \left[ \frac{B_{1m}B_m}{2} \sin \alpha_p \sin \delta_1 - \frac{B_{1m}B_m}{2} \sin (\beta - \alpha_p) \sin (\delta_1 - \gamma) \right],$$

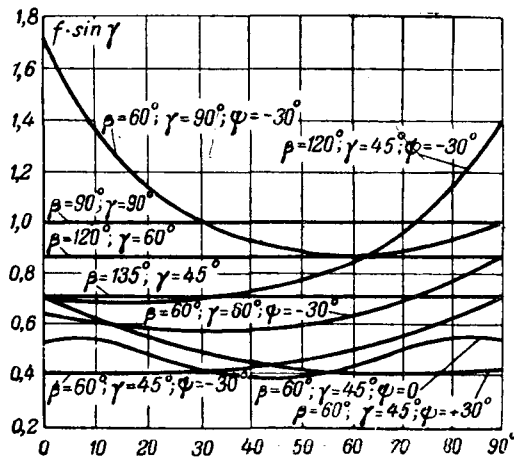


Рис. 7.

получим:

$$M''_{уд} = \frac{c}{57,3} \frac{B_{1m} B_m}{2} \sin \gamma \frac{1}{\cos(\varphi - \psi - \gamma) \sqrt{1 + \left[ \frac{B_{1m}}{B_{2m}} \frac{\cos \gamma}{\cos(\varphi - \psi - \gamma) \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta \right]^2}} \quad (20)$$

Для случая кругового поля величина удельного устанавливающего момента может быть получена непосредственно из выражения (18), полагая  $\alpha=1^\circ$ , т. е.

$$\begin{aligned} M'_{уд} &= -0,5 c B_{1m} B_m \sin \gamma \sin 1^\circ = \\ &= -0,0087 c B_{1m} B_m \sin \gamma, \end{aligned} \quad (21)$$

$$M''_{уд} = -M'_{уд} \text{ (так как } \alpha=\varphi\text{)}.$$

Из выражений (19), (20) и (21) явствует, что удельный устанавливающий момент сохра-

няет постоянную величину независимо от положения подвижной системы, а следовательно, и от величины измеряемого сдвига фаз лишь в случае кругового поля; при эллиптической форме вращающегося поля величина этого момента в разных точках шкалы различна.

Величина  $M_{уд}$  при круговом поле максимального значения достигает при  $\gamma=90^\circ$ . Так как значение синуса при значениях аргумента, близких к  $90^\circ$ , изменяется незначительно, то практически можно считать изменение  $\gamma$  в пределах  $60^\circ-90^\circ$  ( $\sin \gamma = 0,867-1,0$ ) мало влияющим на изменение  $M_{уд}$ . Величина удельного устанавливающего момента в случае эллиптической формы вращающегося поля, как нетрудно увидеть из сравнения (20) с (21), может быть выражена через  $M_{уд}$  кругового поля, умноженного на переменный коэффициент  $f$ , являющийся функцией



## Об одном обобщении формулы Хевисайда

Доктор техн. наук, проф. В. Ю. ЛОМОНОСОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Хорошо известная формула Хевисайда

$$i = U_0 \left\{ \frac{1}{Z(0)} + \sum_1^n \frac{e^{p_k t}}{p_k Z'(p_k)} \right\} \quad (1)$$

позволяет определить токи и напряжения при включении цепи на постоянное напряжение  $U_0$ . Существуют модификации этой формулы, дающие решение той же задачи при синусоидальном и экспоненциальном напряжениях. Нетрудно показать, что формула (1) может быть обобщена на случай напряжения вполне произвольной формы.

Решение этой задачи содержится в неявной форме в интегральной теореме Дюамеля. Если включение цепи на постоянное напряжение  $U_0$  вызвало в какой-либо ее ветви ток

$$i = U_0 g(t), \quad (2)$$

то при включении на напряжение

$$u(t) = U_0 + u_1(t) \quad (3)$$

в той же ветви возникнет ток

$$i = U_0 g(t) + \int_0^t \frac{du_1(\tau)}{d\tau} g(t-\tau) d\tau. \quad (4)$$

Разложение напряжения на два слагаемых в формуле (3) сделано с таким расчетом, чтобы иметь  $u(0) = U_0$  и, следовательно,  $u_1(0) = 0$ .

Совершенно естественно положить в формуле (4)

$$g(t) = \frac{1}{Z(0)} + \sum_1^n \frac{e^{p_k t}}{p_k Z'(p_k)}, \quad (5)$$

откуда получается:

$$i = U_0 \left\{ \frac{1}{Z(0)} + \sum_1^n \frac{e^{p_k t}}{p_k Z'(p_k)} \right\} + \frac{1}{Z(0)} \int_0^t \frac{du_1(\tau)}{d\tau} d\tau + \sum_1^n \frac{e^{p_k t}}{p_k Z'(p_k)} \int_0^t \frac{du_1(\tau)}{d\tau} e^{-p_k \tau} d\tau. \quad (6)$$

Первый из интегралов вычисляется непосредственно

$$\int_0^t \frac{du_1(\tau)}{d\tau} d\tau = u_1(t), \quad (7)$$

а второй может быть удобно взят по частям

$$\int_0^t \frac{du_1(\tau)}{d\tau} e^{-p_k \tau} d\tau = \int_{\tau=0}^t e^{-p_k \tau} du_1 = u_1(t) e^{-p_k t} + p_k \int_0^t u_1(\tau) e^{-p_k \tau} d\tau, \quad (8)$$

после чего формула (6) переписывается в связи с (3) в виде

$$i = u(t) \left\{ \frac{1}{Z(0)} + \sum_1^n \frac{1}{p_k Z'(p_k)} \right\} + \sum_1^n \frac{e^{p_k t}}{Z'(p_k)} \int_0^t u(\tau) e^{-p_k \tau} d\tau. \quad (9)$$

Остается вычислить выражение в фигурных скобках. Как показывает формула (5) оно является не чем иным, как начальной производимостью цепи. Обозначив ее через  $g(0)$ , запишем окончательно

$$i = u(t) g(0) + \sum_1^n \frac{e^{p_k t}}{Z'(p_k)} \int_0^t u(\tau) e^{-p_k \tau} d\tau. \quad (10)$$

Из хода доказательства следует, что функция  $u(t)$  предполагается непрерывной за исключением, быть может, точки  $t=0$ . Прочие ограничительные условия (отсутствие равных корней, нулевые начальные условия) те же, что и для формулы (1).





## Электрическая модель балки, лежащей на упругом основании

Кандидат техн. наук А. Л. ГОФЛИН

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

В лаборатории электрического моделирования Энергетического института Академии наук СССР, на основе методов электрического моделирования физических явлений, развитых Л. И. Гутенмахером [Л. 1], было выполнено электрическое устройство для расчета балок, лежащих на упругом основании. Расчет таких балок сводится к решению системы уравнений

$$EJ(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = M; \frac{d^2 M}{dx^2} = F(x) - K(x)y \quad (1)$$

или, если исключить переменную  $M$ , к решению уравнения

$$E \frac{d^2}{dx^2} \left[ J(x) \frac{d^2 y}{dx^2} \right] = F(x) - K(x)y \quad (2)$$

[ $E$ —модуль упругости,  $J(x)$ —момент инерции,  $M$ —изгибающий момент,  $F(x)$ —распределенная по длине балки нагрузка,  $K(x)$ —коэффициент оседания,  $y$ —прогиб] при заданных граничных условиях. В зависимости от способа закрепления концов балки граничные условия:

для опертого конца  $y=0$  и  $\frac{d^2 y}{dx^2}=0$ ;

для заделанного конца  $y=0$  и  $\frac{dy}{dx}=0$ ;

для свободного конца  $\frac{d^2 y}{dx^2}=0$  и  $\frac{d^3 y}{dx^3}=0$ .

Решение этой важной задачи строительной механики подробно рассмотрено А. Н. Крыловым [Л. 2]. Однако, для решения необходимы громоздкие вычисления.

Принцип действия выполненного устройства заключается в следующем. Из сосредоточенных сопротивлений, емкостей и индуктивностей собирается электрическая схема. Различными комбинациями включения  $R$ ,  $L$  и  $C$  отвечают разные уравнения, описывающие распределение напряжений (или токов) по участкам такой сложной цепи. Если какая-либо схема позволит получить уравнение, аналогичное предложенному, то она может быть принята в качестве модели — аналогии явления, описанного предложенным уравнением. Значения токов или напряжений поддаются измерениям с большой точностью. Основываясь на теории подобия, результаты измерений в схеме можно пересчитать, определив искомые величины предложенного уравнения.

Исследование автора [Л. 3] показало, что требуемое выражение можно получить, если воспользоваться реактивными проводимостями — емкостями и индуктивностями. Однако, устройство получается сложным в выполнении и в эксплуатации из-за необходимости борьбы с погрешностью, вызываемой активными составляющими

проводимостей. Поэтому в выполненном устройстве применены активные проводимости, питаемые источниками, интенсивность которых зависит от значений функции. Такими источниками служат электронные усилители.

Две цепочки из проводимостей  $A$  в узловых точках соединены поперечными проводимостями  $B(x)$ . К узлам нижней цепочки присоединены проводимости  $C(x)$ , вторые концы которых включены к источникам. На рис. 1 показан участок такой „двухэтажной“ цепочки с усилителями. Напряжения  $V-U$ , появляющиеся в узлах этой цепочки, подаются на входные клеммы усилителей. На выходе получают напряжения  $K(V-U)$ , складывающиеся с напряжениями  $V_0(x)$ , питающими цепочку. Если коэффициенты усиления для всех узловых точек заданы по соотношению

$$K=1 + \frac{2B(x)}{C(x)}, \quad (3)$$

то распределение напряжений  $U$  по узловым точкам выразится приближенно уравнением, аналогичным предложенному (2)

$$A^2 \frac{d^2}{dx^2} \left[ \frac{1}{B(x)} \frac{d^2 U}{dx^2} \right] = C(x)U_0 - C(x)U. \quad (4)$$

Для выполненного устройства были использованы проводимости в виде круглых реостатов радиостипа, позволявших изменять сопротивления отдельных участков от 0 до 200  $\Omega$ . Цепочки составлялись из десяти таких реостатов. Девять усилителей, включенных в цепочку, были собраны по схеме рис. 2. Предварительное усиление осуществлялось лампой 6-N-7; правая половина ее служила для инверсии напряжений. Дополнительная обмотка выходного трансформатора использовалась для негативной обратной связи, примененной для уменьшения искажений. Различные напряжения питающих цепочку истоков подводились от делителя, выполненного в виде автотрансформатора. Двести выводов автотрансформатора были выполнены через равные числа

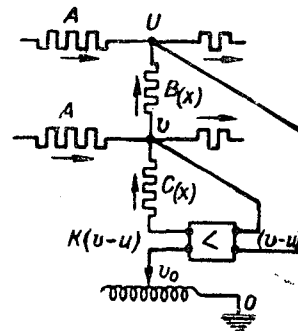


Рис. 1.

витков его обмотки и присоединены к гнездам, запрессованным в гетинаксовую панель. Подводка напряжений от делителя к цепочке осуществлялась гибкими шнурами с наконечниками. Делитель включался в сеть переменного тока 120 В через потенциометр, с помощью которого выбиралась желаемая величина напряжений.

Измерения производились компенсационным методом, благодаря чему не вносилось искажений в распределение токов по цепочке. Измеренные величины выражались тремя знаками, отсчитывавшимися по шкалам измерительного потенциометра. Модель и измерительный орган питались от одной и той же сети переменного тока, благодаря чему результаты измерений (в относительных единицах) не зависели от колебаний напряжения сети. Нулевым индикатором служил чувствительный магнито-электрический гальванометр, включенный последовательно с вибрационным выпрямителем.

Проводимости  $A$ ,  $B$  и  $C$  задавались величинами одинакового порядка (100—150  $\Omega$ ). При этом напряжения  $U$  и  $V$  в узлах цепочки выражаются величинами того же порядка, что и питающие напряжения  $U_0$ . Это значительно облегчает измерения и повышает их точность.

Параметры задачи не ограничивают абсолютные значения напряжений  $U_0$ , питающих цепочку. Поэтому их легко подобрать так, чтобы во всем диапазоне напряжений  $V-U$ , подаваемых на вход усилителей, работа последних происходила на линейном участке характеристиками.

Коэффициенты усиления устанавливались из (3) помощью высокоомных потенциометров (50  $k\Omega$ ) на входе усилителей. При указанном выборе проводимостей цепочек они выражаются небольшими числами ( $1 < K < 10$ ). Граничные условия задавались определенной величиной напряжений на концах цепочек. Эти напряжения подводились от того же делителя, который служил для задания истоков. Решение задачи на таком устройстве занимало несколько минут. Измеренные значения искоемых величин незначительно отличались от вычисленных.

При работе описанного устройства напряжения  $V-U$ , получаемые в узлах цепочек, увеличиваются усилителями в  $K$  раз и прибавляются к напряжениям истоков  $U_0$ . Этот процесс был воспроизведен без усилителей, вручную. Измеренные значения  $V-U$  умножались на  $K$ . После измерения напряжения  $U_0$  увеличивались на произведения  $KV-U$ . Затем снова производились измерения и менялись истоки.

Опыт показал, что значения  $U$  и  $V$ , получаемые в результате такого процесса, быстро приближаются к величинам, полученным расчетом. Уже после 9-го или 10-го изменения величины

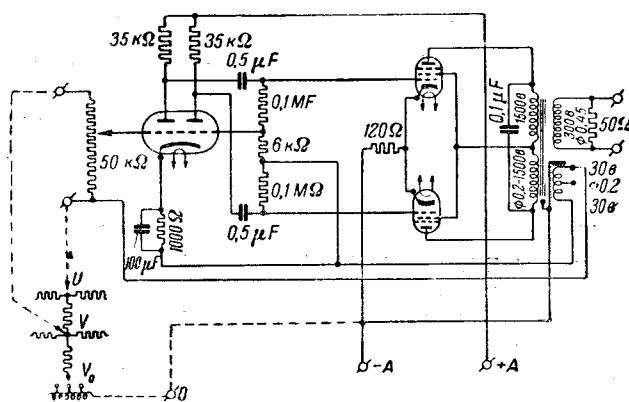


Рис. 2.

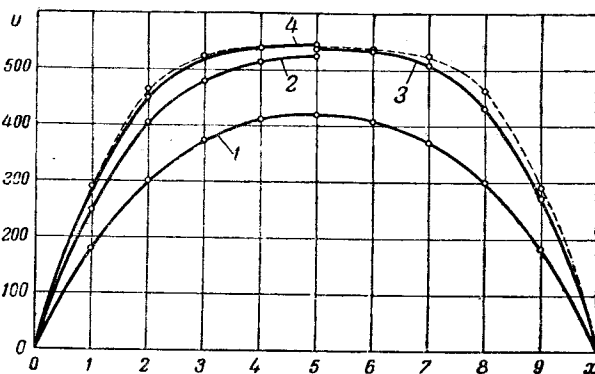


Рис. 3.

истоков значения функции столь мало отличаются от доставленных предыдущим измерением, что измерительный орган их не отмечает, и процесс можно считать закончившимся. Более того, 3-е или 4-е измерение уже дает необходимые значения с достаточной для практических целей точностью. На рис. 3 показаны кривые, полученные в результате первых 4 измерений, обозначенные соответствующими цифрами, и для сравнения пунктиром показана рассчитанная кривая. Время, потребовавшееся для получения решения этим методом, составляло 20—30 min. Весь процесс работы очень прост. Случайная ошибка при задании новых значений истоков не отразится на результатах, а лишь несколько удлинит процесс измерений.

Литература

1. А. И. Крылов. О расчете балок, лежащих на упругом основании. Изд. АН СССР, 1930.
2. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование (электронинтегратор). Изд. АН СССР, 1943.
3. А. Л. Гофлин. Электрическое моделирование изгиба балки, лежащей на упругом основании. Диссертация, ЭНИН АН СССР, 1945.



# Подсчет мощности, выделяющейся при индукционном нагреве в плите и полуме цилиндре

Кандидат техн. наук Д. В. ГОЛУБЕВ

Москва

**Нагрев плиты.** Нагреваемая плита помещается внутри питаемого переменным током соленоида (индуктора), имеющего  $\omega$  витков, которые равномерно распределены по длине плиты  $l$ . Если пренебречь изменением поля в направлении оси индуктора и искривлением электрических силовых линий у краев плиты, то распределение полей в плите характеризуется формулами [Л. 3]

$$\left. \begin{aligned} \dot{H} &= H_a \frac{\operatorname{ch} px}{\operatorname{ch} pa}, \\ \dot{E} &= \frac{(1-j)k}{\gamma} \cdot \frac{\operatorname{sh} px}{\operatorname{ch} pa}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $p = (1+j) \sqrt{\frac{\omega \gamma \mu}{2}} = (1+j)k$ ;  $H_a = \frac{\omega I}{l}$  — напряженность магнитного поля на поверхности пластины;  $\omega$  — угловая частота;  $\gamma$  и  $\mu$  — удельная проводимость и магнитная проницаемость плиты. Вектор Пойнтинга в комплексной форме на поверхности плиты, при  $x = \pm a$  (рис. 1), имеет следующее значение:

$$\dot{S}_a = \dot{E}_a \dot{H}_a^* = \frac{-(1+j)k}{\gamma} H_a^2 \frac{\operatorname{sh}(1+j)ka}{\operatorname{ch}(1+j)ka} \quad (2)$$

Комплексное выражение мощности, выделяющейся в плите,

$$P_a + jP_r = -S_a' 2hl. \quad (3)$$

Подставив значение  $S_a$  в (3), отделив вещественную часть от мнимой и разделив  $P_a$  и  $P_r$  на квадрат тока индуктора, получим выражения для активного и реактивного сопротивлений плиты, приведенных в цепи индуктора:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{2\omega^2 hk}{\gamma l} \cdot \frac{(\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka)}{(\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka)}, \\ x &= \frac{2\omega^2 hk}{\gamma l} \cdot \frac{(\operatorname{sh} 2ka + \sin 2ka)}{(\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka)}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При заданных геометрических размерах плиты  $l$ ,  $h$ ,  $2a$  и при выбранном числе витков индуктора  $\omega$ , подсчет  $r$  и  $x$  затруднен только выбором значения магнитной проницаемости  $\mu_r = \mu_0 \mu_r$ .

Дело в том, что относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$ , зависящая от напряженности магнитного поля, строго говоря, изменяется и во времени и в пространстве [в то время, как при выводе формул (4) она была принята постоянной].

Однако, по данным автора [Л. 4] вполне удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента получается в том случае, если значение  $\mu_r$  находить из кривой намагничивания по эффективному значению напряженности магнитного поля на поверхности плиты ( $H_a = \frac{\omega I}{l}$ ). При температуре  $t \geq 780^\circ\text{C}$ ,  $\mu_r = 1$ .

Зная  $r$  и  $x$ , соответствующие определенному значению тока в индукторе, легко вычислить активную и реактивную мощности, подведенные к плите, по формулам  $P_a = I^2 r$  и  $P_r = I^2 x$ , а также  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}$ .

На рис. 1 показано изменение  $\frac{r}{r_0}$ ,  $\frac{x}{r_0}$  и  $\cos \varphi$  в функции от  $2ka$ , причем  $r_0 = \frac{2\omega^2 h}{l}$ .

Видно, что при  $2ka \leq 1$  приведенное активное сопротивление плиты в несколько раз меньше ее реактивного сопротивления и коэффициент мощности весьма мал ( $< 0,15$ ).

Произведение  $2ka$  может иметь такие значения при индукционном нагреве плиты токами низкой частоты (50 Hz) до температуры выше точки Кюри. При наличии генератора высокой частоты выбор частоты целесообразно произвести таким образом, чтобы значение  $2ka$  было больше 3, когда  $\cos \varphi$  приобретает свое предельное значение 0,707. Так, например, при нагреве плиты, для которой  $2a = 8,5 \text{ cm}$ ;  $\gamma = 6,8 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (температура  $\geq 780^\circ\text{C}$ );  $\mu_r = 1$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\text{H}}{\text{cm}}$ .

Из условия  $2ka > 3$  найдем, что частота, необходимая для получения  $\cos \varphi$ , близкого к 0,707, должна быть  $f \geq 465 \text{ Hz}$ .

**Нагрев поломе цилиндра.** а) Нагрев индуктором без железного сердечника. Внутри цилиндра напряженность магнитного поля создается совместным действием ампервитков индуктора и наведенных в цилиндре токов, а в зазоре между индуктором и цилиндром — только ампервитками индуктора. Если толщина стенки цилиндра  $a$  значительно меньше радиуса цилиндра, то кривизной линий тока и изменением радиуса в пределах стенки цилиндра можно пренебречь, а отдельные участки цилиндра рассматривать как часть бесконечно протяженной пластины.

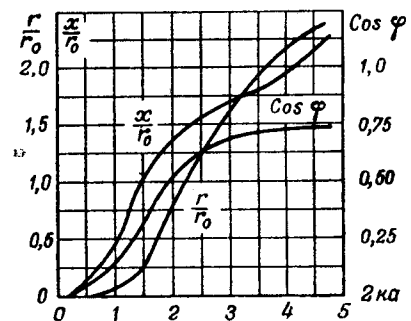


Рис. 1.

Тогда для электрического и магнитного полей остаются в силе прежние дифференциальные уравнения. Их решение имеет вид:

$$\dot{H} = A_1 e^{px} + A_2 e^{-px}, \quad (5)$$

$$\dot{E} = -\frac{p}{\gamma} (A_1 e^{px} - A_2 e^{-px}), \quad (6)$$

где

$$p = \sqrt{j\omega\gamma\mu} = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\gamma\mu}{2}} = (1+j)k.$$

Для определения постоянных интегрирования  $A_1$  и  $A_2$ , учитывая сделанные выше замечания, можем написать: при  $x=0$   $\dot{H} = \frac{\omega\dot{I}_1 + \dot{I}_2}{l}$ ; при  $x=a$   $\dot{H} = \frac{\omega\dot{I}_1}{l}$ , откуда по уравнению (5) будем иметь:

$$A_1 + A_2 = \frac{\omega\dot{I}_1 + \dot{I}_2}{l} \dots, \quad (7)$$

$$A_1 e^{pa} + A_2 e^{-pa} = \frac{\omega\dot{I}_1}{l}. \quad (8)$$

Здесь  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  обозначены токи в индукторе и цилиндре. Чтобы исключить  $\dot{I}_2$ , составим еще одно уравнение, применяя закон электромагнитной индукции к контуру, расположенному на внутренней поверхности нагреваемого цилиндра (при  $x=0$ ). Имеем:

$$2\pi R \dot{E}_{x=0} = -j\omega\pi R^2 \dot{H}_{x=0} \cdot \mu_0. \quad (9)$$

Подставляя сюда вместо  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  их значения при  $x=0$ , после преобразования будем иметь:

$$A_1 - A_2 = -\frac{\omega\dot{I}_1 + \dot{I}_2}{l}. \quad (10)$$

Решая совместно (7), (8) и (10), окончательно получим:

$$\dot{H} = \frac{\omega\dot{I}_1}{l} \frac{\operatorname{ch} px + \frac{Rp}{2\mu_r} \operatorname{sh} px}{\operatorname{ch} pa + \frac{Rp}{2\mu_r} \operatorname{sh} pa}, \quad (5a)$$

$$\dot{E} = \frac{\omega\dot{I}_1 p}{\gamma l} \frac{\operatorname{sh} px + \frac{Rp}{2\mu_r} \operatorname{ch} px}{\operatorname{ch} pa + \frac{Rp}{2\mu_r} \operatorname{sh} pa}. \quad (6a)$$

Комплексное выражение мощности, поступающей в цилиндр, найдем, подсчитав поток вектора Пойнтинга через наружную поверхность цилиндра:

$$P_a + jP_r = 2\pi R l H_{(x=a)}^* \cdot \dot{E}_{(x=a)} = \frac{2\pi R \omega^2 I_1^2 p}{\gamma l} \frac{\operatorname{sh} pa + \frac{Rp}{2\mu_r} \operatorname{ch} pa}{\operatorname{ch} pa + \frac{Rp}{2\mu_r} \operatorname{sh} pa}. \quad (11)$$

Отделяя в (11) вещественную часть от мнимой, получим:

$$P_a = \frac{2\pi R \omega^2 I_1^2 k}{\gamma l} \cdot \frac{[\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka + \frac{Rk}{\mu_r} (\operatorname{ch} 2ka - \cos 2ka) + \frac{R^2 k^2}{2\mu_r^2} (\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka)]}{[\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka + \frac{Rk}{\mu_r} (\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka) + \frac{R^2 k^2}{2\mu_r^2} (\operatorname{ch} 2ka - \cos 2ka)]}, \quad (12)$$

$$P_r = \frac{2\pi R \omega^2 I_1^2 k}{\gamma l} \cdot \frac{[\operatorname{sh} 2ka + \sin 2ka + \frac{Rk}{\mu_r} (\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka) + \frac{R^2 k^2}{2\mu_r^2} (\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka)]}{[\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka + \frac{Rk}{\mu_r} (\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka) + \frac{R^2 k^2}{2\mu_r^2} (\operatorname{ch} 2ka - \cos 2ka)]}. \quad (13)$$

Активное и реактивное сопротивления цилиндра, приведенные к цепи индуктора, можно получить из формул:

$$r = \frac{P_a}{I_1^2} \quad \text{и} \quad x = \frac{P_r}{I_1^2}.$$

Порядок вычисления остается тот же, что и в задаче о нагреве плиты, т. е. сначала находим по кривой намагничивания значения  $\mu_r$ , соответствующие определенному току в индукторе, затем вычисляем  $r$  и  $x$ , наконец,  $P_a$  и  $P_r$ .

Выражения для  $\dot{H}$ ,  $\dot{E}$ ,  $P_a$  и  $P_r$  становятся особенно простыми при больших значениях  $2ka$  ( $\operatorname{sh} 2ka \approx \operatorname{ch} 2ka \approx \frac{e^{2ka}}{2} \gg \sin 2ka$  и  $\cos 2ka$ ), а именно при  $2ka \geq 5$

$$\dot{H} = \frac{\omega\dot{I}_1}{l} e^{-p(a-x)}, \quad (5b)$$

$$\dot{E} = \frac{\omega\dot{I}_1 p}{\gamma l} e^{-p(a-x)}, \quad (6b)$$

$$P_a = P_r = \frac{2\pi R \omega^2 I_1^2 k}{\gamma l}. \quad (12a)$$

Формулы (5b), (6b) и (12a) остаются справедливыми и для нагрева сплошного цилиндра, если только глубина слоя, в котором практически (с точностью до 1%) сосредоточен переменный магнитный поток, мала в сравнении с радиусом цилиндра [Л. 4].

Для большинства практических задач значение  $\frac{Rk}{\mu_r}$  весьма мало, поэтому формулы для  $r$  и  $x$  принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} r &\approx \frac{2\pi R \omega^2 k}{\gamma l} \frac{\operatorname{sh} 2ka - \sin 2ka}{\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka}, \\ x &\approx \frac{2\pi R \omega^2 k}{\gamma l} \frac{\operatorname{sh} 2ka + \sin 2ka}{\operatorname{ch} 2ka + \cos 2ka}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Под  $r_0$  здесь понимается сопротивление цилиндра постоянному току, приведенное к цепи индуктора и равное  $\frac{2\pi R \omega^2}{\gamma l a}$ .

Зависимость  $\frac{r}{r_0}$  и  $\frac{x}{r_0}$  от  $2ka$  здесь та же, что и в случае нагрева плиты [формула (4) и рис. 1]. Однако, нужно иметь в виду, что в то время, как в задаче о нагреве плиты толщина ее была равна  $2a$ , в данном случае  $a$  — толщина стенки цилиндра.

б) Нагрев с применением железного сердечника. Устройство для индукционного нагрева (рис. 2), по существу, пред-

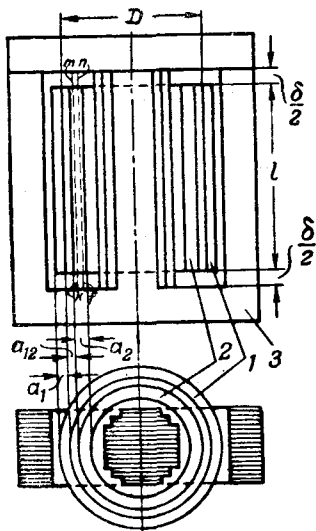


Рис. 2.

ставляет собой трансформатор с короткозамкнутой вторичной обмоткой. Однако, оно имеет свои особенности, обусловленные тем, что вторичной обмоткой в нем является стальной цилиндр. Наличие замкнутого магнитопровода из листовой электротехнической стали внутри нагреваемого стального цилиндра вносит ряд трудно поддающихся учету новых факторов. Чтобы сделать задачу разрешимой, придется отказаться от учета некоторых из них.

Строго говоря, распределение потоков рассеяния в рассматриваемом устройстве будет иное, чем в обычном короткозамкнутом трансформаторе с обмотками из немагнитного материала. Наиболее существенное изменение поля рассеяния произойдет в зоне вторичной обмотки (стальной цилиндр), что окажет влияние на слагающую реактивного сопротивления рассеяния  $x_k$ , обусловленную потоком рассеяния этой зоны, и на величину активного сопротивления вторичной обмотки  $r_2$ .

Изменением потока рассеяния в зоне между обмотками и в пределах первичной обмотки пренебрежем, тогда определяемая этим потоком рассеяния слагающая реактивного сопротивления рассеяния  $x'_k$  и активное сопротивление индуктора можно вычислить по формулам [Л. 5]:

$$x'_k = \frac{7,92\pi D f \omega^2 l}{l} \left( a_{12} + \frac{a_1}{3} \right) k_R \cdot 10^{-8} \Omega \quad (15)$$

и

$$r_1 = \frac{\pi D_{cp1} \omega l \rho_1 k_F}{S_1}, \quad (16)$$

где  $k_F$  — коэффициент Фильда для частоты 50 Hz, лежащий в пределах 1,05 ÷ 1,2;  $D_{cp1}$  — средний диаметр витков индуктора;  $\rho_1$  и  $S_1$  — удельное сопротивление и площадь сечения провода индуктора;  $D$ ,  $l$ ,  $a_{12}$  и  $a_1$  — геометрические размеры (в см), показанные на рис. 2;  $k_R$  — коэффициент Роговского, равный  $1 - \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}$ .

Примем, что силовые линии электрического и магнитного полей прямолинейны, падение магнитного напряжения в стали магнитопровода отсутствует и средняя длина магнитной силовой линии в воздушном зазоре между торцами цилиндра и магнитопроводом повсюду одинакова и равна  $\frac{\delta}{2}$  (рис. 2).

Положенное в основу дальнейших выводов предположение о постоянстве напряженности магнитного поля на данной силовой линии в воздушном зазоре между торцевой поверхностью цилиндра и магнитопроводом может считаться допустимым лишь в том случае, когда величина этого зазора не столь значительна.

Расположим начало координат на внутренней поверхности распрямленного цилиндра и направим ось  $X$  по радиусу, а ось  $Z$  по образующей цилиндра. Тогда, применяя закон полного тока получим:

$$\vec{E} = - \frac{l + \delta \mu_r}{\gamma l} \frac{d\dot{H}}{dx}. \quad (17)$$

Аналогично, применяя закон электромагнитной индукции к бесконечно малому прямоугольнику, расположенному в плоскости  $XOY$ , найдем:

$$\frac{d\vec{E}}{dx} = - j \omega \gamma \mu_0 \mu_r \dot{H}. \quad (18)$$

Решая совместно (17) и (18), получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \dot{H}}{dx^2} &= p^2 \dot{H}, \\ v_1 &= (1+j) \sqrt{\frac{\omega \gamma \mu_0 \mu_r l}{2(l + \delta \mu_r)}} = (1+j) k_1. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Мы получили несколько неожиданный результат. Коэффициент  $k_1$ , определяющий затухание амплитуды и изменение фазы проникающей в стальной цилиндр электромагнитной волны, обычно зависит только от частоты и параметров среды.

В нашем же случае  $k_1$  зависит еще и от соотношения геометрических размеров  $\delta$  и  $l$ , а в определенных условиях может оказаться даже независимым от  $\mu_r$ . Это объясняется тем, что в рассматриваемой задаче магнитная силовая линия не замыкается полностью в стали, а проходит через воздушный зазор. При этом, если падение магнитного напряжения в воздушном зазоре  $-H\mu_r\delta$  значительно больше, чем в стали цилиндра  $-Hl$ , коэффициент  $k_1$  приобретает значение

$\sqrt{\frac{\omega \mu_0 l}{2\delta}}$ , где роль относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$  играет отношение геометрических размеров  $\frac{l}{\delta}$ .

Таким образом, вместо, казалось бы, неизбежного для стального цилиндра сильно выраженного скин-эффекта, мы можем получить  $k_1$  того же порядка, что и в случае медного цилиндра. Так, например, при 15°C удельная проводимость стали (марки 1045) в 10 раз меньше проводимости меди [Л. 1], и если  $\frac{l}{\delta} = 15$ , то  $k_1$  для нагреваемого цилиндра из стали только на 22% больше, чем для меди.

Граничные условия в нашей задаче при  $x=0 \dots \dot{H}=0$  и при  $x=a_2 \dots \dot{H} = \frac{\dot{I}_2}{l + \delta \mu_r}$ .

Из уравнений (19) и (17) имеем:

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}_2}{l + \delta \mu_r} \frac{\text{sh } p_1 x}{\text{sh } p_1 a_2}, \quad (19a)$$

$$\vec{E} = \frac{\dot{I}_2 p_1}{\gamma l} \frac{\text{ch } p_1 x}{\text{sh } p_1 a}. \quad (17a)$$

Воспользовавшись теоремой Пойнтинга и заменяя  $I_2$  через  $\omega_1 I_1$ , найдем активную мощность  $P_a$ , выделяющуюся в нагреваемом цилиндре, и реактивную мощность  $P_r$ , связанную с потоком рассеяния, замыкающимся через нагреваемый цилиндр.

Разделив  $P_a$  и  $P_r$  на  $I_1^2$ , найдем приведенное к цепи индуктора активное сопротивление  $r_2$  и реактивное сопротивление  $x''_k$ , обусловленное потоком рассеяния, замыкающимся через цилиндр:

$$r_2 = \frac{2\pi R k_1 \operatorname{sh} 2k_1 a_2 + \sin 2k_1 a_2}{\gamma l \operatorname{ch} 2k_1 a_2 - \cos 2k_1 a_2}, \quad (20)$$

$$x''_k = \frac{2\pi R k_1 \operatorname{sh} 2k_1 a_2 - \sin 2k_1 a_2}{\gamma l \operatorname{ch} 2k_1 a_2 - \cos 2k_1 a_2}. \quad (21)$$

Входящая в  $k_1$  величина относительной магнитной проницаемости находится (путем подбора) из кривой намагничивания по эффективному значению напряженности магнитного поля на поверхности нагреваемого цилиндра (из уравнения  $H = \frac{\omega_1 I_1}{l + \delta \mu_r}$ ).

Таким образом, каждому значению тока  $I_1$  соответствуют определенные значения  $r_2$  и  $x''_k$  и определенное напряжение на зажимах индуктора

$$U_1 = I_1 \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x'_k + x''_k)^2}.$$

На рис. 3 построены кривые  $\frac{r_2}{r_{20}}$ ,  $\frac{x''_k}{x''_{k0}}$  и  $\cos \varphi$  (где  $r_{20} = \frac{2\pi R \omega_1^2}{\gamma l a_2}$  и  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x''_k}{r_2}$ ) в функции  $2k_1 a_2$ . Как было отмечено ранее, зависимость  $\frac{r}{r_0}$  и  $\frac{x}{r_0}$  для случая нагрева полого цилиндра без сердечника соответствует рис. 1.

При прохождении точки Кюри произведение  $2ka$  резко (в  $\sqrt{\mu_r}$  раз) падает и при нагреве токами низкой частоты (50 Hz) полых цилиндров ( $a < 6$  см) оно становится  $< 1,5$ . При этих значениях  $2ka$  дальнейший нагрев цилиндра без замкнутого магнитопровода становится невозможным.



## Выбор термической защиты для электродвигателей

Инж. С. Н. Шевчук

Горький

За последние 10—15 лет в практике эксплуатации электропривода весьма широкое распространение получила система термической защиты электродвигателей от перегрузки путем применения термических реле.

Заводы, изготавливающие термические реле, как правило, рекомендуют при выборе защиты исходить из номинальных параметров токов реле и двигателя. Такая методика совершенно правительна при идентичности перегрузочных характеристик термореле и электродвигателя для различных режимов их работы, но далеко не достаточна в случае нарушения этих условий. В действительности перегрузочные характеристики электродвигателей и соответственно выбранных им по току термореле зачастую в силу конструктивных и других особенностей резко различаются. Исследования, проведенные автором на Горьковском автомобильном заводе, показали,

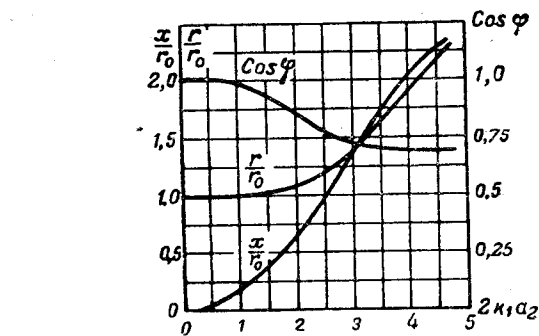


Рис. 3.

Замкнутый магнитопровод обеспечивает также лучшую магнитную связь между индуктором и нагреваемым цилиндром, относительно меньшие реактивные сопротивления рассеяния, более высокие значения  $\cos \varphi$  и к. п. д. установки. Таким образом, применение замкнутого магнитопровода при индукционном нагреве полых цилиндров токами низкой частоты вполне оправдывается рядом эксплуатационных преимуществ, которые дает это мероприятие.

### Литература

1. В. П. Вологдин. Поверхностная закалка индукционным способом. Металлургиздат, 1939.
2. Г. И. Бабат. Индукционный нагрев и некоторые его промышленные применения (Докторская диссертация), 1940.
3. К. А. Круг. Основы электротехники, т. II, ГОНТИ, 1938.
4. Д. В. Голубев. Подсчет мощности, расходуемой на нагревание валков прокатных станов токами Фуко. Труды Уральского индустриального института им. Кирова, сборник 1, 1936.
5. Г. Н. Петров, Н. В. Горохов и др. Электрические машины, ч. 1, Госэнергоиздат, 1940.

что большинство установленных термических реле не позволяют в достаточной степени использовать тепловые возможности электродвигателей при перегрузках, а в ряде случаев, наоборот, не защищают от них. Эти несоответствия особенно характерны для оборудования, работающего в цехах поточного производства. В связи с этим вопрос о рациональном подборе термореле для защиты электродвигателей при разных режимах его работы приобретает значительный интерес.

Нагрев и перегрузочные возможности электродвигателя. Обмотка электродвигателя при перегрузке достигает предельно-допустимой температуры спустя некоторое время, величина которого будет зависеть от численного значения перегрузки, тепловых параметров двигателя, температуры обмотки к моменту перегрузки и, наконец, от характера нагрузочного графика.

Пусть начало перегрузки соответствует началу про- звольного ( $n$ -ного) рабочего периода данного графика; тогда общее уравнение нагрева обмотки электродвигате- ля к концу этого периода

$$\vartheta_n = \delta^2_x \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_n}{T}}) + \vartheta_{0n-1} e^{-\frac{t_n}{T}} \quad (1)$$

(обмотка рассматривается как однородное тело). Превы- шение температуры обмотки к концу последующего пе- риода холостого хода

$$\vartheta_{0n} = \delta^2_x \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_n}{T}}) e^{-\frac{t_0}{T}} + \vartheta_{0n-1} e^{-\frac{t_n+t_0}{T}} + \delta \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_0}{T}}), \quad (2)$$

где  $\delta_x$ —коэффициент, характеризующий численное значе- ние перегрузки (может быть принят равным отношению тока перегрузки к номинальному току);  $\delta$ —коэффициент, характеризующий отношение потерь в электродвигателе при холостом ходе к потерям при полинальной нагрузке;  $t_n$ —продолжительность рабочего периода  $n$ -го цикла на- грузочного графика электродвигателя;  $t_{0n}$ —продолжитель- ность следующего за рабочим периодом холостого хода;  $\vartheta_m$ —установившееся превышение температуры обмотки электродвигателя в условиях непрерывной продолжитель- ной работы при номинальной нагрузке;  $\vartheta_{0n-1}$ —превыше- ние температуры обмотки электродвигателя к началу пе- регрузки.

Аналогично может быть найдено тепловое состояние обмотки для последующих периодов нагрузки и холосто- го хода.

Так как практически продолжительности рабочих пе- риодов, а равно и продолжительности холостых ходов рас- сматриваемого повторно-кратковременного и нагрузочно- го графика соответственно равны между собой, то пре- дельно-допускаемое (критическое) превышение темпера- туры, которого достигнет обмотка электродвигателя, спустя  $x$  рабочих периодов от начала перегрузки, выразится:

$$\vartheta_x = \delta^2_x \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \left[ e^{-\frac{(x-1)t+t_0}{T}} + e^{-\frac{(x-2)t+t_0}{T}} + \dots + 1 \right] + \delta \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t_0}{T}}) \left[ e^{-\frac{t(x-1)+(x-2)t_0}{T}} + e^{-\frac{t(x-2)+(x-3)t_0}{T}} + \dots + e^{-\frac{t}{T}} \right] + \vartheta_{0n-1} e^{-\frac{xt+(x-1)t_0}{T}}.$$

Произведя соответствующие преобразования, получим:

$$\vartheta_x = \frac{\delta^2_x \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) (1 - e^{-\frac{xt}{\varepsilon T}}) + \delta \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) e^{-\frac{(x-1)t}{\varepsilon T}}}{1 - e^{-\frac{t}{\varepsilon T}}} + \vartheta_{0n-1} e^{-\frac{xt}{\varepsilon T}} \frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}. \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon = \frac{t}{t+t_0}$ . Решая (3) относительно  $x$ , найдем число рабочих периодов, за которое обмотка, находясь под данной перегрузкой, достигнет предельно-допускаемого превышения температуры  $\vartheta_x$ :

$$x = \frac{2,3T\varepsilon}{t} \lg \frac{\delta^2_x \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \delta \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}}) e^{-\frac{t}{T}} e^{\frac{t}{\varepsilon T}} - \vartheta_{0n-1} (1 - e^{-\frac{t}{\varepsilon T}}) e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}}}{\delta^2_x \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \delta \vartheta_m (1 - e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}}) - \vartheta_x (1 - e^{-\frac{t}{T}})}. \quad (4)$$

Полагая, что перегрузка электродвигателя возникла после установления в его обмотке теплового равновесия, соответствующего номинальному режиму, можно значение  $\vartheta_{0n-1}$  выразить формулой:

$$\vartheta_{0n-1} = \frac{\vartheta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}} + \delta \vartheta_m [1 - e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}}] e^{-\frac{t}{T}} e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}}}{1 - e^{-\frac{t}{\varepsilon T}}}. \quad (5)$$

Подставив значение  $\vartheta_{0n-1}$  в (4), получим:

$$x = \frac{2,3T\varepsilon}{t} \lg \frac{(1 - e^{-\frac{t}{T}}) (\delta^2_x - 1)}{(\delta^2_x - \lambda) + (\lambda - \delta) e^{-\frac{t}{\varepsilon T}} - (\delta^2_x - \delta) e^{-\frac{t}{T}}}, \quad (6)$$

где  $\lambda = \frac{\vartheta_x}{\vartheta_m}$ . Время, в течение которого превышение тем-

пературы, перегруженной током обмотки, изменится от номинального значения до предельно-допустимого (крити- ческого) (в дальнейшем это время условимся называть допускаемым временем перегрузки обмотки электродви- гателя)

$$t_{x\vartheta} = (\alpha + \beta)t + \frac{\alpha t(1-\varepsilon)}{\varepsilon} = \left[ \frac{2,3T\varepsilon}{t} \lg \frac{(1 - e^{-\frac{t}{T}}) (\delta^2_x - 1)}{(\delta^2_x - \lambda) + (\lambda - \delta) e^{-\frac{t}{T}} - (\delta^2_x - \delta) e^{-\frac{t}{T}}} \right] t + \frac{\alpha t(1-\varepsilon)}{\varepsilon}, \quad (7)$$

при

$$\beta = 0 \dots t_{x\vartheta} = \alpha t + (\alpha - 1)t \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}, \quad (7a)$$

где  $\alpha + \beta = x$ ;  $\alpha$ —целое количество рабочих периодов;  $\beta$ — дробная величина рабочего периода.

Допустимое время перегрузки обмотки электродвига- теля при тех же условиях, но для непрерывного графика нагрузки

$$t_{x\vartheta} = 2,3T \lg \frac{\delta^2_x - 1}{\delta^2_x - \lambda}. \quad (8)$$

Когда электродвигатель, будучи охлажден до темпе- ратуры окружающей среды, подвергнется перегрузке сразу же после пуска, то время, спустя которое его обмотка достигнет предельно-допустимого превышения температу- ры, при повторно-кратковременном графике выразится:

$$t'_{x\vartheta} = \left\{ \frac{2,3T\varepsilon}{t} \lg \frac{\delta^2_x (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \delta \left[ 1 - e^{-\frac{t(1-\varepsilon)}{\varepsilon T}} \right] e^{-\frac{t}{T}} e^{-\frac{t}{\varepsilon T}}}{(\delta^2_x - \lambda) + (\lambda - \delta) e^{-\frac{t}{T}} - (\delta^2_x - \delta) e^{-\frac{t}{T}}} \right\} t + \frac{\alpha t(1-\varepsilon)}{\varepsilon}. \quad (9)$$

(нагревом обмотки во время пуска, а также и во время, предшествующего рабочему режиму холостого хода, пренебрегаем). При непрерывном графике допустимое время перегрузки для охлажденной обмотки

$$t'_{x1\vartheta} = 2,3T \lg \frac{\delta^2_x}{\delta^2_x - \lambda}. \quad (10)$$

Пользуясь формулами (7)–(10), можно построить перегрузочные кривые электродвигателя, характеризующие зависимость между допустимым временем перегрузки и численным ее значением применительно к рассматриваемым нагрузочным графикам.

Определение времени выдержки термореле и условий защиты обмотки электродвигателя. Выражения времени выдержки, т. е. времени от начала перегрузки термореле до момента его срабатывания, соответственно ранее изложенному, напишутся:

а) для повторно-кратковременного графика при перегрузке, возникшей в период уже нагретого состояния рабочего элемента (имеется в виду то состояние рабочего элемента, при котором он достиг номинального превышения температуры):

$$t_{xT} = \left[ \frac{2,3T\varepsilon \lg \frac{(1 - e^{-\frac{t}{T}})(\delta^2_x - 1)}{(\delta^2_x - \lambda_1) + (\lambda_1 - \delta^2_0)e^{-\frac{t}{T_1}} - (\delta^2_x - \delta^2_0)e^{-\frac{t}{T_1}}} + \frac{\alpha t(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}}{t} \right] t + \quad (11)$$

б) для повторно-кратковременного графика, но при перегрузке от холодного состояния рабочего элемента, т. е. такого состояния, когда температура рабочего элемента термореле равна температуре окружающей среды:

$$t'_{xT} = \left\{ \frac{2,3T_1\varepsilon \lg \frac{\delta^2_x(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + \delta^2_0 \left[ 1 - e^{-\frac{t(1 - \varepsilon)}{\varepsilon T_1}} \right] e^{-\frac{t}{T_1}} e^{\frac{t}{\varepsilon T_1}}}{(\delta^2_x - \lambda_1) - (\lambda_1 - \delta^2_0)e^{-\frac{t}{T_1}} - (\delta^2_x - \delta^2_0)e^{-\frac{t}{T_1}}} + \frac{\alpha t(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}}{t} \right\} t + \quad (12)$$

в) для непрерывного графика при перегрузке от нагретого состояния рабочего элемента:

$$t_{x1T} = 2,3T_1 \lg \frac{\delta^2_x - 1}{\delta^2_x - \lambda_1}; \quad (13)$$

г) для непрерывного графика, но при перегрузке от холодного состояния рабочего элемента:

$$t'_{x1T} = 2,3T_1 \lg \frac{\delta^2_x}{\delta^2_x - \lambda_1}; \quad (14)$$

здесь  $T_1$ —постоянная времени нагрева рабочего элемента термореле;  $\lambda$ —отношение критического превышения температуры рабочего элемента, при котором происходит срабатывание термореле, к установившемуся превышению при длительной нагрузке номинальным током;  $\delta_0$ —отношение силы тока холостого хода электродвигателя к силе тока при номинальной нагрузке.

Применяя формулы (11)–(14), легко построить перегрузочные характеристики, определяющие зависимость времени выдержки термореле от численного значения перегрузки.

Анализ формул (7)–(14) показывает, что идеальная термическая защита перегрузки достигается при условии совпадения перегрузочных характеристик термореле и обмотки электродвигателя, построенных для соответствующих режимов и нагрузочных графиков. Однако, для надежной защиты от перегрузки в ряде случаев следует выбирать термореле с временем выдержки, меньшим времени допустимой перегрузки обмотки электродвигателя, или

$$t_{xT}k_1 = t_{x\partial}, \quad t'_{xT}k_2 = t'_{x\partial}, \quad t_{x1T}k_3 = t_{x1\partial}, \quad t'_{x1T}k_4 = t'_{x1\partial},$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$ —коэффициенты надежности за-

щиты, представляющие собой отношения допустимого времени перегрузки обмотки электродвигателя ко времени выдержки термореле при соответствующих режимах и нагрузочных графиках.

Таким образом, чем больше численное значение коэффициента надежности защиты, тем с большим тепловым резервом будет работать электродвигатель во время перегрузок, а следовательно, тем меньше будут использованы перегрузочные возможности его обмотки. При коэффициенте надежности  $< 1$  термореле не обеспечивает защиты электродвигателя.

Как показали исследования термореле различных типов и фирм, коэффициенты надежности для случая перегрузки от нагретого состояния составляют от 6,5 до 0,6 при защите электродвигателя с постоянной времени  $T = 900$  сек. и от 17 до 1,5 при защите электродвигателя с  $T = 2460$  сек.

Для рассматриваемых нами условий работы электродвигателей следует рекомендовать подбор термореле с расчетом коэффициента надежности защиты при перегрузках от нагретого состояния в пределах 1,4–2,5.

Некоторые результаты экспериментальных исследований термореле. Для суждения о возможных отклонениях фактических характеристик термореле от расчетных автором был подвергнут исследованию ряд образцов термореле завода ХЭТЗ и фирм Square Allen Bradley, Klockner, GE, AEG, Westinghouse, Monitor, Cutler Hammer. По принципу действия исследованные термореле разделялись на следующие три категории: 1) термореле, действующие на принципе расплавления легкоплавкого металла (Square Allen Bradley, GE, Cutler Hammer; 2) термореле, действующие на принципе деформации биметаллической пластинки при нагревании (AEG, GE,); 3) термореле, действующие на принципе изменения при нагревании металлической пластинкой своих линейных размеров (Klockner).

Исследованием установлено:

1) фактические кривые нагрева и охлаждения рабочих элементов термореле при номинальных режимах его работы весьма близки к экспоненциальным, причем максимальные расхождения между ними для отдельных образцов не превышают  $\pm 15\%$ ;

2) постоянные времени нагрева рабочих элементов численно меньше постоянных времени нагрева обмоток электродвигателей;

3) установившиеся превышения температур рабочих элементов при номинальных токах нагрузки и термореле GE, Allen Bradley (тип А) и ХЭТЗ близки к превышению температуры обмоток электродвигателей для тех же режимов работы;

4) превышения температур срабатывания термореле для большинства образцов на 10–20°С выше установившихся превышений температур при номинальных режимах работы.



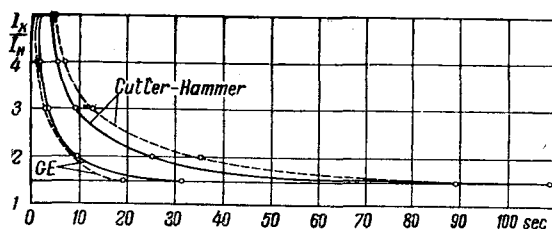


Рис. 1.

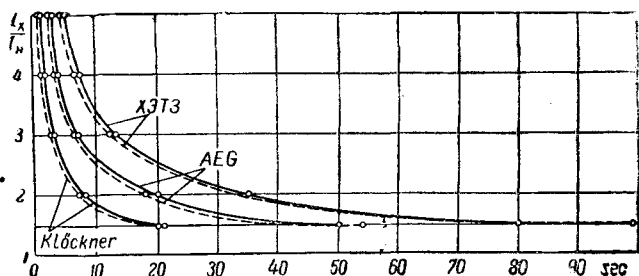


Рис. 2.

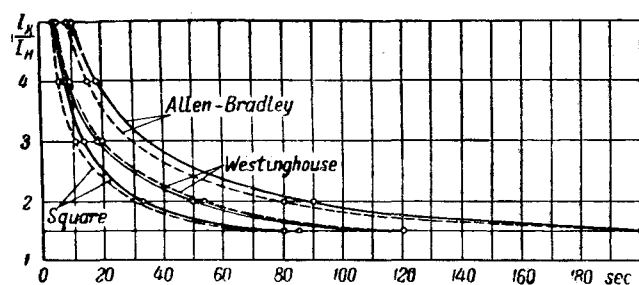


Рис. 3.

Сопоставление перегрузочных кривых для термореле и обмоток электродвигателей при непрерывном графике нагрузки и нагреве последних от холодного состояния с аналогичными кривыми при перегрузках уже нагретых обмоток и термореле показало, что отдельные термореле — Allen Bradley (индукционно-термическое), Cutler Hammer, обладая достаточно приемлемыми характеристиками для защиты электродвигателей в первом случае, не защищают их во втором случае. Таким образом, перегрузочные характеристики от холодного состояния (приводимые в фирменных каталогах в качестве основных ха-

рактеристик термореле) не всегда могут служить исчерпывающим материалом при подборе термореле для электродвигателя с непрерывным графиком нагрузки. Достаточным критерием в этом случае могут служить перегрузочные кривые от нагретого состояния.

Установлено также, что некоторые термореле (Monitor), будучи пригодными для защиты обмоток электродвигателей, например при 1½-кратных перегрузках и работе их по непрерывному графику, не защищают эти обмотки при тех же перегрузках, но при повторно-кратковременном графике. В этом случае при выборе термозащиты следует руководствоваться перегрузочными характеристиками, построенными для повторно-кратковременного графика.

На рис. 1—3 изображены экспериментальные и расчетные перегрузочные характеристики рассматриваемых термореле от нагретого состояния для непрерывного графика нагрузки. Экспериментальные кривые показаны сплошными линиями, расчетные — пунктирными; типы реле указаны при кривых. Сопоставление приведенных характеристик показывает, что выдержки времени термореле, найденные опытным путем, сравнительно мало отличаются от теоретических. Величины этих расхождений для исследованных термореле при перегрузках от 1,5 до 5-кратных значений их номинальных токов находятся в пределах (–10%) ÷ (+20%).

**Выводы.** 1. При выборе термического реле для защиты электродвигателя следует руководствоваться перегрузочными характеристиками, построенными применительно к условиям и режиму их работы.

2. Построение перегрузочных характеристик обмотки электродвигателя и термореле с достаточной для практики точностью можно производить аналитически по формулам (7) и (11) — для повторно-кратковременного графика, у которого рабочие периоды чередуются с холостыми ходами, и по формулам (8) и (13) — для непрерывного графика.

3. Необходимо, чтобы заводы-изготовители в каталогах электродвигателей и термореле указывали величины постоянных времени нагрева, номинальные и критические превышения температур обмоток электродвигателей и рабочих элементов термореле.



## Модификация графического метода Швайгера для определения среднеквадратичных величин

Кандидат техн. наук А. А. КЛИМОВ

Москва

Сущность метода сводится к тому, что заданный произвольный график нагрузки  $P=f(t)$  заменяется прямоугольниками таким образом, чтобы избыточные и недостающие площади прямоугольного графика по сравнению с криволинейным были примерно одинаковы.

По оси абсцисс (рис. 1) в том же масштабе, как и по оси ординат (или в другом произвольном масштабе), откладываются отрезки:

$$\overline{oa}_1 = P_1; \overline{t_1a_2} = \frac{P_1}{P_2} \overline{oa}_1; \overline{t_2a_3} = \frac{P_1}{P_3} \overline{oa}_1 \text{ и т. д.}$$

т. е. отрезки, равные отрезку  $\overline{oa_1}$ , увеличенному или уменьшенному во столько раз, во сколько базисная мощность  $P_1$  больше или меньше соответственно мощностей  $P_2, P_3$  и т. д.

Точка  $A_1$ , соответствующая ординате базисной мощности, соединяется прямой с точкой  $a_1$ , точка  $A_2$ , соответствующая мощности  $P_2$ , соединяется с точкой  $a_2$  и т. д.

Для значения  $P_6 = 0$  (т. е. для периода пауз) линия  $A_6a_6$ , очевидно, сольется с осью абсцисс, так как точка  $A_6$  будет лежать на оси абсцисс, а точка  $a_6$  в бесконечности, ибо

$$\overline{t_5 a_6} = \frac{P_1}{P_6} \overline{oa_1} = \infty.$$

Идя из точки  $A_1$  вдоль наклонной линии  $A_1a_1$  до пересечения ординаты в точке  $t_1$ , получим точку  $c_1$ , продолжая движение из точки  $c_1$  параллельно наклонной линии  $A_2a_2$  до пересечения с продолжением ординаты в точке  $t_2$ , получим точку  $c_2$ . Ведя аналогичным образом построение дальше, получим ломаную  $A_1c_1c_2c_3c_4c_5c_6$ , замыкающей которой будет прямая  $A_1c_6$ .

На этой ломаной отыскивается участок линии, наиболее близкий к параллельности линии  $A_1c_6$ .

В рассматриваемом случае этому требованию отвечают два участка:  $c_4c_5$  и  $c_2c_3$ . Мощность прямоугольника нагрузки  $P_5$  или  $P_3$ , соответствующая этим участкам ломаной, и есть в первом приближении искомая среднеквадратичная мощность.

Для более точного определения среднеквадратичной мощности из точки пересечения выбранного участка ломаной с осью абсцисс (в нашем случае — для  $c_2c_3$  — из точки  $a_3$ ), проводится параллельно прямой  $A_1c_6$  прямая  $a_3D$ . Ордината  $dt_2$ , в принятом масштабе мощностей и является среднеквадратичной мощностью заданного графика нагрузки.

**Доказательство.** Требуется доказать, что отрезок  $\overline{Dt_2}$  в некотором масштабе соответствует

$$P_{ср.кв} = \sqrt{\frac{1}{T} \int P^2 dt} = \sqrt{\frac{\sum(P^2 t)}{\sum t}},$$

из подобия треугольников  $A_1oa_1$  и  $A_1b_1c_1$  следует:

$$\begin{aligned} \frac{A_1o}{oa_1} &= \frac{b_1c_1}{A_1b_1}, \text{ откуда } b_1c_1 = \frac{A_1o}{oa_1} A_1b_1 = \frac{P_1}{P_1} t_1 = \\ &= \left(\frac{P_1}{P_1}\right)^2 t_1 = 1^2 \cdot t_1. \end{aligned}$$

т. е. отрезок  $b_1c_1$  представляет собой первый член интеграла подкоренного выражения.

Аналогично из подобия треугольников  $A_2t_1a_2$  и  $c_1c_1c_2$

$$\frac{A_2t_1}{t_1a_2} = \frac{c_1c_2}{c_1c_1},$$

откуда

$$c_1c_2 = \frac{A_2t_1}{t_1a_2} c_1c_1 = \frac{P_2}{\frac{P_1}{P_2} P_1} (t_2 - t_1) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 (t_2 - t_1),$$

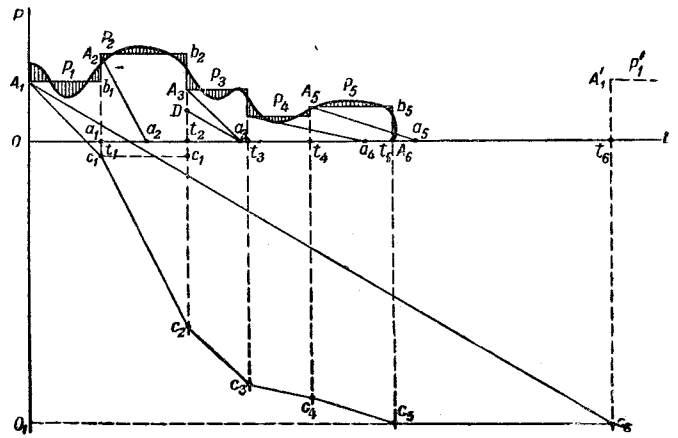


Рис. 1.

т. е. отрезок  $c_1c_2$  представляет собой второй член интеграла подкоренного выражения, измеренный в относительной системе единиц. Очевидно, что отрезок  $A_1c_6 = A_1o_1$  является полным интегралом подкоренного выражения в той же системе единиц.

Из подобия треугольников  $A_1o_1c_6$  и  $Dt_2a_3$

$$\frac{A_1o_1}{o_1c_6} = \frac{Dt_2}{t_2a_3} \text{ или } \frac{\sum \left[ \left( \frac{P_x}{P_1} \right)^2 t \right]}{\sum t} = \frac{P_D}{\frac{P_1}{P_3} P_1}.$$

Полагая  $P_D \approx P_3$ , так как  $Dt_2$  близко к параллельности  $A_3a_3$ , имеем:

$$\left(\frac{P_D}{P_1}\right) = \sqrt{\frac{\sum \left[ \left( \frac{P_x}{P_1} \right)^2 t \right]}{\sum t}},$$

т. е. мы получили аналитическое выражение среднеквадратичной мощности в относительной системе единиц. Если теперь вынести из-под радикала  $P_1$  и произвести соответствующее сокращение, то получим аналитическое выражение среднеквадратичной мощности в абсолютной системе единиц:

$$P_D = \sqrt{\frac{\sum(P^2 t)}{\sum t}},$$

и, следовательно, отрезок  $Dt_2$  в принятом масштабе соответствует  $P_D = P_{ср.кв}$ .

Предлагаемый метод определения среднеквадратичных величин основан как и метод Швайгера на методе пропорций, однако выгодно отличается от последнего тем, что в нем избегается необходимость построения гиперболической кривой  $\frac{1}{p} = f(p)$ , а сами построения,

будучи выполненными в относительной системе единиц, более просты и наглядны.

Описанный способ определения среднеквадратичной мощности в равной мере применим также и для определения других среднеквадратичных величин, например, тока или момента, если заданы соответствующие графики нагрузки в виде  $I=f(t)$  или  $M=f(t)$ .



## К проблеме расхода металла и снижения потерь электроэнергии в электрохозяйстве СССР

Опубликованные в порядке обсуждения в журнале «Электричество» (№ 6, 1946) статьи профессоров А. А. Глазунова, П. Г. Грудинского, В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета и инж. С. И. Рабиновича вызвали многочисленные отклики со стороны ученых и инженеров — читателей журнала\*.

В этих статьях, посвященных проблеме расхода металла и снижения потерь электроэнергии в электрохозяйстве СССР, доказывается необходимость снижения потерь электроэнергии в машинах, трансформаторах и в проводах электрических сетей путем увеличения затрат на них активных материалов и при помощи применения стали повышенного качества. Увеличение расхода металла в одних элементах электрической системы, по мнению авторов статей, может быть сделано за счет внутреннего перераспределения металла между отдельными звеньями системы; дополнительные вложения, вызванные увеличением расхода активных материалов, окупаются последующим сокращением потерь электроэнергии; применение же ряда достижений новой техники и новых принципов построения распределительных сетей позволяет добиться снижения потерь энергии при одновременном уменьшении расхода цветных металлов.

Поступившие замечания (заключительная часть их публикуется ниже) показывают, что большинство участников дискуссии признает правильность постановки данной проблемы и считает необходимым изменить существующую в этой области тенденцию — уделять основное внимание вопросам экономии материалов, недооценивая значение уменьшения потерь мощности и энергии. Обоснование необходимости существенного изменения технической политики в этих важных вопросах электропромышленности и электрохозяйства СССР является главным и положительным результатом проведенной дискуссии. Лишь немногие (проф. С. А. Пресс, инж. Н. А. Язлинский), считая, что потери энергии в электродвигателях незначительны по сравнению с потерями в механических частях производственных машин и в технологических процессах производства, вообще возражают против дополнительных вложений материалов в электрические машины. Однако, борьба с потерями в технологической части не противоречит задаче уменьшения потерь в электрической части; потери должны снижаться во всех звеньях производства, передачи, преобразования и потребления энергии всеми средствами, оправдываемыми техническими возможностями и экономическими результатами.

В оценке экономических результатов, в выборе методики технико-экономических расчетов и в определении исходных данных для их проведения обнаружилось значительное разногласие во мнениях.

Много замечаний было сделано в связи с предложением об увеличении веса машин и сечений проводов. Предложения профессоров В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета об увеличении веса электродвигателей в пределах ~ 40—95% встретили возражения со стороны работников электропромышленности. Так, инженеры В. А. Васильев и Э. Д. Кравчик пределом повышения веса двигателей считают 40—60%, а инж. А. И. Бертинов решительно возражает против утяжеления их более чем на 10—20%. Предложения проф. А. А. Глазунова о дальнейшем уменьшении плотностей тока против цифр, рекомендованных Министерством электростанций СССР, и о вве-

дении поправочного коэффициента к формуле Кельвина встретили возражения со стороны инженеров С. Д. Соловьева, А. И. Колпаковой, К. А. Смирнова, С. Ф. Шершова и др. Выступающие в дискуссии говорят о заниженной стоимости меди, о недоучете роста производительности труда, о низкой оценке отчислений на капитальные затраты.

Следует признать, что дискуссия пока не внесла полной ясности в вопросы технико-экономических расчетов в электрохозяйстве и в частности в вопрос о том, занижена ли у нас стоимость меди и других активных материалов или же действительно очень высока стоимость энергии и, наконец, правильно ли оценивается доля капитальных вложений. Во всяком случае в результате дискуссии с полной очевидностью обнаружилось, что ведущие инженеры не уверены как в правильности тех экономических соотношений, которые они кладут в основу своих расчетов, так и в методике проведения этих расчетов. Между тем, электрооборудование и другие элементы электроэнергетических систем, проектируемые в настоящее время, занимают, и будут несомненно занимать, важное место в материальном балансе народного хозяйства в текущей и следующих пятилетках и имеют большое значение для технического прогресса и индустриального развития страны. Поэтому нельзя не согласиться с высказанным в дискуссии предложением продолжить обсуждение некоторых технико-экономических вопросов настоящей дискуссии на основе их углубленного изучения. Широкая инженерная общественность выдвигает настоятельное требование перед нашими научными учреждениями, проводящими исследования в области экономики и общей энергетики, дать научно-обоснованное освещение этих вопросов.

Технические предложения, содержащиеся в статьях, получили меньше откликов, чем вопросы экономические. Несмотря на частые упоминания о новой технике в высказываниях работников промышленности (Н. А. Язлинский, А. И. Бертинов), осталось неясным, какие из новых электротехнических материалов, когда и в какой мере будут использованы для улучшения свойств двигателей. Если в трансформаторостроении вопрос о методах повышения к. п. д. нашел достаточное освещение (С. И. Рабинович, Б. Б. Гельперин), то вопросы внедрения новых форм и типов подстанций и трансформаторов (комплектные подстанции, трансформаторы с регулированием под нагрузкой, сухие трансформаторы, передвижные резервные трансформаторы и пр.) представители электропромышленности обили молчанием. Равным образом не нашли отклика со стороны работников электропромышленности требования к новой коммутационной аппаратуре, необходимой для перестройки схем распределения энергии по современным принципам, хотя эти принципы признаны рациональными и представителями науки (член-корр. Академии наук СССР И. С. Брук и др.) и инженерами проектных, монтажных и эксплуатирующих организаций (А. Б. Крикунчик, Я. М. Большаков, А. П. Златковский и др.), которые уточнили и дополнили предложения, высказанные в отношении коммутационной аппаратуры в статье проф. П. Г. Грудинского.

Поднятые в дискуссии насущные для электроэнергетики СССР вопросы новой техники настойчиво требуют резкого поворота внимания к ним со стороны электропромышленности и научно-исследовательских организаций и дальнейшего освещения в печати.

\* Начало дискуссии см. «Электричество», № 12, 1945 и № 1, 1947.

## Инж. А. И. БЕРТИНОВ

Главэлектромашипром Министерства электропромышленности СССР

Исследуя сложный технико-экономический комплекс вопросов проектирования электрических машин, профессора В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечет приходят к выводу о необходимости: 1) повышения коэффициента мощности и к. п. д.; 2) снижения норм перегрева на  $15^{\circ}\text{C}$ ; 3) увеличения кратности моментов и длительной перегрузочной способности; 4) перевода машин мощностью от 1 до 100 kW на радиальную систему вентиляции.

Считая нежелательным «чрезмерное утяжеление машин», они полагают, что осуществление указанных мероприятий «наиболее целесообразно» путем «уменьшения мощности машин АД и МА-200 примерно в два раза» за счет снижения магнитной индукции в зазоре и плотности тока в обмотках.

Эти предложения профессоров В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета отмечают все достижения советского электромашиностроения и толкают нас с пути технического прогресса идущего по линии снижения удельного расхода материалов (путем применения более совершенных изоляционных и магнитных материалов, рациональной геометрии, системы вентиляции и конструкции), на путь утяжеления машин.

Разберем основные предложения:

**Энергетические показатели.** В 1944 г. технический совет Министерства электропромышленности специально анализировал технический уровень советского электромашиностроения с учетом опыта войны и последних достижений науки и техники в области электромашиностроения.

В результате этого рассмотрения было принято решение заменить все существующие серии электродвигателей мощностью от 1 до 100 kW тремя новыми сериями: 1) серий защищенных электродвигателей нормального исполнения; 2) серий закрытых машин, в том числе взрывобезопасных; 3) серий электродвигателей для тяжелых режимов работы. При этом основным в проектировании новых серий электродвигателей было принято повышение эксплуатационной надежности и рабочих характеристик электродвигателей, а также улучшение энергетических показателей.

Советские серии электродвигателей типов МА-200 и АД по к. п. д. практически стоят на уровне американских норм, уступая им лишь в отношении коэффициента мощности.

Улучшение энергетических показателей электродвигателей должно быть получено за счет применения более совершенных электроизоляционных и магнитных материалов, использования новейших достижений техники в области проектирования электрических машин (т. е. правильного распределения потерь, рациональной системы вентиляции, улучшения конструкций) и технологии производства и, в первую очередь, технологии электроизоляционного производства.

Увеличение веса активных материалов может быть принято в небольших пределах (10—20%) в порядке исправления допущенных ранее просчетов при проектировании находящихся ныне в производстве серий машин.

Предложение об увеличении к. п. д. и  $\cos \varphi$  электрических машин за счет уменьшения плотности тока и магнитной индукции, т. е. увеличения веса машин примерно на 75%, базируется на том, что якобы экономия материалов, получаемая при изготовлении электромашин, не окупается в связи с повышенными эксплуатационными расходами. Если энергетические показатели имеют важное значение для генерирующих и преобразовательных устройств, то для электродвигателей требование высоких энергетических показателей не является первостепенным. В первую очередь электродвигатели должны удовлетворять требованиям надежности в эксплуатации и высоким эксплуатационным характеристикам.

Расход электроэнергии при работе электродвигателей незначителен по сравнению с потерями. В сопряженной механической машине и при частых пусках они зависят не столько от величины к. п. д. при номинальном режиме, сколько от значения к. п. д. при переходных режимах, так как большая часть потерь имеет место из-за необходимости разгона маховых масс электродвигателя и испол-

нительного механизма (кинетическая энергия вращающихся масс, накопленная при пуске, бесполезно расходуется при торможении или при выбеге).

Потребители обычно меньше обращают внимания на энергетические показатели, обуславливая в первую очередь соответствие электродвигателей эксплуатационным характеристикам и надежность в эксплуатации.

Электродвигатели зачастую работают при частичных нагрузках, при которых значение коэффициента мощности резко падает. Предлагаемое авторами статьи увеличение коэффициента мощности при номинальном режиме при крутопадающей характеристике  $\cos \varphi$  практически может не дать эффекта. В техническом задании технического совета МЭП на проектирование новых серий предусмотрено увеличение коэффициента мощности при частичных нагрузках, что не учтено авторами статей.

В технико-экономических расчетах авторы допустили ряд неточностей. Так, например:

1. Цены электродвигателей, принятые в расчетах, занижены (табл. 1):

Таблица 1

Мощность электродвигателя, kW	Цены в %	
	принятые в расчете	действительные
1	100	116
5	100	140
20	100	230
50	100	200

Кроме того, отпускная цена рассматриваемых электродвигателей ниже себестоимости на 30—40%, и поэтому выводы, полученные на основе принятых в расчет заниженных цен, не соответствуют действительности.

2. Авторы приводят расчет, из которого следует, что увеличение к. п. д. в 1% на 1 установленный kW за 15-летний срок службы дает экономии 56 руб., чем оправдывается увеличение первоначальных затрат на 1 kW установленной мощности электродвигателя в 42 руб. В этом расчете не учтены сложные проценты, при учете которых в размере 5% годовых допустимое увеличение первоначальных затрат составляет только 27 руб. вместо 42 руб.

Таким образом, если на каждый установленный киловатт электродвигателей при увеличении к. п. д. на 1% в результате 15-летней эксплуатации будет получено 56 руб. экономии, то допустимое увеличение первоначальных затрат составит только 27 руб. При этом авторы не учитывают того обстоятельства, что простой арифметический подход к вопросам экономики применим не всегда и не всюду, и дополнительный рубль затрат сейчас, даже с перспективной экономией в будущем, не всегда оправдывается.

Предлагаемое увеличение веса электродвигателей резко снизило бы выпуск электродвигателей вследствие снижения производственных возможностей, что немедленно отразилось бы на темпах восстановления и развития народного хозяйства.

В 1947 г. выпуск нормальных электродвигателей по группам мощности выглядит (в %) так, табл. 2.

Таблица 2

Группа	kW	Количество, %	Габарит	Серия	Вес, kg
I	до 1	18,7	11,8	1	
II	1—2	50,2			
III	2—10	13,2	68,9	II—V	АД
IV	10—20				
	20—50	3,0	16,2	VI—VIII	МА200
	50—100				
		—	3,1	IX—X	МА200
					121—265
					375—525

Кроме того, выпуск электродвигателей мощностью от 100 до 1 000 kW составит 2,4% от количества двигателей до 100 kW.

Наиболее дефицитными являются электродвигатели III и IV группы и электродвигатели мощностью более

100 kW. Основной причиной недостаточного выпуска электродвигателей от 10 до 100 kW и выше является то обстоятельство, что они требуют для своего производства подкрановых площадей и более мощного механического оборудования.

В этих условиях принятие предложения об уменьшении мощностей электродвигателей серий АД и МА-200 вдвое привело бы, как следует из табл. 2, к снижению предельной мощности электродвигателей по всем группам, к уменьшению выпуска электродвигателей III группы, а электродвигатели мощностью более 50 kW заняли бы XI—XII габариты в группе «машин свыше 100 kW».

Таблица 3

Группа	Существует		Предлагают	
	kW	количество, %	kW	количество, %
I	до 1	11,8	до 1	30,5
II	{ 1 — 2 2 — 10	{ 18,7 50,2		
III	{ 10 — 20 20 — 50	{ 13,2 3,0	1 — 10	63,4
IV	50 — 100	3,1		

Подобное резкое снижение выпуска электродвигателей III группы и свыше 100 kW вызвало бы необходимость немедленного строительства и оснащения нескольких новых электромашиностроительных заводов, затраты на которые совершенно не учтены в экономических расчетах авторов статьи. Интересно для практической оценки подобного рода предложений привести следующий факт: одному из заводов электропромышленности было предложено освоить VI габарит электродвигателей серии «Урал» за счет снятия с производства машин IV либо V габарита. Завод после рассмотрения этого вопроса сообщил, что для замены ему необходимы: 1) комплект более мощного оборудования; 2) снижение производственного плана; 3) шестимесячный перерыв в производстве электродвигателей для организации выпуска нового габарита.

Не учтена авторами также необходимость увеличения производства электротехнической стали и обмоточных проводов примерно в 1,5 раза, что сопряжено со строительством новых металлургических и кабельных заводов.

Кроме того, значительное увеличение весов и габаритов электродвигателей вызовет увеличение размеров механизмов и станков и в ряде важнейших случаев снизит технико-экономические показатели электропривода в целом (флот, транспортные машины, встроенные электродвигатели и т. д.).

Приведенные соображения достаточно убедительно показывают несостоятельность предложения об увеличении энергетических показателей машин за счет увеличения (почти вдвое) их веса и, следовательно, габаритов.

Нормы перегрева. Нормы перегрева обмоток электромашин по отношению к температуре окружающего воздуха, равного 35° С, даны в табл. 4.

Таблица 4

Класс изоляции	Метод измерения	СССР	США—ASA		Швейцария	Германия
		ГОСТ 1941 г.	открытые	закрытые	1934 г.	1937 г.
А	По сопротивлению	65	55	65	65	60
	По термометру	60	45	60	55	—
В	По сопротивлению	85	—	85	85	80
	По термометру	75	—	80	70	—

Как следует из табл. 3, максимально допустимая температура, измеренная по сопротивлению по нормам ASA, равна:

- а) для класса изоляции А:  
открытые машины . . . . . 90°С  
закрытые машины . . . . . 100°С  
б) для класса изоляции В:  
закрытые машины . . . . . 120°С

Отечественные нормы разрешают максимально допустимую температуру обмоток электромашин, измеренных по сопротивлению:

- для класса изоляции А . . . . . 100°С  
для класса изоляции В . . . . . 120°С

вне зависимости от конструктивного исполнения машин, т. е. открытого или закрытого исполнения.

Таким образом, разница в нормах по нагреву электромашин в США и СССР относится только к машинам открытым и составляет величину в 10° С.

Приведенные В. А. Трапезниковым и Ю. С. Четочем в статье данные (табл. 1) относятся к измерению перегрева при помощи термометра, что, как известно, у нас не рекомендуется. Снижение максимально допустимой температуры меди для машин открытого исполнения американскими нормами вызвано отнюдь не стремлением повысить надежность машины, как ошибочно утверждают некоторые, а тем обстоятельством, что для этих машин допускается 15%-ная длительная перегрузка, при которой температура обмоток достигает предельно допустимого значения для закрытых машин. Очевидно, что если для закрытых, как правило, более ответственных и дорогих машин, максимальная температура меди допустима в 100° С, то тем более она допустима для нормальных, менее ответственных открытых машин. Требование снизить нормы перегрева электрических машин, основывающееся на стремлении повысить их надежность с ссылкой на американские нормы, является недоразумением.

Изоляционные материалы, применяемые для машин с классом изоляции А, как показывают исследования, должны надежно и длительно (12—15 лет) выдерживать температуру 100° С. Следовательно, требование о снижении норм перегрева на 15° С является необоснованным.

Сервис-фактор. В США открытые машины, рассчитанные по максимальной температуре обмоток в 90° С, допускают длительную 15%-ную перегрузку — так называемый сервис-фактор. В то же время все виды закрытых машин, удельный вес которых в общем машиностроении непрерывно увеличивается, такой перегрузки не допускают. Следовательно, это не является требованием правильной эксплуатации. Известно, что электродвигатели, как правило, работают с недогрузкой, при пониженном cos φ что требует установки специальных компенсирующих устройств.

В этих условиях применение машин, допускающих 15%-ную перегрузку и, следовательно, заведомо недоиспользованных, нерационально. Во всех случаях, когда механизмы по роду своей работы могут потребовать перегрузки, это должно быть учтено при выборе мощности электродвигателя. Только в случае проектирования серия защищенных и закрытых электродвигателей мощностью до 10 kW в одних и тех же габаритах, с сохранением стандартной шкалы мощности, естественно, чтобы машины защищенного исполнения, имеющие тепловой резерв, допускали длительную перегрузку.

Пусковые характеристики. Кратность моментов нашими нормами установлена: пусковой 0,9; максимальный 1,65 и минимальный 0,6. Считая эти величины несколько заниженными, Экспертный совет Министерства электропромышленности увеличивает их в задании на новые серии до значений, приведенных в табл. 5.

Таблица 5

Величина	ГОСТ	ASA	Новые серии МЭП	Предложение авторов статьи
Кратность моментов: пускового минимального максимального	0,9	1,25—1,5	1,0—1,25	1,2—1,4
	0,6	1,0	0,8—1,0	1,0
	1,65	2,0	2,0	2,0
Кратность пускового тока	7—6,5	Ненормировано	5,5—6,5	—

Предлагаемые авторами величины кратности моментов незначительно отличаются от установленных в свое время Министерством электропромышленности и поэтому сле-

циальному разбору не подвергаются. Однако, предложение авторов увеличивать кратность моментов за счет увеличения скольжения, а следовательно, потерь в роторе, не оправдано так же, как и не оправдано дальнейшее увеличение значений кратности моментов, так как предусмотрено наличие в новых сериях машин модификации с повышенным моментом для специальных электроприводов. Кратность минимального момента должна быть увеличена за счет применения более совершенных методов проектирования.

В первую очередь должны быть изменены числа пазов ротора и статора и форма пазов ротора, что даст возможность улучшить моментную кривую и снизить дополнительные потери.

**Шкала мощностей.** Американскими нормами устанавливается стандартная шкала мощностей для машин постоянного и переменного тока, закрытых и защищенных, при всех числах оборотов. При этом коэффициент нарастания мощности несколько уменьшается по мере увеличения мощностей от 1 до 100 kW. Последнее обстоятельство закономерно и объясняется тем, что при мощности до 10 kW точность выбора мощности для данного привода лежит в пределах 15—20%. При этом значение переустановочной мощности для данной машины даже при значительной ошибке невелико, вследствие чего наличие излишней модели в нижней части серии, осложняющее производство, не оправдано.

Принятое при расчете оптимального значения коэффициента нарастания мощности распределение весов годового выпуска по габаритам и средняя мощность электродвигателя до 100 kW, равная примерно 5,5 kW, нехарактерна. Известно, что средняя мощность электродвигателей, выпускаемых GE на протяжении всей войны, равнялась 2,2 kW. В Советском Союзе средняя мощность электродвигателя будет возрастать по сравнению с достигнутой в настоящее время. Таким образом, предложение об увеличении числа типов машин в диапазоне мощности от 1,6 до 8 kW является нецелесообразным.

Советские и заграничные системы имеют свои преимущества и недостатки. Основным преимуществом стандартной шкалы мощностей является удобство пользования. Однако, это достигается дополнительным расходом материалов. При проектировании новых серий электродвигателей установлена стандартная шкала мощностей для основного исполнения на 1500 об/мин. Рабочим проектированием будет проверена целесообразность применения стандартной шкалы мощностей для других значений без заметных потерь.

**Система вентиляции.** Авторы статьи предлагают перейти на радиальную систему вентиляции для электродвигателей от 1 до 100 kW, базируясь на том, что наличие независимого вентилятора является источником аварийности машин. При рассмотрении этого вопроса необходимо учесть следующее (табл. 6): применение аксиальной системы вентиляции для электродвигателей мощности до 10 kW дает возможность увеличить мощность модели на 2—3%, а при мощности машин до 100 kW до 10—25%.

Таблица 6

	Система вентиляции	
	Радиальная	Аксиальная
Мощность	100%	103—125%
Динамические характеристики	хуже	лучше
Сложность производства	меньше	более
Скорость воздуха	меньше	больше
Удобство конструктивных модификаций	ниже	выше

Машины с аксиальной вентиляцией, как правило, имеют меньший диаметр и большую длину, а следовательно, более высокие динамические характеристики. В то же время машины с радиальной системой вентиляции проще в производстве, так как не нуждаются в специальных вентиляторах, и требуют меньшее число ударов штампа. Скорость засасываемого воздуха в машинах с аксиальной вентиляцией примерно в два раза выше, чем в машинах с радиальной вентиляцией, что является недостатком аксиальной

системы вентиляции, так как при этом имеет место повышенное загрязнение.

Машины с аксиальной вентиляцией значительно удобнее для получения конструктивных модификаций производимого исполнения, закрытого и обдуваемого. Учитывая сказанное и то обстоятельство, что производство вентиляторов должно быть организовано на любом электромашиностроительном заводе, наиболее целесообразным является применение аксиальной системы вентиляции — для машин с мощностью свыше 10 kW, где пренебречь получаемой экономией материалов порядка 10—20% неразумно.

Решение поставленных задач должно идти за счет применения более совершенных изоляционных и магнитных материалов, повышения качества проектирования и конструирования, а также путем использования новейшей технологии производства.

### Доктор техн. наук, проф. С. А. ПРЕСС

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Современный электропривод характеризуется тесной конструктивной связью между электродвигателем и рабочей машиной. Электродвигатель давно уже перестал играть роль только энергетического звена машины или станка; вместе с электроаппаратурой управления двигатель имеет важнейшее значение для всего технологического процесса, для обеспечения высокой производительности и качества работы машины или станка. Поэтому при установлении технических требований для «оптимального» двигателя необходимо в первую очередь учитывать условия его работы, как части электрифицированной производственной машины.

С этой точки зрения основными требованиями к оптимальному асинхронному двигателю являются: 1) надежность и безаварийность работы, в частности в отношении механической прочности при толчках нагрузки, пусках и реверсах; 2) надлежащие электромеханические свойства — высокая кратность пускового момента (начального и минимального) и максимального момента; 3) малые габариты, что необходимо для возможности электрификации отдельных узлов и механизмов машин и станков (современный многодвигательный привод).

Последнее требование находится в резком противоречии с основным положением, выдвигаемым в статье профессоров В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета «Оптимальные асинхронные двигатели». Исходя из энергетических соображений, авторы считают нужным понизить температуру перегрева, а вместе с тем повысить вес двигателей ходовых мощностей на 38—95%. Осуществление этого предложения привело бы не только к значительному удорожанию производства самих двигателей (о чем справедливо указано в замечаниях инж. Н. А. Явлинского, Электричество, № 12, 1946), но, что еще важнее, к большим затруднениям в деле конструктивного оформления рабочих машин и станков на базе глубокой электрификации и электроавтоматизации.

Что касается экономии электрической энергии путем снижения потерь в электродвигателях, то эта экономия не может иметь существенного значения в общей системе промышленной энергетики. Уже при существующих значениях к. п. д. двигателей всеобщих серий потери энергии в электродвигателях обычно малы по сравнению с потерями в механических частях производственных машин и станков. На совещаниях по экономии электроэнергии в промышленности, происходивших в Москве и Ленинграде в 1945 г., было ясно обнаружено, что основные пути экономии энергии лежат вовсе не в повышении к. п. д. двигателей, а в усовершенствовании технологических режимов, в лучшем использовании машин и станков, в улучшении их конструкций и условий обслуживания.

Ссылка В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета на американскую практику не может считаться достаточно убедительной. В ряде статей в американских журналах за последние годы (например, статьи в журналах: El. Eng. Hellmund, № 10, 1939 г., Hobart, № 8, 1943 г. Alger и Jones, № 6, 1945 г. и др.) указывается как раз на необходимость лучшего использования электродвигателей и уменьшения их веса путем применения высокока-

чественной изоляции, улучшения вентиляции, усовершенствования механической конструкции и т. д. Именно по этому пути нам необходимо идти, вместо того чтобы ориентироваться на традиционную американскую практику, от которой в последнее время сами американцы начинают отказываться.

### Инж. С. Д. СОЛОВЬЕВ

Мосэнерго

Применение формулы Кельвина в практике проектирования линий электропередачи и интерпретация этой формулы, содержащаяся в статье А. А. Глазунова, встречают ряд замечаний. Формула Кельвина с учетом некоторых видоизменений, которые вводит в нее А. А. Глазунов, имеет следующий вид:

$$S = \alpha I \sqrt{\frac{3 \tau \beta}{10 n p}}$$

Коэффициент  $\alpha$ , введенный в формулу Кельвина А. А. Глазуновым, отражает влияние на расчетную величину экономического сечения провода двух факторов и представляет в действительности произведение двух коэффициентов  $\alpha = \alpha_1 \alpha_2$ . Численно результирующий коэффициент  $\alpha = 0,5$ .

Коэффициент  $\alpha_1$ , определяемый А. А. Глазуновым в величине  $0,8 \div 0,9$ , должен отразить правильный выбор расчетной нагрузки по линии. При определении расчетной нагрузки линии предположено, что для линий, проектируемых для питания вновь сооружаемых предприятий в неэлектрифицированном районе, начальная нагрузка составляет 20—30% от перспективной с последующим ее ростом до 100%, а для линий, проектируемых для увеличения пропускной способности существующей сети, начальная нагрузка составляет 50—60% от перспективной. Это предположение, как и прочие детальные предположения, о росте нагрузки от 40% равномерно до 100% за 5 лет и об увеличении нагрузки в последующие 5 лет до 110%, на основе которых определена величина коэффициента  $\alpha_1 = 0,9$ , являются совершенно условными. В существующей практике планирования нагрузок вряд ли можно сделать такой прогноз темпов их развития.

Следует отметить, что нагрузка транзитных линий (для которых выбор экономического сечения является наиболее актуальным) в первый период их эксплуатации бывает максимальной; в дальнейшем она уменьшается за счет роста нагрузки местного района данной электростанции или остается стабильной за счет ввода новых мощностей. Наконец, в условиях отставания сетевого строительства и мощности электростанций, от роста нагрузки потребителей, предположения, что в первые годы эксплуатации нагрузка линии будет значительно ниже максимальной расчетной нагрузки, нельзя признать реально обоснованными и имеющими общий характер.

Коэффициент  $\alpha_2$  принят в численном значении 0,6. Этот коэффициент по существу является «коэффициентом дефицитности» цветных металлов, который так не называется открыто, а вводится якобы потому, что точность технико-экономических расчетов по определению эксплуатационных расходов не может быть выше 10%. Вместе с тем, ввиду того, что минимум эксплуатационных расходов лежит в нижней части весьма пологой кривой (что, кстати сказать, присуще большинству технико-экономических расчетов), то при указанной точности расчетов, по мнению А. А. Глазунова, «нет никаких оснований из-за проблематичных ошибок увеличивать расход цветного металла», и поэтому следует идти на уменьшение сечения проводов против расчета. Однако, совершенно очевидно, что такое уменьшение сечения проводов против расчета, т. е. принятие той или другой величины коэффициента  $\alpha_2$  является весьма условным и отношения к принципу Кельвина не имеет. Далее, А. А. Глазунов предлагает принимать стоимость 1 kWh потерь электроэнергии при определении сечений проводов одинаковой «независимо от положения и условий работы линий», причем эту стоимость рекомендуется принимать на 10—15% выше средневзвешенной себестоимости электро-

энергии в крупных электрических системах СССР с продолжительностью использования установленной мощности 4 500—5 000 часов в году. С этим предложением также нельзя согласиться. Необходимо учесть, что себестоимость электроэнергии в разных крупных системах СССР неодинакова. Наибольшая себестоимость имеет место в системах, электростанции которых работают на привозном топливе; наименьшая — в системах, в балансе выработки электроэнергии которых в значительной мере участвует гидроэнергия.

Не считаться с этим, как это предлагает А. А. Глазунов, было бы ошибкой. Дело заключается не в том, что при разной себестоимости электроэнергии пришлось бы выбирать для линий с одинаковой нагрузкой и с одинаковым использованием разные сечения, а в том, что в системах с высокой себестоимостью выбор сечений проводов по предложению А. А. Глазунова привел бы к большим денежным издержкам и дополнительному расходу топлива; в то же время для систем с низкой себестоимостью были бы созданы дополнительные благоприятные условия.

Одна из основных задач размещения потребителей электроэнергии заключается в том, чтобы не создавать энергоемких потребителей в системах, дефицитных по топливу и с высокой себестоимостью электроэнергии. Зачем же в этих системах создавать дополнительное потребление электроэнергии на нагрев проводов линий электропередач?

Что касается рекомендации принимать в расчетах стоимость потерь электроэнергии на 10—15% выше себестоимости, то такая рекомендация не является верной для всех конкретных случаев расчетов.

Указанная рекомендация исходит из хорошо известного соотношения между себестоимостью электроэнергии, ее составляющими и числом часов использования установленной мощности.

Приняв приведенные в статье А. А. Глазунова соотношения, можно выразить себестоимость электроэнергии и стоимость 1 kWh потерь в следующем виде:

$$\beta_1 = a + \frac{b}{T_{yct}}$$

и

$$\beta = a + \frac{b}{T_{yct}} \cdot \frac{T_{yct}}{T_{\Delta p}}$$

где  $\beta_1$  — себестоимость электроэнергии в руб. за 1 kWh;  $\beta$  — стоимость 1 kWh потерь в руб.;  $a$  — постоянные расходы, приходящиеся на каждый выработанный киловатт-час;  $b$  — расходы, не зависящие от выработки электроэнергии, отнесенные к 1 kW установленной мощности;  $T_{yct}$  — продолжительность использования установленной мощности в течение года;  $T_{\Delta p}$  — продолжительность использования максимума потерь.

Величина  $\beta_{\Delta p}$  при расчете данной линии электропередачи является величиной  $\tau$  (время потерь).

При  $T_{yct} = T_{\Delta p}$  стоимость потерь будет равна себестоимости электроэнергии, т. е.  $\beta = \beta_1$ ; при  $T_{yct} > T_{\Delta p}$  — выше, т. е.  $\beta > \beta_1$ .

Однако, соотношение  $T_{yct} > T_{\Delta p}$  имеет место не во всех случаях.

Продолжительность использования установленной мощности может быть определена:

$$P_{yct} = \frac{P_{\max}}{P_{yct}} \cdot T_{\max}$$

где  $T_{yct}$  — продолжительность использования установленной мощности;  $T_{\max}$  — то же максимума нагрузки системы;  $P_{yct}$  — установленная мощность;  $P_{\max}$  — максимальная нагрузка системы.

Так как  $P_{\max} < P_{yct}$ , то  $T_{yct} < T_{\max}$

Продолжительность использования максимума потерь или время потерь при расчете данной линии может быть определено по известной формуле, примененной в свое время проф. А. Я. Рябковым:

$$T_{\Delta p} = \tau = 1/2 \left( T + \frac{T^2}{8760} \right),$$

где  $T_{\Delta p} = \tau$  — продолжительность использования максимума потерь или число потерь для данной линии;  $T$  — продолжительность использования максимальной (расчетной) нагрузки данной линии.

Во всех практических случаях  $\tau < T$ ; что касается величины  $T$ , то она может быть и не равна величине  $T_{\max}$ . Для транзитных линий, отходящих от базисных районных электростанций системы,  $T$  может быть заметно больше, чем  $T_{\max}$ .

Не производя дальнейших аналитических выкладок, дадим следующий числовой расчет:

$$T_{\text{уст}} = 5\,500,$$

$$T_{\text{уст}} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{уст}}} \cdot 5\,500 = \frac{P_{\max}}{1,10 \cdot P_{\max}} \cdot 5\,500 \approx 5\,000 \text{ (резерв)}$$

мощности в системе 10%).

$$T = 6\,000 \text{ (для транзитной линии),}$$

$$T_{\Delta p} = \tau = 1/2 \left( 6\,000 + \frac{6\,000^2}{8\,760} \right) \approx 5\,000 =$$

$$= a + \frac{b}{T_{\text{уст}}} \cdot \frac{5\,000}{5\,000} = a + \frac{b}{T_{\text{уст}}},$$

т. е. стоимость потерь должна быть принята в величине себестоимости электроэнергетики, но не выше.

Так как  $T$  для транзитных линий может быть значительно больше  $T_{\max}$ , то стоимость потерь может оказаться ниже себестоимости электроэнергетики.

Таким образом, утверждение, что для расчетов экономического сечения проводов линий электропередач следует принимать стоимость 1 kWh потерь на 10—15% выше себестоимости электроэнергии, не имеет общего характера, а для отдельных случаев просто неверно.

Исходя из расчетов по формуле Кельвина, А. А. Глазунов считает необходимым снизить плотности тока, рекомендуемые Техническим отделом Министерства электростанций СССР примерно на 0,25—0,50 А/мм<sup>2</sup> «с тем, чтобы они соответствовали экономическим плотностям тока для реальных условий работы сетей».

С этим нельзя согласиться, хотя бы потому, что сам метод расчета экономического сечения линии по предложенной А. А. Глазуновым формуле с обобщением и усреднением ряда расчетных данных, «независимо от положения и условий работы» проектируемой линии, наоборот, отодвигает расчет от «реальных условий» ее работы.

Экономические плотности тока по «Руководящим указаниям по проектированию сетей электрических систем», разработанным Техническим советом Министерства электростанций СССР, не следует снижать. Однако, рекомендуемые этими указаниями экономические плотности тока, по нашему мнению, следует рассматривать только как ориентир при технико-экономическом проектировании. В связи с этим приходится обратить внимание на то, что в практике проектирования, к сожалению, наблюдается стремление заменить технико-экономическое проектирование автоматическим пересчетом на принятые нормы. Следует подчеркнуть, что окончательный выбор сечения проектируемой линии должен обязательно производиться на основе технико-экономических расчетов, исходя из конкретных условий проектирования, с оценкой эксплуатационных расходов, капитальных затрат и окупаемости последних.

**Доктор техн. наук, проф. А. А. ТРУХАНОВ,**  
**кандидат техн. наук, доц. С. Ф. ШЕРШОВ,**  
**кандидат техн. наук А. С. РОЗЕНМАН,**  
**доцент И. М. ХЕЙСТЕР**

*Московский энергетический институт им. Молотова*

В статье В. А. Трапезникова и Ю. С. Чечета при выборе оптимального к. п. д. использована в основном методика, впервые разработанная ныне покойным проф. С. А. Кукель-Краевским и опубликованная в журнале «Электричество», № 8 за 1940 г. В частности, величина и вид безразмерного экономического коэффициента, приведенного авторами [формула (16) на стр. 21], заимствована из упомянутой выше работы С. А. Кукель-Краевского [Электричество, № 8, 1940, стр. 35, формула (9)]. Между тем, никаких отчетливых указаний на первоисточник, кроме упоминания статьи В. А. Трапезникова от 1941 г. (где имеется ссылка на С. А. Кукель-Краевского), не сделано.

Считаем необходимым исправить это упущение автора рассматриваемой статьи.

**Доктор техн. наук**

**проф. А. А. ГЛАЗУНОВ**

*Московский энергетический институт им. Молотова*

Существующее положение с технико-экономическими расчетами является абсолютно нетерпимым и требует немедленного проведения большой и серьезной работы. Это положение совершенно правильно подчеркивается в большинстве откликов на статью «Определение сечений проводов и жил кабелей». Не подлежит сомнению, что правильное решение технико-экономических вопросов при проектировании и эксплуатации повлечет за собой в ближайшем же время значительно более экономичную работу наших энергосистем.

Полное неблагополучие с экономическими расчетами не только в проектной практике, но и на действующих электростанциях ярко показано в статье Г. В. Сербиновского и А. М. Славского «О тарифах на электроэнергию» (Электричество, № 6, 1946). Средняя отпускная цена электроэнергии в системе Мосэнерго оказывается ниже, чем средневзвешенная себестоимость. Непонятным является и соотношение отпускных цен для ряда потребителей электроэнергии.

Одновременно целесообразно уделить внимание вопросу распределения цветных металлов между различными министерствами. Не секрет, что одной из основных причин столь высоких потерь мощности и энергии является отставание сетевого строительства по сравнению со строительством электростанций. Пропускная способность наших сетей не соответствует мощностям, проходящим по ним, в результате чего многие тысячи киловатт, установленные на электростанциях, тратятся на бесполезный нагрев наружного воздуха.

Министерство электропромышленности проявляет недопустимую неповоротливость по освоению и выпуску новейших аппаратов и устройств, отсутствие которых влечет за собой перерасход цветного металла, добавочные потери мощности и энергии и усложнение эксплуатации электротехнических установок.

В высказываниях по вопросу выбора экономически целесообразных сечений проводов и кабелей некоторые критические замечания представляются нам неправильными.

По предложению К. А. Смирнова при определении сечения проводов стоимость потерянной энергии должна приниматься различной в зависимости от продолжительности использования максимума потерь мощности, а не равной средневзвешенной себестоимости в крупных электрических системах, увеличенной на 10—15%, как было указано в статье.

Рассмотрим вначале, в каких системах выгоднее относительное увеличение сечений проводов; в системе с большой или малой продолжительностью использования максимума нагрузок.

Представим две электростанции с однотипным оборудованием, имеющие равные максимумы нагрузок, работающие в одном и том же районе, на одном и том же топливе, получаемом по одной и той же цене. Предположим



далее, что от обеих станций отходят одинаковые сети, линии которых имеют одинаковые максимумы нагрузок. Пусть одна станция работает с продолжительностью использования максимума нагрузок, равной 5 500 h, а другая с  $T_{\max} = 3\,000$  h. Ясно, что при поставленных условиях себестоимость электроэнергии на второй станции будет выше, чем на первой.

Предложение К. А. Смирнова равносильно тому, что в сети второй станции сечения провода линий должны быть выбраны с большим сечением. Для выявления ошибочности этого взгляда найдем, в какой сети увеличение сечения проводов приводит к большей реальной экономии. Дальнейшее рассмотрение поведем применительно к одной линии. При заданных условиях работы полученные выводы для одной линии полностью распространяются на все линии сети.

В сети с продолжительностью использования максимума нагрузок 3 000 h ( $\tau = 2\,000$  h) годовые потери энергии в линии составят:

$$\Delta A_1 = \frac{3 \cdot I^2 \cdot \rho \cdot l}{1\,000 \cdot S_1} \cdot 2\,000 \text{ kWh.}$$

При увеличении сечения провода на  $\Delta S$  потери энергии будут:

$$\Delta A_2 = \frac{3 \cdot I^2 \rho l}{1\,000 \cdot (S_1 + \Delta S)} \cdot 2\,000 \text{ kWh.}$$

Уменьшение потерь энергии за 1 год при увеличении сечения на  $\Delta S$  найдется как разность  $\Delta A_2$  и  $\Delta A_1$  и выражится формулой

$$\Delta A' = 3 I^2 \rho l \cdot 2 \cdot \frac{\Delta S}{S_1(S_1 + \Delta S)} \text{ kWh.} \quad (1)$$

Аналогично можем получить, что для линии с продолжительностью использования максимума нагрузок 5 500 h  $\tau = 4\,000$  h увеличение сечения на ту же величину  $\Delta S$  даст экономию в потерях энергии, равную

$$\Delta A'' = 3 I^2 \rho \cdot l \cdot 4 \cdot \frac{\Delta S}{S_2(S_2 + \Delta S)}. \quad (2)$$

Выразим в формулах (1) и (2) сечения  $S_1$  и  $S_2$  через ток нагрузки  $I$  и экономическую плотность тока  $j$ , приняв ее равной  $j_1$ , при  $T_{\max} = 3\,000$  h и  $j_2$  при  $T_{\max} = 5\,500$  h.

Подставляя эти значения в формулы (1) и (2) и вычитая одно уравнение из другого, получим:

$$\Delta A'' - \Delta A' = 3 I \rho l \left[ \frac{4 \cdot j_2^2 \cdot \Delta S}{I + j_2^2 \cdot \Delta S} - \frac{2 j_1^2 \Delta S}{I + j_1^2 \cdot \Delta S} \right]. \quad (3)$$

При равной стоимости потерянного киловаттчаса отношение

$$\frac{j_2}{j_1} = \sqrt{\frac{4\,000}{2\,000}} = \sqrt{2}.$$

Подставляя это отношение в предыдущее уравнение, получим

$$\Delta A'' - \Delta A' = 3 I \rho l \left[ \frac{4 j_2^2 \Delta S}{I + j_2 \Delta S} - \frac{4 j_2^2 \Delta S}{I + 2 j_2 \Delta S} \right], \quad (4)$$

т. е. разность  $\Delta A'' - \Delta A'$  будет величиной положительной.

Таким образом, увеличение сечения проводов и кабелей на линиях с большей продолжительностью использования максимума нагрузок приводит к большей экономии потерь энергии в линии, что означает и большую реальную экономию топлива.

Приведенные рассуждения и расчеты полностью применимы и к вопросу о стоимости потерянной энергии при определении экономически целесообразных сечений проводов и кабелей. Они ясно показывают, что с народнохозяйственной точки зрения при большей продолжительности использования максимума потерь мощности необходимо большее относительное увеличение сечения проводов, т. е. обратное предложению К. А. Смирнова. По его предложению в системах с пиковым характером графика нагрузок относительное увеличение сечения проводов долж-

но быть большим, чем для систем с постоянным графиком нагрузки в течение всего года.

Кроме того, необходимо указать и на принципиальную ошибочность предложения К. А. Смирнова. Стоимость потерянной энергии безусловно должна приниматься выше средневзвешенной себестоимости электроэнергии в системе. Однако, неправильно будет полностью распространять на потери энергии рассуждения, применимые к любому потребителю. Определяющим в стоимости потерянной энергии фактором является потеря мощности. При заданной потере мощности выгоднее иметь меньшую продолжительность использования максимума потерь мощности, поскольку это соответствует меньшему количеству бесполезно израсходованного топлива. Увеличение продолжительности использования максимума нагрузок потребителей, наоборот, увеличивает экономичность работы станций.

Укажем попутно, что вносить в формулу (2), приведенную в замечаниях К. А. Смирнова, если считать ее правильной, нужно не  $\tau$ , а  $T_{\Delta p}$  — продолжительность использования установленной мощности на станции, предназначенной для покрытия потерь в сети, как это сделано в статье. В формулу определения стоимости энергии

$$\beta = a + \frac{b}{T_{\text{сум}}} \quad (5)$$

входит не продолжительность использования максимума нагрузки, а продолжительность использования установленной мощности. Последняя величина включает в себя и резерв мощности в системе. Возможно, что получившееся недоразумение обусловлено неточностью редакции, допущенной в статье.

Приведенные ранее рассуждения и выводы распространяются также и на выбор сечений проводов и кабелей в различных звеньях системы. Чем ближе данный участок сети к потребителю, тем меньше продолжительность использования максимума нагрузки линии. Следовательно, добавочные вложения цветного металла в эти линии менее эффективны, чем в головные участки сети. Увеличение сечения проводов основной сети приведет к большему удешевлению стоимости электроэнергии у потребителей, чем увеличение сечений в последующих звеньях системы. Не следует забывать, что увеличение стоимости энергии в последующих звеньях электрических систем во многом определяется не стоимостью потерянной энергии, а рядом других расходов, практически не связанных с сечением проводов.

В связи с замечаниями К. А. Смирнова необходимо указать, что при разработке вопросов, освещенных в статье, мы исходили из положения о необходимости корректировки принятых Министерством электростанций плотностей тока для выбора экономически целесообразных сечений проводов и кабелей. Результатом этого подхода и явилась рекомендация однозначного решения независимо от положения системы. Для систем, имеющих резкие специфические условия, выбор сечения проводов должен производиться с учетом этих особенностей. Например, в системах со станциями, работающими на привозном топливе, стоимость электроэнергии должна приниматься более высокой, чем в системах, использующих местные топливные ресурсы.

Замечания С. Д. Соловьева о том, что для некоторых линий продолжительность использования установленной мощности, предназначенной для покрытия потерь в линии, может быть выше, чем продолжительность использования установленной мощности на электростанциях, неубедительны, так как такое соотношение практически встречается очень редко. Это объясняется исключительно высоким использованием установленной мощности в наших системах. Даже для примера, взятого С. Д. Соловьевым, при таком высоком  $T$ , как 6 000 h, себестоимость энергии, идущей на покрытие потерь, будет больше средневзвешенной стоимости электроэнергии. В расчет С. Д. Соловьева необходимо внести поправку. Он принимает продолжительность использования максимума потерь мощности, равной продолжительности использования установленной мощности, идущей на покрытие потерь мощности. Между тем, при резерве в системе, равном 10%, продолжительность использования установленной мощности для

покрытия потерь будет на 10% меньше продолжительности использования максимума потерь мощности ( $\tau$ ).

Большие возражения вызвал предложенный коэффициент, учитывающий неточность исходных проектных данных. Безусловно, могут быть случаи, когда коэффициент будет иметь другое значение, чем то, которое указано в статье. Предложенный коэффициент относится к средним условиям проектирования.

С указаниями о том, что введение коэффициента  $\alpha$  есть не что иное, как учет дефицитности цветных металлов, согласиться никак нельзя. Каждый опытный проектировщик знает, насколько неточны данные, которые кладутся в основу составления проектов сетей. Поэтому гнаться за точностью окончательных расчетов с допущениями, меньшими чем 10%, не следует.

### Экономические плотности тока для воздушных и кабельных линий

Материал проводов и жил кабелей	Продолжительность использования максимума нагрузки в год в часах				
	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
Линии с медными проводами и кабели с медными жилами	1,7—2,4	1,3—1,8	1,1—1,5	0,95—1,3	0,8—1,1
Линии с алюминиевыми проводами	1,1—1,5	0,8—1,15	0,7—1,0	0,6—0,83	0,5—0,7

Кроме того, нагрузки сети относительно быстро изменяются, что вызывает изменение потоков мощностей по линиям. Такое же влияние на изменение потоков мощностей по линиям сети оказывает сооружение в системе новых станций, которые не принимались в расчет при проектировании сети. К сказанному следует прибавить, что появление новых, более простых аппаратов при правильном подходе к решению вопросов должно повлиять на коммутацию системы и на более широкое внедрение повышенных напряжений.

Принимая во внимание все указанные положения, нельзя строить сети с двойным расходом цветного металла из-за возможных проблематичных экономических выгод. Лишние затраты металла не будут оправданы и, безусловно, поведут к задержке внедрения новых технических достижений, дающих значительные экономические преимущества.

Для уточнения расчетов может быть целесообразно установить не одну шкалу средних плотностей тока, а дать два предела, соответствующие значениям  $\alpha$  равным 0,5 и 0,7. При этом экономические плотности тока определяются равными, приведенными в таблице.

Низкие плотности тока можно рекомендовать для систем с высокой стоимостью электроэнергии и при наличии вполне определенных нагрузок линий.

Остановившись на замечаниях члена-корреспондента Академии наук СССР И. С. Брука, приходится констатировать полную неясность его предложения. Почему он считает, что до настоящего времени не учитывались расходы, связанные с потерей мощности при определении сечения проводов? Необходимость учета расходов, определяемых потерями мощности, признавалась огромным большинством инженеров. При чтении его замечаний, естественно, возникает вопрос, что дает «верхняя граница» плотности тока, подсчитанная по наименьшим капитальным затратам? Ведь эта величина даже не может служить каким-либо критерием.

По мнению С. Ф. Шершова, формула Кельвина принципиально не позволяет учесть влияния величины первоначальных затрат, кроме амортизационных отчислений. Нам представляется это неправильным. Учет того или иного фактора в формуле Кельвина будет определяться значениями, которые будут приданы некоторым величинам, входящим в эту формулу. Например, предположим, что под  $\beta$  понимается:

- 1) топливная составляющая стоимость киловаттчаса;
- 2) полная стоимость киловаттчаса в системе, увеличенная на 10—15%;
- 3) стоимость киловаттчаса с учетом эффективности капиталовложений на сооружение станции.

Ясно, что в первом случае вообще не учитываются затраты на сооружение станции. Во втором случае учиты-

вается амортизация станционных сооружений. В третьем случае будет полностью учтено и влияние величины первоначальных затрат.

Также широко можно трактовать значение величины  $\beta$ , понимая под ней только отчисления на амортизацию и ремонт, или с добавлением отчислений на расширенное воспроизводство и погашение капитала и т. д.

Приведенная С. Ф. Шершовым формула, позволяющая, по его мнению, учесть влияние увеличения производительности труда, к сожалению, не может быть проанализирована из-за краткости изложения. Однако, результаты, получаемые по этой формуле, характеризуют ее непригодность для расчетов. Согласно данным приведенной С. Ф. Шершовым таблицы учет повышения производительности труда якобы позволяет принимать сечения проводов вдвое

меньшими, чем получаемые по формуле Кельвина.

Снижению вдвое сечений проводов должно соответствовать снижение вдвое стоимости станций, топлива и эксплуатационных расходов на станциях. Если же учесть, что повышение производительности труда определяет аналогичное снижение стоимости линий и их эксплуатации, то стоимость энергии на станциях должна в течение 10—15 лет уменьшиться более чем в три раза. Последнее явно недостижимо.

При учете повышения производительности труда в промышленности, обслуживаемой электрическими системами, безусловно придется прийти к выводу, что сечения проводов должны выбираться близкими к получаемым по формуле Кельвина, а не сниженными. Каждый добавочный киловатт мощности, отданный промышленности, при высокой производительности труда и новейшем техническом оснащении заводов даст большой народнохозяйственный эффект. Каждый добавочный киловаттчас позволит увеличить выпуск продукции фабрик и заводов.

Очень серьезные вопросы, связанные с отсутствием установленной методики технико-экономических расчетов и отсутствием установленных исходных данных при расчетах, поставлены А. И. Колпаковой. Можно с ней согласиться, что неясность ряда предпосылок и неопределенность исходных данных зачастую низводит технико-экономические расчеты к простым арифметическим действиям.

В заключение еще раз подчеркнем, что оживленная дискуссия по выбору экономически целесообразных сечений проводов показала большую актуальность этого вопроса и необходимость установления научно обоснованной методики и исходных величин для технико-экономических расчетов.

**Доктор техн. наук,  
проф. В. А. ТРАПЕЗНИКОВ,  
доктор техн. наук, проф.  
Ю. С. ЧЕЧЕТ**

Соображение о необходимости улучшения характеристик двигателей поддержали все авторы замечаний, высказав при этом различные суждения о путях этих улучшений.

Требование инж. Н. А. Явлинского и кандидата техн. наук М. Ю. Шухатовича об улучшении характеристики двигателей только за счет качества материалов и рационального проектирования машин (снижение дополнительных потерь и т. п.) неправильно, так как для повышения к. п. д. и  $\cos \varphi$  следует использовать все пути, и в том числе — снижение электромагнитных нагрузок

материала ( $B$  и  $\Delta$ ) с дополнительными затратами материала.

Не менее ошибочно замечание проф. С. А. Пресса о необходимости лишь совершенствовать технологические режимы станков и не заниматься вопросами повышения к. п. д. двигателей.

Повышать качество материалов, более рационально проектировать двигатели и улучшать технологические режимы станков следует вне зависимости от величин электромагнитных нагрузок и от изменения веса машин.

Сомнения может вызвать лишь целесообразность повышения к. п. д., связанного с дополнительной затратой материала. Этому вопросу уделено значительное внимание в нашей работе и на основе технико-экономического анализа показано, что повышение к. п. д. двигателей за счет дополнительного вложения материала экономически оправдано. Если качество материалов и улучшенные методы проектирования обеспечат дополнительное увеличение к. п. д., то экономически выгодный к. п. д. будет лежать еще выше, чем к. п. д., рекомендованный в нашей работе.

Что касается замечания проф. С. А. Пресса о том, что наше предложение идет вразрез с последними американскими тенденциями снижения веса машин, следует отметить, что хотя американская практика возможно и зашла слишком далеко по пути вложения материала и условия текущего момента заставляют американские фирмы снижать веса машин, однако мы не должны слепо копировать американскую практику, и наши предложения базируются на анализе условий отечественной экономики, а этот анализ говорит о целесообразности повышения к. п. д. за счет вложения материала.

Н. А. Явлинский указывает, что затраты труда на единицу веса машины растут быстрее, чем увеличение ее общего веса, и отсюда приходит к выводу, что рекомендуемый нами повышенный к. п. д. и добавочное вложение материала будет иметь результатом «увеличение, по крайней мере вдвое, количества рабочих, занятых в производстве электродвигателей». Этот вывод ошибочен, что видно из следующих элементарных соображений.

Трудоемкость ( $A$ ) большинства технологических операций может быть выражена приближенной формулой:

$$A = M + NG_0^\alpha,$$

где  $M$  — трудоемкость вспомогательных операций, не зависящая от веса обрабатываемой детали;  $G_0$  — вес детали;  $N$  — постоянный коэффициент;  $\alpha$  — показатель степени, обычно меньше единицы.

Отсюда видно, что при увеличении веса детали ( $G_0$ ) стоимость ее обработки, отнесенная к единице веса ( $\frac{A}{G_0}$ ), уменьшается. Это подтверждается и таблицей, дающей себестоимость двигателей АД и МА-200 за 1940 г. (усредненные данные).

Мощность при $2p=4$ , kW	Вес двигателя, kg	Себестоимость единицы веса двигателя, %
1	24	100
2	33	88
5	58	71
10	88	62
20	149	54
50	205	47

Предлагаемое нами дополнительное вложение материала приводит к увеличению веса машин в среднем на 50% (соответственно средней мощности двигателя 5 kW) и к увеличению линейных размеров машин на 15%. При увеличении веса двигателя на 50% его стоимость возрастает примерно на 32%. Если учесть, что стоимость материала двигателя, составляющая 30—50% общей стоимости машины, пропорциональна его весу, то окажется, что стоимость рабочей силы и соответственно количество рабочих, занятых в производстве электродвигателей, увеличится лишь на 15—25% (не следует забывать, что при этом одновременно снизится количество рабочих, занятых в других отраслях электропромышленности, а также в других отраслях народного хозяйства).

Таким образом, основной довод Н. А. Явлинского против вложения материала в двигатели оказывается несостоятельным.

Не основательно и опасение проф. С. А. Пресса о том, что увеличение веса двигателей создаст затруднения при конструировании рабочих машин и станков, так как увеличение линейных размеров двигателя общего применения на 15% конструктивных затруднений вызвать не может, тем более, что действительное возрастание веса и размеров машин будет меньше указанного в нашей статье, где мы из осторожности не учитывали дополнительного резерва, появляющегося при повышении к. п. д. (уменьшение индукции освободит от ряда ограничений, налагаемых насыщением стали, позволит более рационально выбрать геометрию машин и за счет этого относительно уменьшить вес двигателей).

Ряд замечаний был сделан о нецелесообразности снижения перегрева обмоток двигателей, поскольку современные виды изоляции достаточно теплостойки. Однако, в нашем предложении по улучшению двигателей снижение температуры не является самоцелью, требующей вложения материала или других затрат. Наоборот, при рекомендуемом уменьшении электромагнитных нагрузок перегрев обмотки сам собой снизится примерно до 45°С, даже при переходе с аксиальной на менее интенсивную радиальную систему вентиляции. При этом будет автоматически обеспечена возможность длительных перегрузок двигателя на 15% без опасности повреждения обмотки, а также увеличится и надежность работы машин.

Не следует забывать, что при этом возрастет и к. п. д. двигателя благодаря уменьшению удельного сопротивления меди. Полагая среднюю нагрузку двигателя  $P_{cp} = 0,7 \cdot P_n$ , можно показать, что за счет снижения перегрева обмотки с 65 до 45°С (при  $P = P_n$ ) к. п. д. машины мощностью 5 kW в эксплуатационных условиях увеличится примерно на 0,2%. Поэтому снижение нагрева, получаемое как «бесплатное приложение» к увеличению к. п. д. машины, безусловно целесообразно.

Выбор мощности двигателя расчетным путем в большинстве случаев не может быть сделан с необходимой точностью. Поэтому проектировщики, не доверяя точности расчета и зная, что в соответствии со стандартом наши двигатели не выдерживают длительных перегрузок, часто выбирают модель двигателя большую, чем это необходимо. Это приводит к излишнему «переустановлению» мощности и к работе двигателя на неблагоприятном участке его характеристики.

Если двигатель сможет длительно выдерживать 15% перегрузку, то во многих случаях надобность в выборе модели с запасом мощности отпадет.

Поскольку способность к длительной перегрузке также получается в виде «бесплатного приложения» к снижению перегрева, т. е. в конечном счете к повышению к. п. д. двигателей, а возможность длительных перегрузок, несомненно, облегчает выбор и эксплуатацию машин, то не видно причин отказываться от введения коэффициента длительных перегрузок.

При обсуждении вопроса об оптимальных двигателях был сделан ряд правильных и существенных замечаний об необходимости повышения  $\cos \varphi$  при частичных нагрузках двигателя. Этот вопрос был затронут и нами в связи с выбором оптимальных пусковых токов (рис. 5) и решен на базе понятия об «эффективных» потерях, учитывающих как активную, так и реактивную мощность, потребляемую двигателем. Принятая нами методика показывает, что, выбрав оптимальную кратность пускового тока двигателей, мы тем самым предпешем и благоприятный характер изменения  $\cos \varphi$  при частичных нагрузках.

Необходимо отдельно остановиться на замечаниях начальника Главэлектромашипрома Министерства электропромышленности СССР А. И. Бергинова, который отстаивает техническую политику, направленную к предельному сокращению веса машин. На первый взгляд такая политика может показаться передовой и прогрессивной, на самом же деле эта политика, продиктованная стремлением облегчить снабжение заводов материалами и погоной за рекордными весами, неизбежно приводит и, как показал опыт последних лет, уже привела к выпуску двигателей с пониженной надежностью и к перерасходу электроэнергии.

А. И. Бертинов полагает, что к. п. д. двигателя при номинальном режиме не имеет существенного значения, так как его потери определяются, главным образом, к. п. д. при пусковом режиме. Это утверждение, отнесенное к двигателям широкого применения, неверно, более того, оно вредно, так как отвлекает проектировщиков от работы над повышением к. п. д. двигателей.

Как показывает статистика, в эксплуатационных условиях средняя нагрузка  $P_{ср}$  двигателя широкого применения составляет около  $P_{ср} = 0,7 P_n$ , следовательно, потери двигателя определяются потерями при этой и близких к ней нагрузках (методика определения потерь двигателя при эксплуатационных нагрузках с учетом потерь от реактивной составляющей дана в нашей работе на рис. 2—5).

Соображение же о потерях двигателя при пуске говорит в пользу повышения к. п. д. Действительно, потери в меди статора за время пуска

$$A_{mn} = P_{м1} \int_0^T \left( \frac{I}{I_n} \right)^2 dt,$$

где  $\frac{I}{I_n}$  — кратность тока в процессе пуска и  $P_{м1}$  — потери в меди статора при номинальной нагрузке.

Мы предлагаем значительно уменьшить кратность пускового тока ( $\frac{I_k}{I_n} = 5 \div 6,5$ , см. рис. 5), уменьшить плотность тока  $\Delta$ , благодаря чему сократятся потери в меди  $P_{м1}$  и увеличить кратность пускового момента, тем самым улучшив форму кривой моментов и несколько уменьшив время пуска двигателя  $T$ .

Как видно из приведенного выражения, наши предложения сопровождаются уменьшением пусковых потерь статора. Пусковые потери в роторе в условиях запуска двигателя под нагрузкой останутся примерно на том же уровне вследствие улучшения формы кривой моментов, сопровождающегося, однако, возрастанием махового момента ротора. В результате общие пусковые потери двигателя, построенного в соответствии с нашими предложениями, сохранятся прежними или даже несколько сократятся.

Таким образом, соображение А. И. Бертинова о том, что повышение к. п. д. двигателя не может существенно сократить расход электроэнергии, является несостоятельным.

Точно так же несостоятельно и его утверждение о недоучете характера кривой  $\cos \varphi$  при недогрузках, ибо этот вопрос решен нами на основе рис. 2—5.

По поводу использования А. И. Бертиновым якобы сделанного нами расчета, «из которого следует, что увеличение к. п. д. в 1% на один установленный киловатт за 15-летний срок службы дает экономию 56 руб., чем оправдывается увеличение первоначальных затрат на 1 kW установленной мощности электродвигателя в 42 руб.», следует сделать ряд замечаний.

В наших расчетах приняты не отпускные цены, а заводская себестоимость двигателей за 1940 г. (по данным Главэлектромашпрома), уменьшенная на 10%, так как переход на радиальную вентиляцию и улучшенная технология позволяют рассчитывать на такое снижение себестоимости двигателей. Себестоимость двигателей, так же как и себестоимость энергии и стоимость станций, взятые за 1940 г., являющийся последним предвоенным годом с установившимся соотношением цен. Разрушения, причиненные нашему хозяйству войной, вывели из строя ряд предприятий (некоторые из них были перебазированы), и текущие цены, на которые ссылается А. И. Бертинов, нельзя класть в основу расчетов будущей экономики.

Несомненно, что соотношение стоимостей двигателей, станций и электроэнергии после восстановления и расширения нашей промышленности, на которое и следует ориентироваться, окажется ближе к их предвоенному соотношению, чем к соотношению современных цен. Но, даже если принять стоимость двигателей, указываемую А. И. Бертиновым, и учесть современную стоимость станций и электроэнергии, то экономия от повышения к. п. д. окажется не меньшей, чем приведенная нами в таблице 3.

Способ расчета, применяемый в капиталистических странах (сложные проценты), предлагаемый А. И. Бертиновым, в наших условиях не может дать удовлетворительного ответа. Но и учет сложных процентов обратился бы против утверждения А. И. Бертинова по следующим причинам: в результате повышения к. п. д. двигателей уменьшаются не только эксплуатационные, но и первоначальные затраты на всю систему. Следовательно, при учете сложных процентов экономия на первоначальных затратах в течение 15 лет составила бы не 8,8 руб., как это вытекает из нашего расчета, а 13,8 руб., т. е. экономический эффект был бы еще большим, чем мы его определили. (Нельзя забывать о возможности присоединения к станциям дополнительных потребителей при уменьшении потерь в двигателях, что эквивалентно снижению установленной мощности станции, приходящейся на единицу мощности двигателя, при повышении его к. п. д.)

Цифры, приводимые А. И. Бертиновым, получены в результате его собственных выкладок, к нашим расчетам они отношения не имеют; в самом деле, по данным А. И. Бертинова, при увеличении к. п. д. на 1% увеличение первоначальных затрат составляет 42,0 руб. за 1 kW и полная экономия за 15 лет составляет 56,0 руб. за 1 kW, тогда как по нашим расчетам для двигателя средней мощности 5 kW при увеличении к. п. д. на 1,6% сокращение первоначальных затрат составляет 8,8 руб. за 1 kW и экономия за 15 лет составляет 51,8 руб. за 1 kW.

А. И. Бертинов подвергает сомнению правильность нашего технико-экономического анализа, называя его «арифметическим подходом к экономическим вопросам», т. е. смещением капитальных и эксплуатационных затрат. Это утверждение — результат невнимательного чтения нашей работы: мы четко разделяем оба вида затрат и показываем, что повышение к. п. д. двигателя сопровождается снижением не только эксплуатационных, но и капитальных затрат на систему.

Рассматривая вопросы производства, А. И. Бертинов доказывает, что возрастание веса двигателей, связанное с увеличением к. п. д., резко снизит их выпуск и заставит построить ряд новых заводов.

Эти опасения явно преувеличены. Прирост веса двигателей составит не 75%, как утверждает А. И. Бертинов. В табл. 2 нашей работы указано, что для наиболее распространенных двигателей мощностью 5 kW, построенных на базе прежних электротехнических материалов, прирост веса составит 50%. Если учесть использование новых, более совершенных материалов, увеличение веса будет еще меньшим. Увеличение к. п. д. будет сопровождаться возрастанием линейных размеров машин всего лишь на 15%, что, разумеется, не может вызвать необходимости переоборудования заводов (отказ одного из заводов от освоения VI габарита серии «Урал», на что ссылается А. И. Бертинов, не показателен). Не существует технической обоснованной границы между машинами II и III группы (ниже и выше 10 kW), переход через которую вызывает у А. И. Бертинова опасения. Исторически эта граница обусловлена размещением выпуска машин между заводами: завод «Электросила», строил машины АД мощностью ниже 10 kW, завод ХЭТЗ — машины МА-200 мощностью свыше 10 kW, причем организация технологического процесса на этих заводах была различной. Переход части двигателей из II в III группу не представляет опасности, так как в текущей пятилетке организация технологического процесса и распределение выпускаемых двигателей между заводами могут быть сделаны более рационально, чем в довоенное время. Как видно из нашей работы и из работы проф. П. Г. Грудинского, повышение к. п. д. двигателей не сопровождается ощутимым изменением расхода металлов на систему, поэтому опасения А. И. Бертинова о перегрузке кабельных заводов также не основательны.

Все эти соображения говорят о том, что повышение к. п. д. двигателей никакой опасности не представляет, хотя и приведет к небольшим затруднениям для Министерства электропромышленности. Однако, эти временные затруднения должны быть преодолены, ибо увеличение к. п. д. двигателей экономично для народного хозяйства в целом.

Возражения А. И. Бертинова против снижения перегрева и введения сервис-фактора являются следствием его

основного возражения против повышения к. п. д., и наши замечания по этому вопросу изложены выше.

Критикуя предложение об уменьшении коэффициента нарастания мощности, А. И. Бертинов сослался лишь на практику США и не привел обоснованных возражений против нашего предложения, подкрепленного цифрами, взятыми из практики отечественного электромашиностроения. Поэтому наше предложение остается в силе.

А. И. Бертинов считает целесообразным строить машины широкого применения мощностью свыше 10 kW с аксиальной вентиляцией, якобы дающей экономии материалов 10—20%. Посмотрим, так ли это. При использовании одних и тех же материалов и методов расчета экономия материалов может быть получена за счет двух факторов: а) повышенных электромагнитных нагрузок и б) рациональных геометрических форм машины.

Аксиальная вентиляция обеспечивает более интенсивный теплообмен и возможность больших электромагнитных нагрузок материала. Но в нашей работе доказана необходимость снижения электромагнитных нагрузок, и, таким образом, этот источник экономии материалов отпадает.

При радиальной системе вентиляции и предельном использовании материалов для обеспечения необходимого теплообмена иногда приходится увеличивать диаметр железа и уменьшать его длину, отступая от оптимальных геометрических форм. В этих случаях аксиальная вентиляция, обладающая лучшей охлаждающей способностью, позволяет сохранить оптимальную геометрию машины и за счет этого получить экономии материалов. Однако, при рекомендуемом нами снижении нагрузок фактор нагрева перестает играть решающую роль и рациональные формы машины могут быть соблюдены и при радиальной вентиляции. Таким образом, если строить машины с высоким к. п. д., второй источник экономии материалов также отпадает.

Вместе с тем радиальная система вентиляции позволяет увеличить к. п. д. машины за счет снижения вентиляционных потерь  $\rho_g$ . Как известно,  $\rho_g \equiv Qv_g$ , где  $Q$  — расход охлаждающего воздуха и  $v_g$  — окружная скорость вентилятора. При радиальной системе вентиляции окружная скорость вентилятора значительно меньше, чем при аксиальной, поэтому и потери на вентиляцию здесь оказываются в 1,5—2 раза меньшими. Это является дополнительным аргументом в пользу радиальной системы вентиляции двигателей, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками.

Подводя итог сделанным замечаниям, можно сказать, что наше основное предложение об улучшении к. п. д. и  $\cos \varphi$  двигателей не встретило возражений, подкрепленных цифровыми данными. В то же время, несмотря на значительный народнохозяйственный эффект от повышения к. п. д. и  $\cos \varphi$  двигателей, выражающийся в снижении их аварийности, сокращении капитальных вложений и эксплуатационных расходов, в электропромышленности проектируется новая серия двигателей переменного тока общего применения с к. п. д., мало отличающимся от предусмотренных старым стандартом (186-41). Как следствие этого, не учтены и другие возможности улучшения свойств двигателей, в частности возможность их длительной перегрузки на 15%.

Министерство электропромышленности СССР должно принять меры к исправлению этой ошибки, ибо дело идет об экономии для народного хозяйства многих десятков миллионов рублей.

\* \* \*

По поводу замечания А. А. Труханова, С. Ф. Шершова, И. М. Хейстера и А. С. Розенмана считаем необходимым сообщить, что наша статья «Оптимальные асинхронные двигатели» (Электричество, № 6, 1946) основана на работе В. А. Трапезникова «Оптимальный к. п. д. электрических машин» (Электричество, № 3, 1941), в которой использован метод проф. С. А. Кукель-Краевского, о чем в статье имеются исчерпывающие ссылки. В связи с этим мы сочли излишним повторять их вновь в последующей работе.

Экономический коэффициент  $\chi$  отличается от коэффициента  $\chi$  проф. С. А. Кукель-Краевского тем, что здесь стоимость энергии  $\mathcal{E}_0$  не включает амортизационных отчислений. Этим уточняется расчет.

## Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ

Московский энергетический институт им. Молотова

При обсуждении статей (Электричество № 6, 1946) наибольшее внимание высказывающихся привлекло применение и толкование проф. А. А. Глазуновым формулы Кельвина, что в значительной мере заслонило вопрос о снижении плотности тока в проводах линий электропередачи. Большинство высказывающихся стремится получить от этой формулы точный и однозначный ответ, указывающий наивыгоднейшее сечение для каждой данной линии индивидуально. Нам кажется, что как бы мы ни уточняли исходные положения и цены, результаты подсчетов по формуле Кельвина могут дать только направление, в котором следует идти при определении наивыгоднейшей плотности тока. Формула не учитывает, что после определенного увеличения сечения приходится переходить на большее число линий, не учитывает изменения конструкции опор при значительном уменьшении плотности тока и поэтому дает в ряде случаев практически неприемлемые решения. Нам представляется, что плотности тока в линиях должны быть унифицированы, как унифицированы цены на многие материалы.

Министерство электростанций, взвесив результаты подсчетов по формуле Кельвина и техническую сторону вопроса, установило определенные нормы для плотности тока в зависимости от числа часов использования линии. Пользование этими нормами просто и удобно, в то время, как все другие предложенные в дискуссии способы, не обладающие последними свойствами, только по внешности могут казаться более обоснованными. Ссылка на дефицитность цветных металлов при существующем и развивающемся в нашей стране производстве алюминия не должна иметь места, и применение понятия «медь» в отношении воздушных линий должно быть вытеснено термином «алюминий».

Во всех опубликованных замечаниях подтверждается необходимость самого пристального внимания вопросам снижения потерь энергии, но в ряде случаев предлагаемые в статьях решения вызывают возражения. Так, например, одобряя тенденцию к повышению напряжения для передачи и распределения энергии, Г. В. Сербиновский и Ю. Н. Баскаков возражают против введения промежуточных напряжений, опасаясь, что в некоторых случаях «экономию ради» проектирующие организации постараются «сбойтись» промежуточным, низким напряжением. Несомненно, что случаи неправильного использования расширенной шкалы возможны, но вряд ли об этом стоит говорить, если практика и расчеты подтверждают целесообразность перехода на промежуточную ступень для очень большого числа линий, в том числе для таких районов, как Урал, Донбасс, Казахстан, Башкирия и др.

В данный момент спор о том, вводить или нет промежуточные ступени напряжения, становится, по существу, беспредметным, так как много новых установок уже сооружаются на напряжениях 60, 20 и 15 kV. Введение промежуточных напряжений, безусловно, сопряжено с известными трудностями для электропромышленности, но это трудности не материального, а организационного порядка. До тех пор пока промышленность только приступила к освоению нового производства, как это было в первую пятилетку, небольшое число ступеней в шкале способствовало развитию электрификации и ускорило его; при масштабах электростроительства текущей и следующей пятилеток узкость шкалы напряжений становится тормозящим фактором.

При выборе промежуточных напряжений особенного внимания заслуживает среднее напряжение в интервале 20—15 kV. Наше предложение о выборе для этого диапазона 17,5 kV некоторыми признается неудачным, в частности, потому, что это напряжение при умножении на  $\sqrt{3}$  не дает значения следующего напряжения — 35 kV (см. замечания А. Б. Крикуничика). Нам кажется гораздо более важным, чтобы выбранное напряжение при делении на  $\sqrt{3}$  давало бы напряжение предыдущей нижней ступени — 10 kV, что позволит развить однофазные сети 10 kV, втрое удешевляющие электрификацию сельского хозяйства, пригородов и жилых массивов городов. Кроме того, это напряжение вдвое меньше напряжения 35 kV,

что обеспечивает наивыгоднейшие условия для применения автотрансформаторов, в частности, при непосредственном их соединении с генераторами, если вместо напряжения 15 kV, имеющегося в стандарте, будет принято напряжение 17,5 kV. Наконец, напряжение 17,5 kV является средним между 20 и 15 kV, что позволяет иметь общее оборудование для этих трех напряжений. Отметим, что для полного использования всех преимуществ, которые может дать напряжение 17,5 kV, необходимо перейти на работу с заземленной нейтралью как на этом напряжении, так и на напряжении 35 kV, и мы надеемся, что нам в скором времени удастся на страницах этого журнала доказать целесообразность выдвигаемого положения.

Наше предложение об изменении схем коммутации сетей и станций в сторону приближения высокого напряжения к потребителю в части своих конструктивных форм встретило возражения со стороны представителей Мосэнерго — инж. Г. В. Сербиновского и инж. Ю. Н. Баскакова. Мы не можем признать обоснованность этих возражений, особенно утверждение о выгоде использования напряжения 6 kV в случаях протяженной сети, питающей обычно наряду с крупными электродвигателями и другие приемники». К сожалению, такое убеждение является широко распространенным, и именно против него мы энергично возражали в своей статье. Очень жаль, что Г. В. Сербиновский и Ю. Н. Баскаков ничем не подтвердили своего мнения и не опровергли ни одного из доводов, приведенных в пользу замены обычных для нас «протяженных» сетей 6 и 10 kV сетями 35—3 kV, из которых первые (35 kV) берут на себя функции передачи, а последние (3 kV) — распределения энергии.

Недостаточно обоснованными представляются нам и рассуждения тех же авторов о схемах с повышенным использованием выключателей, в том числе о схемах «многоугольника», не имеющих сборных шин. Мы предлагали такие схемы применять для части подстанций, в первую очередь для подстанций с ограниченным числом линий и трансформаторов. Может быть было бы правильнее и точнее указать число объектов подстанции, при которых эти схемы особенно выгодны, ограничив их двумя линиями и двумя трансформаторами. Во всяком случае, из статьи ясно, что вопрос о полном переходе на схемы с повышенным использованием выключателей нами не ставился и мы такую постановку считаем неправильной, как неправильно предложение о применении для всех подстанций схемы с двумя сборными шинами и с одним выключателем на цепь, к чему сводятся по существу высказывания Г. В. Сербиновского и Ю. Н. Баскакова. В Мосэнерго довольно много, а в других системах еще больше, подстанций с двумя линиями и с двумя трансформаторами. Если бы обычную для них схему с пятью выключателями заменить схемой четырехугольника с тремя выключателями, являющейся одной из типовых схем Британской сетки 132 kV, то потребность в дорогом оборудовании, каким являются выключатели 110 kV, была бы снижена на 40%, надежность же электроснабжения потребителей значительно возросла бы. В то же время число повреждений оборудования снизится, так как уменьшится число выключателей. Подстанция станет много компактнее, ее можно будет приблизить к центрам нагрузок. Если бы возникла необходимость расширения подстанции, оно может быть сделано или по схеме рис. 9 нашей статьи или путем сооружения новой подстанции по упрощенной схеме, что позволит удешевить вторичную сеть. Напрасно авторы замечаний ссылаются на существующий у нас порядок финансирования сооружения подстанций за счет средств потребителей, как на помеху в введении новых схем коммутации; при всех условиях планирование развития системы производится в основном самой системой. Помехой внедрения рациональных схем является привычка рассматривать любую подстанцию, как первую очередь будущей подстанции большой мощности, и привычка к существующим схемам. Г. В. Сербиновский и Ю. Н. Баскаков пишут о тех или иных недостатках схем безотносительно к тому, в каких условиях эти схемы применяются.

При соответствующих условиях схемы «многоугольников» могут дать лучшие показатели, чем схемы со сборными шинами даже для многофидерных устройств, как это принято, например, для станции Боулдер Дам, где 8 генераторов по 62,5 тыс. kW и 5 линий 220—287 kV скоммутированы по двум независимым друг от друга многоугольникам.

В заключение остановимся на вопросе о двигателях и трансформаторах. Инж. Б. Б. Гельперин указывает на необоснованность нашего утверждения о неправильном соотношении постоянных и переменных потерь в существующей серии трансформаторов. Разница в наших взглядах объясняется тем, что в отличие от Б. Б. Гельперина мы учитываем не только потери активной, но и реактивной мощности в трансформаторах; на передачу последней в генераторах и линиях затрачивается от 0,1 до 0,2 kWh/kWh, вследствие чего режим работы с наименьшими удельными потерями лежит совсем не в тех пределах, на которые указывает Б. Б. Гельперин.

Неправильной нам представляется аргументация Н. А. Явлинского, который для опровержения предложения о повышении к. п. д. двигателя выделяет относительно небольшую группу двигателей и определяет, какую экономию в потерях мощности можно достигнуть улучшением свойств этой группы в долях всей установленной на станциях мощности. Получив цифру 0,7%, он по малости этой цифры считает, что игра не стоит свеч.

Напомним, что 0,7% потерь в двигателях превращаются почти в 1%, если учесть потери мощности при передаче. Экономия же в 1% на каждом установленном на станции киловатте мощности дает 2,7 kg стали и 0,5 kg меди в одновременных затратах, оцениваемых вместе с вложенным в них трудом в 35 руб.

Повидимому, некоторые инженеры недооценивают эффективности сокращения потерь электроэнергии и того значения, которое имеет борьба за их уменьшение.

### Инж. С. И. РАБИНОВИЧ

Главный конструктор Московского трансформаторного завода им. Куйбышева

Безусловно правильным является замечание В. В. Михайлова о том, что не представляется возможным дать такое аналитическое выражение, которое могло бы учесть влияние всех параметров трансформатора на его размеры одновременно. Имеющиеся связи выражаются обычно рядом уравнений и, как правило, основаны на определенных допущениях.

В вопросе о признаке для уточнения оптимального соотношения постоянных и переменных потерь с мнением В. В. Михайлова согласиться нельзя. Поскольку наши тепловые и гидроэлектростанции, как правило, работают на общую сеть, нет оснований дифференцировать трансформаторы по признаку станций. Если, отходя от средних значений нагрузок трансформаторов какой-либо мощности, вводить различные типы, то единственно правильным признаком является степень загрузки трансформатора в эксплуатации.

По поводу замечания инж. А. Б. Крикунчика о том, что западно-европейские фирмы, применяя горячекатаную сталь, получают в трансформаторах потери на 20% меньше, чем в отечественных, можно пояснить следующее. Указанное снижение потерь достигается за счет ряда факторов. В числе их: применение стали с удельными потерями на 10—15% ниже, чем сталь, выпускаемая Верх-Исетским заводом; несколько увеличенный расход активных материалов, и в особенности меди, и снижение запасов электрической прочности.

Поскольку применение холоднокатаной стали является кардинальным решением вопроса к. п. д. трансформаторов, мы, естественно, должны ориентироваться на ее применение, не ограничиваясь промежуточными решениями.



# Международная конференция по сетям высокого напряжения

## Современные высоковольтные кабели

(Обзор)

На международной конференции по сетям высокого напряжения электрических систем (1946 г.) в ряде докладов были освещены вопросы современной техники в области высоковольтных кабелей.

1. Практика эксплуатации высоковольтных кабелей маслонаполненного и газонаполненного типов за последние 6 лет в Великобритании была освещена в докладе Р. Dunsheath и С. Н. Join.

За последние годы «сверхвысоковольтный» кабель, т. е. кабель на напряжение 60 кВ и выше, непрерывно прогрессировал в Великобритании. Около 10 лет назад считалось, что для рабочего напряжения 33 кВ наиболее популярным типом кабеля являлся трехжильный экранированный кабель с изоляцией из пропитанной бумаги, хотя в некоторых случаях применялся и кабель с отдельно свинцованными фазами. Одножильные кабели на это напряжение требовались только в специальных случаях и не применялись для длинных линий. Значительное число ответственных установок 33 кВ было выполнено маслонаполненным трехжильным кабелем с каналами, проложенными в промежутках между жилами.

Для напряжения 66 кВ некоторые фирмы изготавливали еще нормальный экранированный кабель с бумажной пропитанной изоляцией (тип II). Однако, наиболее употребительным типом кабеля на это напряжение сделался маслонаполненный кабель, который обеспечивает долгую и уверенную эксплуатацию. Для напряжения 132 кВ маслонаполненный кабель является единственным типом кабеля, о котором можно говорить.

Табл. 1, содержащая данные о некоторых маслонаполненных кабельных линиях Англии, подтверждает популярность маслонаполненного кабеля.

За обозреваемый период фундаментальных изменений в конструкции кабелей не было; большое внимание обращалось на удешевление линии, в первую очередь за счет повышения давления в кабеле. В этом случае баки давле-

ния делают с элементами, заполненными газом под давлением в несколько атмосфер. Это дает возможность подпитывать более длинную секцию и, следовательно, ведет к уменьшению числа стопорных муфт на средней трассе примерно на 25%. Баки давления заделываются в заранее отлитую бетонную трубу, которая зарывается прямо в почву. В исключительных случаях для достижения еще большей экономии баки можно зарывать даже без бетонной защиты.

В трехжильных маслонаполненных кабелях с жилами большого сечения каналы для масла делаются из меди, а не из железа. Такие каналы из немагнитного материала за счет уменьшения потерь и лучшего рассеяния тепла дают увеличение максимально допустимого тока нагрузки кабеля примерно на 4%. Многолетний опыт эксплуатации одножильных и трехжильных маслонаполненных кабелей в сетях 66 и 132 кВ показал единственный их недостаток, а именно утечку в соединительных и концевых муфтах кабеля из-за дефектов свинцовой оболочки и арматуры. Подпитывающая арматура и аварийная сигнализация еще требуют улучшения. Среди потребителей существуют различные взгляды по вопросу сигнализации об аварийном минимуме давления масла. Такая установка увеличивает основные затраты и обслуживание из-за необходимости предусмотреть реле низкого давления масла в каждой секции, а также вспомогательный кабель и оконечные устройства. Когда аварийной системы нет, предусматривается возможность измерения давления масла в нескольких точках кабеля. Повреждения в маслонаполненных кабелях случались во время войны, и критика этого типа кабеля сводилась к тому, что нужно затратить много времени на перепропитку секций после того, как все соединения уже сделаны.

2. Плоский маслонаполненный кабель (доклад J. Mollerhos). Стремление к удешевлению маслонаполненного кабеля выражается в работах по созданию «самокомпенсирующегося» кабеля, т. е. кабеля, который не нуждается в дорогостоящей подпитывающей арматуре.

Кабельный завод в Копенгагене еще в 1939 г. поставил первые опыты с кабелем нового типа. Во время войны была выполнена из-за недостатка сырья только одна установка нового кабеля на напряжение 66 кВ. Эта линия находится в работе с 1941 г. и лишь однажды вышла из работы во время войны.

Если сложить вместе три изолированные жилы и опрессовать их плоской свинцовой оболочкой, то две плоские стороны такой оболочки представляют собой мембраны, если они нагружены некоторым механическим устройством пружинного типа. Основной конструкции плоского высоковольтного кабеля является то, что движение плоских частей свинцовой оболочки кабеля обеспечивает самый простой способ компенсации изменения объема масла в кабеле. Это исключает все обычные аппараты, соединяемые с маслонаполненным кабелем. На рис. 1 показана конструкция кабеля. Три изолированные и экранированные жилы кабеля покрыты свинцовой оболочкой, которая снабжена защитным слоем из битума, бумаги и ткани. На каждой из плоских поверхностей оболочки проложены две пружинящие полосы из гофрированной бронзовой ленты той же ширины, как и плоская часть оболочки. Все это стягивается двойной спиралью из медной или бронзовой проволоки диаметром 1,5 или 2 мм. Эти полосы и проволока рассчитываются так, чтобы давление внутри кабеля менялось в пределах от 2,1 до

Таблица 1

Год прокладки	Рабочее напряжение, кВ	Число жил и сечение, мм <sup>2</sup>	Длина линии, км
1939	66	3×260	15,5
		3×387	2,7
	132	1×130	16,5
1940	66	3×225	53,0
		3×95	1,2
	68	1×950	0,27
		3×160	3,7
1941	66	3×160	2,3
		1×130	1,4
1942	66	1×65	0,55
		3×187	3,2
	66	3×195	
		3×260	
1943	66	1×950	0,37
		132	0,11
	66	1×195	3,1
132		1×195	0,7
1944	66	1×195	1,0
		1×387	2,3
1945	66	1×387	3,2
		3×225	

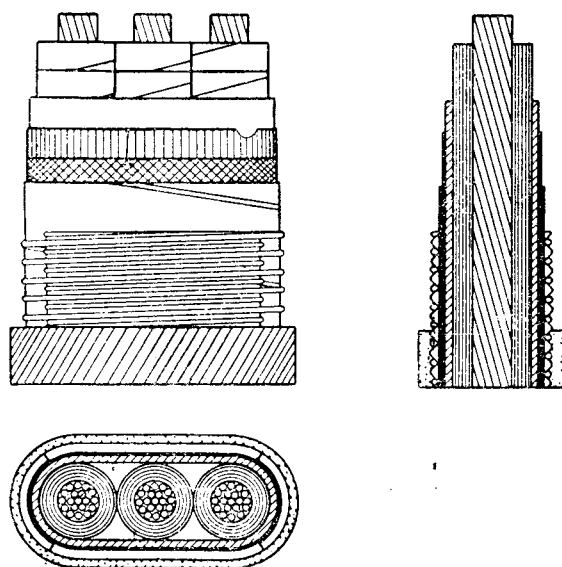


Рис. 1.

6 kg/cm<sup>2</sup>. Наибольшее перемещение мембраны с каждой стороны должно быть порядка 0,01  $n$  ( $d$  — диаметр изолированной жилы;  $n$  — наибольшее увеличение внутреннего объема свинцовой оболочки кабеля в %). При изменении давления между холодным ходом и полной нагрузкой примерно на 2 kg/cm<sup>2</sup> перемещение средней части мембраны в соответствии с размерами кабеля составит от 3 до 15 мм. Кабель, предназначенный для прокладки под землей, покрывается поверх брони битуминизированным джутом. Морские кабели имеют добавочную проволочную броню из круглой бронзовой проволоки.

В производстве плоского кабеля принимаются те же предосторожности, что и при изготовлении обычного маслонаполненного кабеля, т. е. выравнивание поверхности жилы для уменьшения местной напряженности поля, градиентирование бумажной изоляции и дегазирование масла. Наиболее важная особенность в освинцевании этого кабеля состоит в том, что кабель входит в пресс в направлении под углом в 90° по сравнению с обычной практикой; поэтому наиболее слабое место (шов) получается не на плоской, а на круглой части оболочки, т. е. на таких местах оболочки, которые не образуют мембраны.

Для оболочки употребляется свинец с 0,06% меди, который выдавливается так же легко, как и чистый свинец, но дает устойчивую мелкокристаллическую структуру, что важно для оболочек, испытывающих мембранное действие. Толщина свинцовой оболочки изменяется от 2 мм для малых кабелей до 3 мм для кабеля с жилами большого сечения.

До бронирования или наложения различных обмоток и гофрированных полос кабель наполняется сухим маслом, дегазированным под глубоким вакуумом (меньше 1 мм рт. ст.). Вес плоского подземного или подводного кабеля составляет примерно половину веса обычного маслонаполненного кабеля соответствующего сечения. В то время, как в обычном маслонаполненном кабеле минимальное избыточное давление поддерживается около 0,1 kg/cm<sup>2</sup>, в плоском кабеле оно никогда не опускается ниже 2 kg/cm<sup>2</sup>. Наибольшая напряженность электрического поля в обычном маслонаполненном кабеле при переменном токе 50 Hz не больше 8—10 kV/mm, а в плоском кабеле она может быть повышена до 10—12,5 kV/mm, т. е. на 25%, при том же коэффициенте запаса электрической прочности и, стало быть, толщина изолирующего слоя может быть соответственно уменьшена.

Для плоского кабеля 3 × 95 мм<sup>2</sup> на 66 kV с толщиной изоляции 6,5 мм пробивное напряжение 50 Hz между жилой и оболочкой составило 300 kV при кратковременном и 175 kV при длительном приложении напряжения. Тепловое сопротивление плоского кабеля, проложенного в земле, примерно на 17—20% меньше теплового сопротивления обычного маслонаполненного кабеля. Допускаемая нагрузка плоского кабеля зависит от изме-

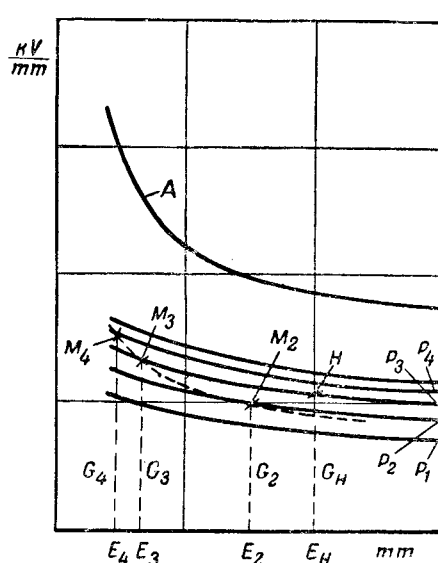


Рис. 2.

нения температуры и объема свинцовой оболочки, а также от допускаемого мембранного движения в кабеле. Температурные и объемные изменения в проложенном в земле кабеле проходят годовой цикл при максимальной разности температур около 15°С. На этот годовой цикл налагается дневной цикл, соответствующий изменению нагрузки от минимума до максимума при максимальной разности температур масла в кабеле около 30°. В виде примера в табл. 2 приведены нагрузки плоского кабеля на 66 kV в зависимости от сечения жил и «длительности жизни» оболочки. Данные этой таблицы составлены на основании испытаний на искусственное старение и подтверждаются наблюдениями за свинцовой оболочкой кабеля с газом под давлением. Даже короткое замыкание, которое может быть опасным для изоляции обычных маслонаполненных кабелей, безопасно для плоского кабеля. В случае короткого замыкания или длительных перегрузок предел упругости мембраны может быть превзойден и давление в нормальном режиме может из-за этого упасть ниже минимального допустимого (2,1 kg/cm<sup>2</sup>). Дополнительная подпитка дегазированным маслом с одного конца кабеля легко восстанавливает давление до прежней нормы.

Плоский кабель для напряжений от 20 до 150 kV считают во всех отношениях лучше обычного маслонаполненного кабеля.

3. Маслонаполненный кабель на напряжение 400 kV переменного тока (доклад L. Domenach). Потребность в таком кабеле появилась во Франции в связи с необходимостью передать 400 000 kW переменного тока на расстояние 400 км. Из-за очень большой реактивной мощности, генерируемой такой линией, прокладка подземного кабеля на это напряжение возможна только в небольших длинах. Тем не менее, проблема изготовления кабеля 400 kV заслуживает внимания с точки зрения технического прогресса и возможной экономии в сетях очень высокого напряжения.

Для того, чтобы размеры кабеля были приемлемы с точки зрения производства и прокладки, необходимо увеличить максимальную напряженность в изолирующем слое кабеля с 9—10,5 kV/mm для существующих установок маслонаполненного кабеля до 15 kV/mm. Отсюда следует, что изоляция современных маслонаполненных кабелей должна быть значительно улучшена в отношении пробивной прочности, чтобы можно было осуществить кабель на 400 kV.

Французскими кабельными заводами (Câbles de Lyon и Société d'Exploitation des Câbles Electriques Cortaillod) с 1937 г. была проведена серия исследований электрической прочности пропитанной бумаги в зависимости от качества и толщины бумаги и давления масла. опыты были проведены на образцах бумаги между плоскими и цилиндрическими электродами, а также на кабелях при толщине изоляции в пределах от 5 до 24 мм. Рис. 2 дает зависимость пробивной прочности при переменном токе 50 Hz от тол-



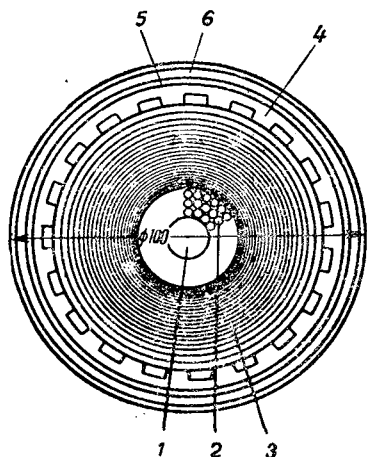


Рис. 3.

щины бумаги для разных значений давления масла. Верхняя кривая  $A$  дает зависимость пробивной прочности  $G$  от толщины бумаги при пробое импульсной стандартной волной ( $1/50 \mu$  сек). Значения давления масла и толщины бумаги надо выбирать так, чтобы получить желаемый коэффициент запаса электрической прочности кабеля по отношению к перенапряжениям. Например, при величине рабочего градиента у жилы  $G$  коэффициент запаса электрической прочности по отношению к атмосферным перенапряжениям будет равен отношению  $\frac{G_{im}}{G} = m$ , а по отношению к внутренним (коммутационным) перенапряжениям коэффициент запаса будет иной, равный  $\frac{G_{in}}{G} = n$ .

Отсюда следует, что отношение пробивной прочности при перенапряжениях атмосферных к прочности при перенапряжениях коммутационного типа будет равно:

$$\frac{G'_{im}}{G_{im}} = \frac{n}{m} = k.$$

Проведем на рис. 3 пунктиром кривую, ординаты которой равны  $\frac{G_{im}}{k}$ , т. е. получаются от деления на  $k$  ординат верхней кривой этого рисунка. Эта кривая пересечет кривые  $P_2, P_3, P_4$  в точках  $M_2, M_3, M_4$ , которые соответствуют толщине бумаги у жилы  $E_2, E_3, E_4$ , при давлении масла  $P_2, P_3, P_4$ . В точке  $M_2$  при давлении  $P_2$  и толщине бумаги  $E_2$  пробивной градиент соответствует  $G_2$ . Если  $n=4$ ;  $m=8$ , т. е.  $k=2$ , что допустимо для подземных сетей, соединяющихся с воздушными линиями, то допустимый рабочий градиент получается из соотношения  $G_c = \frac{G}{n}$ . Эксперимент дает увеличение рабочего градиента

до 20 kV/mm за счет применения очень тонкой бумаги высокой плотности и давления масла до 15 kg/cm<sup>2</sup>. Кабель, выполненный согласно этим данным, может работать при линейном напряжении 500 kV, 50 Hz; его наружный диаметр и вес были бы того же порядка, как и для существующих кабелей на напряжение 220 kV, а коэффициент запаса был бы примерно 4 для внутренних и 8 для атмосферных перенапряжений.

Расположение в изолирующем слое бумаги разной толщины (градирование) может быть выполнено в соответствии с величиной абсцисс точек кривой  $G$ , относящейся к рассматриваемому рабочему давлению. При выбранном давлении  $P$  для точки  $H$  в изолирующем слое может быть применена также бумага толщиной  $E_3$ , которая больше толщины  $E_n$  бумаги, расположенной непосредственно у жилы кабеля. Этот метод позволяет точно определить композицию диэлектрика, поскольку дается давление и коэффициент запаса против импульсов. Опыт показывает, что не очень выгодно увеличивать давление выше некоторого предела, так как возрастание пробивного градиента при 50 Hz не пропорционально давлению, и при давлении выше 15 kg/cm<sup>2</sup> получается весьма небольшое повышение пробивной прочности. Применение тонкой и более плотной бумаги ведет к сильному возрастанию

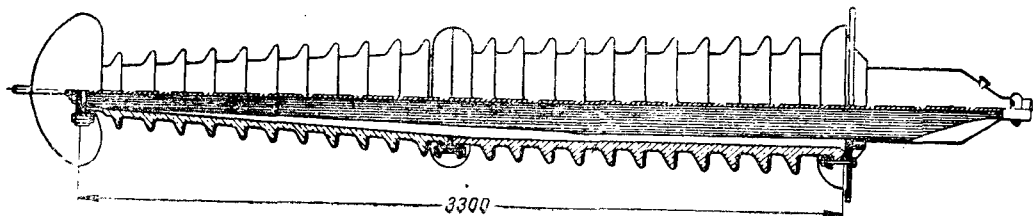


Рис. 4.

Таблица 2

Сечение, мм <sup>2</sup>	Длительность жизни оболочки в годах		
	100	200	300
	Ток в А на фазу		
36	170	155	140
50	215	195	180
70	265	235	215
95	300	270	250
120	345	310	285
150	395	355	325
185	445	405	370
240	515	475	435

емкости кабеля, которая значительно выше, чем емкость нормального маслонеполненного кабеля на напряжении 220 kV. Рабочее давление масла в кабеле должно быть по меньшей мере равно значению, необходимому для компенсации падения давления, вызываемого продольной и радиальной циркуляцией масла при наиболее неблагоприятных условиях. Колебания давления, вызываемые изменением нагрузки, могут быть уменьшены почти наполовину при добавочной подпитке изолирующего слоя через каналы в свинцовой оболочке.

Все вышеуказанные данные были применены для создания конструкции 400-kV кабеля, показанной на рис. 3. Медная жила кабеля сечением 400 мм<sup>2</sup> имеет в центре канал 1, диаметром 13 мм. Наружный диаметр жилы 2 равен 28 мм. Толщина изолирующего слоя 3 составляет 24 мм. Поверх изоляции наложен экран и свинцовая оболочка 4 с продольными каналами для масла. Эта оболочка упрочнена путем повива несколькими тонкими медными лентами 5 так, чтобы прочность на разрыв упрочненной свинцовой оболочки повысилась до 100 kg/cm<sup>2</sup>, что гарантирует более, чем пятикратный запас прочности по отношению к наибольшему ударному давлению, которое могло бы возникнуть в кабеле с нормальным давлением 15 kg/cm<sup>2</sup>. Поверх меди для защиты ее от коррозии наложена вторая свинцовая оболочка 6. Наружный диаметр кабеля получился равным 100 мм, а вес — около 28 kg/m.

Баки питания выполнены на давление масла 15 kg/cm<sup>2</sup> и состоят из набора металлических элементов, наполненных маслом и соединенных друг с другом и с центральной муфтой коллектором. Все элементы заключены в бак, в котором с помощью сжатого азота поддерживается давление 15 kg/cm<sup>2</sup>. Специальное электрическое реле контролирует давление в некоторых пределах и сигнализирует об утечке в кабеле.

Проблема концевых муфт представляла серьезные затруднения из-за размеров, которые получились бы при простом экстраполировании размеров существующих муфт, поэтому был применен принцип конденсаторного бушинга. Полосы пропитанной бумаги чередовались с металлическими и наматывались вокруг кабеля до определенного размера так, чтобы получить однородное распределение напряжения в продольном направлении. Модель концевой муфты конденсаторного типа, примененной для 400-kV кабеля, показана на рис. 4. Испытание этих муфт напряжением только на 15% ниже напряжения перекрытия в продолжение нескольких сот часов не дало заметного изменения диэлектрических потерь; до и после испытания напряжением потери были меньше, чем в нормальной муфте на напряжение 220 kV. Конденсаторный тип кон-

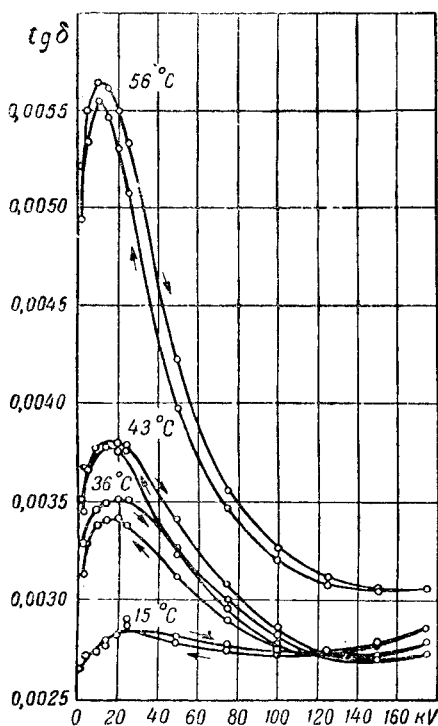


Рис. 5.

цевой муфты с бакелитовыми трубами выдерживает 900 кВ переменного напряжения и 2 000 кВ нормальной импульсной волны. Уменьшение размеров муфты дает значительную экономию на масле (порядка 120 л) по сравнению с муфтой 220 кВ обычного типа.

Изготовленный конец кабеля был подвергнут испытаниям. После измерения диэлектрических потерь при 450 кВ кабель был испытан напряжением 800 кВ в течение 22 мин, при этом нагревание диэлектрика кабеля за счет потерь не было выше 80° С. После снятия напряжения и 24 ч охлаждения напряжение было опять поднято до 920 кВ, что является предельным напряжением для конденсаторной муфты кабеля. Пробой при этом напряжении произошел через 3 мин в точке, где свинцовая оболочка кабеля входит в муфту.

Интересно отметить, что 220-кВ парижский кабель пробился при 500 кВ через несколько минут. Отношение 500 : 220 то же самое, как и отношение 920 : 400, полученное для кабеля 400 кВ, следовательно, коэффициент запаса обонх кабелей одинаков. Допустимый ток нагрузки определялся из максимального перегрева жилы в 50° С. Три одножильных кабеля были проложены в траншее так, что оси их находились в вершинах равностороннего треугольника. Тепловое сопротивление почвы было порядка 100 tΩ. Общие потери на метр длины отдельного кабеля не должны превосходить 22 Вт/м, причем на долю диэлектрических потерь приходится 11,8 Вт/м при  $\text{tg } \delta = 0,0035$ . Допустимый ток нагрузки не должен быть более 370 А. Передаваемая мощность при 400 кВ равна 250 000 кВт.

Положенное в основу конструкции 400-кВ кабеля повышение давления масла в кабеле с 1 до 15 кг/см<sup>2</sup>, позволившее осуществить кабель с максимальным градиентом 15 кВ/мм, может быть использовано для повышения экономичности подземных кабелей на 150 и 220 кВ. В этом случае толщина изолирующего слоя может быть уменьшена наполовину. Увеличение емкости в 1,55 раза из-за уменьшения толщины изоляции компенсируется снижением потерь в свинце и уменьшением угла потерь изоляции при повышении давления масла. Экономия, которую могло бы дать использование этого нового типа кабеля, должна быть исследована в каждом отдельном случае с учетом возрастания стоимости корректирования реактивной мощности кабеля.

4. Испытание маслонаполненного кабеля (доклад Г. Ф. Прокоп). Лабораторный кабельный

завода в Дельфте был подвергнут исчерпывающему испытанию проложенный в земле одножильный маслонаполненный кабель 150 кВ следующей конструкции.

Стальная спираль толщиной 0,3 мм образует центральный канал диаметром 13,5 мм. Поверх спирали наложен слой круглых проволок диаметром 3 мм, окруженных 13 плоскими медными проволоками. Диаметр медной жилы 24 мм при сечении меди 240 мм<sup>2</sup>. Толщина слоя бумажной изоляции 18 мм. Максимальный градиент напряжения при 150 кВ между жилой и свинцовой оболочкой равен 13,6 кВ/мм. Изолированная бумагой и экранированная жила была обмотана медным поясом специальной формы так, что жила удерживалась на равном расстоянии от внутренней поверхности свинцовой оболочки, образуя, таким образом, канал для масла под свинцовой оболочкой. Свинцовая оболочка имеет лентообразные выемки. Испытываемая длина 100 м кабеля, проложенная в земле на глубине 100 см, была подвергнута испытанию на старение, для чего давалось 400 циклов нагрева с повышением температуры меди на 20° С, чередовавшиеся с охлаждением до первоначальной температуры. В конце испытания кабель был подвергнут действию напряжения между жилой и свинцовой оболочкой 150 кВ в продолжение 4 500 ч и 175 кВ в продолжение 5 300 ч. Результаты измерения  $\text{tg } \delta$  в зависимости от температуры и напряжения показаны на рис. 5. Убывание значений  $\text{tg } \delta$  при данной температуре с возрастанием напряжения может быть объяснено наличием проводящих частиц в слоях масла между бумажками изолирующего слоя кабеля. При понижении температуры уменьшение  $\text{tg } \delta$  с ростом напряжения становится менее заметным. Другая замечательная черта, обнаруженная при испытании, заключается в том, что возрастание  $\text{tg } \delta$  не одинаково для измерений при повышении или при понижении напряжения. Исходя из этого, можно предположить, что некоторые из проводящих частиц, находящиеся в движении в электрическом поле, становятся неподвижными и далее не принимают участия в создании проводимости.

Тщательно проведенные многократные испытания показывают, что длительное повышение температуры жилы маслонаполненного кабеля до 75° С вызывает только легкое изменение электрических свойств изоляции, в то время, как длительное приложение напряжения при максимальном градиенте 9 кВ/мм дает легкое возрастание диэлектрических потерь и спрямление характеристики  $\text{tg } \delta$ .

Вывод из этого исследования: правильное представление об электрических свойствах изоляции маслонаполненного кабеля можно получить только в том случае, когда измерение  $\text{tg } \delta$  начинается с наименьшего напряжения и при температуре выше 60° С.

5. Кабель с газом под давлением (доклад Р. Dunsheath). Примерно с 1925 г. некоторые британские кабельные заводы начали экспериментировать с кабелем, в котором ионизация в пустотах подавлялась повышением давления газа. Около 10 лет назад развернулась работа по созданию конструкции кабеля, который мог бы быть предложен для широкого испытания в высоковольтных сетях.

Развитие этого типа кабеля идет согласно докладу в трех направлениях:

а) Кабель с газовой подушкой, в котором использована нормальная бумажная пропитанная изоляция и газ, например азот под давлением до 14 кг/см<sup>2</sup> между изолирующим слоем и свинцовой оболочкой.

б) Газонаполненный кабель, в котором диэлектрик состоит из слоев предварительно пропитанной бумаги без свободного компаунда и весь объем под свинцовой оболочкой заполнен газом под давлением.

в) Кабель под давлением получается, когда нормальный кабель с бумажной пропитанной изоляцией и свинцовой оболочкой закладывается во вторую свинцовую оболочку другой формы, а пространство между оболочками заполняется газом под давлением. К этой же категории относится освинцованный кабель, проложенный в стальной трубе, внутри которой находится газ под давлением.

Кабели с газовой подушкой изготавливаются как трехжильные, так и одножильные. Одножильный кабель на напряжение 132 кВ находится в работе уже около 3 лет. Нормальное рабочее давление газа в кабеле стандартизовано и имеет величину 14 кг/см<sup>2</sup>, хотя давление в 5 кг/см<sup>2</sup> уже достаточно, чтобы исключить какую-либо тен-

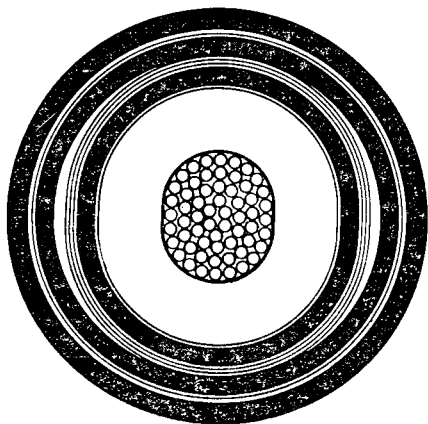


Рис. 6.

денцию к ионизации при максимально допустимом градиенте  $8,5 \text{ kV/mm}$ , следовательно, при рабочем давлении  $14 \text{ kg/cm}^2$  обеспечивается значительный коэффициент запыления.

Газонаполненный кабель высокого давления характеризуется в первую очередь тем, что отношение объема газа к объему пропитывающего состава внутри свинцовой оболочки должно иметь такое значение, чтобы плотность газа на поверхности жилы была примерно постоянной для всего диапазона изменения температуры в эксплуатации. Наибольшее количество газонаполненных одножильных кабелей  $132 \text{ kV}$  находится в эксплуатации около 9 лет.

Таблица 3

Год прокладки	Рабочее напряжение, kV	Число жил и сечение, $\text{mm}^2$	Длина линии, км
1940	132	$1 \times 150$	0,73
	132	$1 \times 194$	0,37
1942	132	$1 \times 194$	0,69
	132	$1 \times 258$	9,4
		$1 \times 387$	
43	66	$3 \times 97$	5,0
1944	132	$1 \times 258$	1,83
	132	$1 \times 194$	1,22

В табл. 3 приведены некоторые данные о кабельных линиях этого типа, сооруженных в Англии за последние годы.

Кабель под давлением впервые был проложен в окрестностях Лондона в 1932 г. Это был трехфазный кабель в стальной трубе на рабочее напряжение  $66 \text{ kV}$ . С тех пор кабель находится в непрерывной работе и давление газа в нем никогда не снижалось в продолжение 15 лет.

Во время одного воздушного налета на Лондон бомба упала вблизи группы кабелей, включавшей и кабель

в трубе. В то время, как несколько метров всех кабелей были полностью разрушены, кабель в трубе был только незначительно смещен с места и на трубе в одном месте появилась вмятина.

Многие кабельные линии этого типа были проложены на континенте с 1932 г. В Англии более популярным сделался кабель с упрочненной свинцовой оболочкой, заменяющей стальную трубу. Одна из таких линий на  $66 \text{ kV}$  была проложена параллельно с кабелем в трубе. Это был трехжильный кабель с отдельно свинцованными жилами. Овальная медная жила сечением  $97 \text{ mm}^2$  с наложенным на нее изолирующим слоем толщиной  $7,25 \text{ mm}$  покрывалась овальной свинцовой оболочкой, а три таких жилы заключались в общую свинцовую оболочку круглой формы, рассчитанную на рабочее давление газа  $14 \text{ kg/cm}^2$ . Для защиты от коррозии была наложена еще одна свинцовая оболочка. Наружный диаметр кабеля был приблизительно равен  $9,4 \text{ mm}$ . Длина линии  $4 \text{ km}$ , а передаваемая мощность  $32\,000 \text{ kVA}$ . Кабель находится в работе с 1942 г., и за это время утечка газа была весьма незначительна.

Другая линия  $132 \text{ kV}$  была выполнена тремя одножильными кабелями под давлением газа в упрочненных свинцовых оболочках (рис. 6). Овальная экранированная жила в овальной свинцовой оболочке — диафрагме заключалась в свинцовую оболочку круглой формы, упрочненную путем повыва двумя лентами из цветного металла и продольно наложенными узкими латунными полосами, если кабель не предназначен для прокладки в земле. Между обеими оболочками получается газовое пространство. Окончательно каждый кабель защищается от коррозии специальным резиновым покрытием. Сечение одной медной жилы этого кабеля  $257 \text{ mm}^2$ , а толщина изоляции  $11,7 \text{ mm}$ . Максимальный градиент получается равным  $10 \text{ kV/mm}$ . Три кабеля были проложены треугольником и заканчивались одиночными стандартными муфтами с фарфоровыми изоляторами. Отличительной чертой этой установки было применение так называемых стабилизированных изоляторов с полупроводящей глазури, которая весьма эффективно выравнивает распределение напряжения на поверхности изолятора. Кабели были подвергнуты суровым механическим и электрическим испытаниям до и после прокладки. Арматура была испытана гидравлическим давлением  $28 \text{ kg/cm}^2$  и затем давлением газа  $21 \text{ kg/cm}^2$  в течение 48 ч. По окончании прокладки линии было дано давление газа  $20 \text{ kg/cm}^2$  на длительный период для проверки плотности всех соединений установки.

Образцы кабеля с соединительными и концевыми муфтами были испытаны в Национальной физической лаборатории импульсами; полученное пробивное напряжение  $790 \text{ kV}$  соответствует максимальному градиенту  $100 \text{ kV/mm}$ . Кабельная линия может передать  $100\,000 \text{ kVA}$ , т. е. ток  $400 \text{ A}$  при  $132 \text{ kV}$ . Линия была закончена в сентябре 1944 г. и с тех пор успешно работает под нагрузкой.

В заключение докладчик отметил прогресс, имевший место в Англии в годы войны как в области внедрения маслосодержащего кабеля, так и в развитии различных типов кабелей с газом под давлением. В будущем должна проводиться работа по уменьшению числа и упрощению конструкции муфт, чтобы снизить, таким образом, стоимость кабельной линии.

Доктор техн. наук, проф. С. М. БРАГИН



# Выключающие аппараты высокого напряжения

(Обзор)

В докладах, представленных Международной конференцией по сетям высокого напряжения электрических систем (1946 г.) по существу, новых принципиальных вопросов по выключающим аппаратам высокого напряжения не было поставлено. Тем не менее рассмотренные на конференции доклады представляют существенный интерес, поскольку они направлены к дальнейшему уточнению процессов, имеющих место при отключении цепей высокого напряжения.

Как известно, шунтирование дуги активными сопротивлениями давно привлекает к себе внимание конструкторов выключателей высокого напряжения. Разрешаемые при этом задачи различны в зависимости от величины применяемых сопротивлений.

А. Н. Pollard (British Thomson-Houston, Англия) в своем докладе дает систематическое рассмотрение шунтирующих сопротивлений с линейной и нелинейной характеристикой. Автор отмечает, что при применении шунтирующих сопротивлений в выключателях высокого напряжения техника отключения за последние годы имеет большие достижения:

а) при применении двух или большего числа разрывов достигается равномерное распределение напряжений между отдельными разрывами;

б) достигается низкая скорость восстановления напряжения на выключателе, независимая от собственной скорости, присущей цепи;

в) перенапряжения, возникающие при отключениях, существенно снижаются.

Pollard разделяет применяемые сопротивления на четыре группы:

1. Сопротивления большой величины (10 000 Ω и выше, в зависимости от напряжения) с линейной характеристикой  $I=f(U)$  служат для контролирования распределения напряжения между разрывами и практически не оказывают влияния ни на форму, ни на амплитуду восстанавливающегося сопротивления.

2. Сопротивления средней величины (1 000 Ω и выше) с линейной характеристикой служат для контролирования распределения напряжения между разрывами, а также для управления амплитудой восстанавливающегося напряжения, особенно при отключении небольших индуктивных и зарядных токов. Сопротивления средней величины применяются до сего времени, главным образом, в масляных выключателях. Следует отметить, что время горения дуги в масляных выключателях, снабженных такими сопротивлениями, при малых и больших токах становится одинаковым и равным времени при наибольших отключаемых токах.

3. Сопротивления малой величины (от нескольких ом до сотен ом) с линейной характеристикой применяются для снижения скорости восстанавливающегося напряжения на разрыве и делают эту скорость независимой от постоянной цепи. Величина сопротивления определяется в

данном случае соотношением  $R \leq 0,5 \sqrt{\frac{L}{C}}$ , что обеспечивает экспоненциальный закон нарастания напряжения.

В воздушных выключателях на напряжение 35 кВ и выше обычно предусматривается два отдельных разрыва, один из которых шунтируется сопротивлением, а другой обрывает ток, остающийся в шунте. Для более низких напряжений может быть применено одно сопло с выдуваем дуги на специальный электрод, последовательно с которым включается сопротивление.

4. Нелинейные сопротивления ( $J \neq I^2$ ) могут служить как для выравнивания напряжения между разрывами, так и для уменьшения коммутационных перенапряжений. Так как в данном случае при рабочем напряжении ток резко снижается, он может быть сравнительно просто разорван с помощью разъединителя в воздухе, которым обычно снабжаются воздушные выключатели высокого напряжения. Опыт отключения с такими нелинейными шунтами показал, что пики перенапряжения имеют лишь неболь-

шие превышения по отношению к амплитуде напряжения 50 Hz.

Автор рекомендует широкое использование шунтирующих сопротивлений.

Развитие воздушных выключателей высокого напряжения привлекает внимание исследователей к процессам, происходящим в дугогасительных соплах этих аппаратов. Сложные газо- и термодинамические явления в дугогасительных камерах воздушных выключателей изучены пока слабо. F. Labouret (C-ie Eléctro-Mécanique, Франция) в своем докладе сделал попытку установить связь между отключаемым током и геометрическими параметрами сопла дугогасительной камеры. Labouret исходит из того, что предел отключаемого тока определяется явлением прекращения движения потока воздуха на входе в сопло вследствие противодействия, развиваемого дугой. Исходя из термодинамических положений, автор получает простую зависимость для амплитуды обрываемого тока

$$I_m = K \frac{S}{L} [A], \quad (1)$$

где  $S$ —сечение сопла в см<sup>2</sup>;  $L$ —длина цилиндрической части сопла в см.

$$\text{Коэффициент } K = \frac{3}{2} \frac{x+1}{x-1} \cdot \frac{p_0}{X_0} a_a \cdot 9,81, \text{ где } x = \frac{c_p}{c_v}$$

( $c_p$ —теплоемкость газа при постоянном давлении;  $c_v$ —теплоемкость при постоянном объеме);  $p_0$ —атмосферное давление в кг/см<sup>2</sup>;  $X_0$ —градиент напряжения дуги в В/см;  $a_a$ —скорость истечения газа при температуре его, равной температуре дуги (1 600 m/sec).

На рис. 1 приведена диаграмма, дающая зависимость между амплитудой обрываемого тока и отношением  $\frac{S}{L}$ . Прямая, проведенная на этой диаграмме, дает зна-

чения  $I_m = f\left(\frac{S}{L}\right)$  на основании расчета по вышеприведенной формуле, а нанесенные точки получены из опыта. Как видно, имеет место весьма хорошее совпадение между расчетными и опытными данными. Исследование Labouret представляет большой практический интерес, тем более, что опытные точки, нанесенные на рис. 1 были получены для широких пределов колебания напряжения (3÷220 кВ) и давлений (8—15 кг/см<sup>2</sup>). Величины токов при опытах составляли 7 500÷72 000 А. Прямая на рис. 1 дает значение  $K=5 000$ .

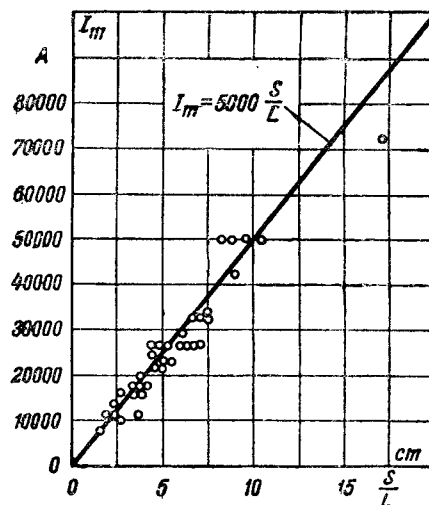


Рис. 1. Зависимость амплитудного значения отключаемого тока от отношения сечения сопла к его длине.

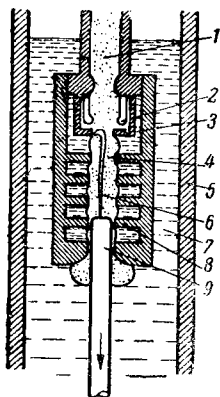


Рис. 2. Камера малообъемного выключателя.

1—выходная труба; 2—неподвижный контакт; 3—охранное кольцо; 4—газовый пузырь; 5—изоляционный цилиндр; 6—электрическая дуга; 7—масло; 8—перегородки в камере; 9—подвижный контакт.

Несмотря на то, что почти повсеместно быстро внедряются в производство воздушные выключатели высокого напряжения, некоторые фирмы продолжают совершенствовать свои малообъемные выключатели. Исследованию дугогасительной способности камеры малообъемного масляного выключателя посвящен доклад Е. Vogelsanger (Oerlikon, Швейцария).

На основании полученных результатов автор обосновывает конструкцию усовершенствованной дугогасительной камеры для малообъемного выключателя. Характерные черты этой камеры (рис. 2):

1. Дуга 6 удерживается в цилиндрическом газовом пузыре 4 со стенками, образуемыми масляной поверхностью. Вследствие этого обеспечивается интенсивное охлаждение дуги при помощи паров масла.

2. Давление в камере определяется за счет истечения газа и паров через выходную трубу 1, рассчитанную таким образом, что это давление не может достигнуть недопустимых пределов.

3. Перемещение подвижного контакта 9 происходит вниз, т. е. в направлении, обратном истечению газа, который вырывается вверх. Когда дуга гаснет, контакт 9 погружается в холодное масло, что способствует предотвращению образования повторных зажиганий дуги к тому моменту, когда давление в камере падает.

Исследования камеры показали, что при малых токах (100 ÷ 150 А) градиент падения напряжения на дуге остается практически постоянным в течение всего времени горения дуги. При больших отключаемых токах в последний полупериод перед гашением дуги градиент резко возрастает (до 400 ÷ 500 В/см); чем больше ток, тем выше градиент в последний полупериод. Автор объясняет это тем, что при достижении дугой критической длины резко увеличивается охлаждающий эффект паров масла.

Получены весьма интересные зависимости энергии, рассеиваемой дугой отключаемого напряжения и тока. При

анализе этих зависимостей автору удалось получить эмпирическую формулу, дающую связь между энергией дуги  $A$ , величиной тока  $I$  в А и восстанавливающимся напряжением  $U$  в кВ.

$$A_{\max} = 2,2 \cdot 10^{-3} I^{1,2} \sqrt{U} \text{ [kWsec].} \quad (2)$$

Допуская, что 1 kW sec выделяет 60 см<sup>3</sup> газа (относено к нормальному давлению и температуре) и что энергия дуги рассеивается в основном в последний полупериод (0,01 sec.), получаем расход газа  $G_{\max} \approx 6000 A_{\max}$  [см<sup>3</sup>/sec].

Учитывая, что давление в камере практически всегда превышает двойное значение противодействия выхлопной трубы, можно считать, что газ вытекает со звуковой скоростью и давление в камере получается равным:

$$p = \sqrt{\frac{\frac{\chi+1}{\chi} \left(\frac{\chi+1}{2}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \frac{M}{G \cdot R_0} \frac{\sqrt{T}}{T_n} \cdot \frac{G}{\mu S}},}$$

где  $M$ —молекулярный вес газа;  $R_0$ —газовая постоянная на 1 моль = 84,8 · 10<sup>3</sup> см · кг/°С;  $T$ —абсолютная температура в °К;  $T_n$ —нормальная температура (293°К);  $\mu$ —коэффициент истечения; обозначения  $\chi$  и  $S$ —прежние. Принимая  $M=11$ ,  $\chi=1,4$  и  $\mu=0,7$ , получаем:

$$p \approx 2,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{T} \frac{G}{S}. \quad (3)$$

Полагая далее  $T=2500^\circ \text{K}$  и подставляя в (3) выражение для секундного расхода газа, имеем окончательно:

$$p_{\max} \approx 0,8 \frac{A_{\max}}{S} \text{ [ata].} \quad (4)$$

Автор отмечает, что описанная камера обладает хорошими свойствами в отношении автоматических мгновенных повторных включений. Благодаря наличию перегородок в камере масло из камеры не выбрасывается, и поэтому при повторном отключении практически не снижается разрывная мощность, а только несколько возрастает критическая длина дуги.

Председателем технического комитета Ассоциации по испытаниям на короткие замыкания V. A. Brown прочитан доклад, посвященный вопросам испытания аппаратов. Как известно, в 1938 г. владельцы британских лабораторий для испытания на короткие замыкания образовали ассоциацию, которая работает совместно с национальной физической лабораторией (NPL). Доклад представляет собой сводку правил проведения испытаний аппаратов в режиме короткого замыкания, а также обоснование некоторых отклонений от стандарта (В. S. 116), и характеризует ту непрерывную работу, которая проводится иностранными фирмами по методике испытания выключающих аппаратов. Этот материал представляет несомненный интерес и может быть использован при очередном пересмотре государственного стандарта на высоковольтные выключатели и методы их испытаний.

Доктор техн. наук, проф. Ю. В. БУТКЕВИЧ



## Электрохозяйство Швейцарии в годы войны

(Обзор)

«Белый уголь» — единственный вид энергетических ресурсов, которыми располагает Швейцария, и на котором базируется электрификация страны. Общая мощность водных сил оценивается в 2,4 млн. kW при 95% обеспеченности (3,8 млн. kW при 50% обеспеченности, или 5,1 млн. kW по среднему арифметическому расходу воды). Около половины потенциальной мощности уже освоено.

Гидрологический год исчисляется с 1 октября и разделяется на два сезона: осенне-зимний и весенне-летний. Последний характеризуется наличием избыточной энергии стока рек, часть которой аккумулируется в водохранилищах и расходуется в течение осени и зимы. Наиболее высокая цифра расхода воды из водохранилищ за последние годы была отмечена в январе 1945 г., когда за счет аккумулированной энергии было произведено 43% месячной выработки всех гидроэлектростанций.

В период 1938—1939 по 1944—1945 гг. электробаланс страны увеличился с 7 176 млн. kWh до 9 655 млн. kWh (на 35%). Этот рост обусловлен, главным образом, весьма благоприятными гидрологическими условиями, так как ввод новых мощностей был относительно небольшой. Некоторое снижение выработки на гидроэлектростанциях имело место в 1941—1942 и в 1943—1944 гг., в связи с маловодностью зимнего сезона (рис. 1).

В 1944—1945 гг. гидроэлектростанции покрыли 99,3% электробаланса. На тепловых электростанциях было произведено лишь 6 млн. kWh (против 45 млн. kWh в 1938—1939 гг.) и импортировано 55 млн. kWh (в 1938—1939 гг. — 42 млн. kWh).

Участие станций общего пользования, промышленных и железнодорожных, в суммарном электробалансе иллюстрируют следующие показатели:

	1938—1939 гг.		1944—1945 гг.	
	Млн. kWh	% к итогу	Млн. kWh	% к итогу
Электростанции общего пользования	5 464	76,2	7 683	79,6
Промышленные и железнодорожные электростанции	1 670	23,2	1 917	19,8
Импорт	42	0,6	55	0,6
<b>Всего</b>	<b>7 176</b>	<b>100,0</b>	<b>9 655</b>	<b>100,0</b>

Одной из характерных особенностей швейцарского электрохозяйства является «внешняя торговля» электроэнергией. Будучи связана с соседними странами высоковольтными линиями передачи, Швейцария экспортировала значительную часть выработки гидроэлектростанций (главным образом в Германию). Удельный вес экспорта в электробалансе составлял в 1938—1939 гг. — 21,8%, в 1943—1944 гг. — 13,4%, в 1944—1945 гг. — 9,2% (в 1945 г. экспорт в Германию прекратился).

Годовые графики месячного экспорта электроэнергии за последние годы показаны на рис. 2. Импорт производился в небольшом масштабе.

Сдвиги в структуре потребления энергии за время войны произошли, главным образом, по линии бытовых

нужд и электродвигателей: доля коммунально-бытовой нагрузки в суммарном электропотреблении повысилась с 19,7% в 1938—1939 г. до 27,7% в 1944—1945 г., а доля расхода на электродвигатели с 7% до 15% (табл. 1).

Рост коммунально-бытового потребления обусловлен острым дефицитом топлива: гидроэнергия в значительной мере заменяет импортный уголь и нефть. В настоящее

Таблица 1

Структура потребления электроэнергии

Потребители	1938 — 1939 г.		1943 — 1944 г.		1944 — 1945 г.	
	Млн. kWh	% к итогу	Млн. kWh	% к итогу	Млн. kWh	% к итогу
Быт и кустарная промышленность . . . . .	1 411	19,7	2 140	25,0	2 670	27,7
Промышленность (кроме электрохимической и электрометаллургической) . . . . .	819	11,4	1 023	11,9	1 153	11,9
Электрохимия и электрометаллургия . . . . .	1 404	19,6	1 624	18,9	1 401	14,5
Электродвигатели . . . . .	506	7,0	786	9,2	1 526	15,8
Транспорт . . . . .	722	10,0	815	9,5	830	8,6
Потери в трансформаторах и сетях и расход на насосное аккумулятивное . . . . .	751	10,5	1 044	12,1	1 191	12,3
<b>Всего . . . . .</b>	<b>5 613</b>	<b>78,2</b>	<b>7 432</b>	<b>86,6</b>	<b>8 771</b>	<b>90,8</b>
Экспорт . . . . .	1 563	21,8	1 151	13,4	884	9,2
<b>Всего . . . . .</b>	<b>7 176</b>	<b>100,0</b>	<b>8 583</b>	<b>100,0</b>	<b>9 655</b>	<b>100,0</b>

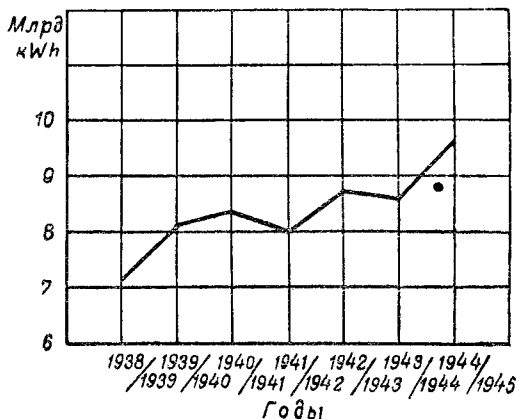


Рис. 1. Динамика электробаланса.

Таблица 2

## Показатели электрификации 7 крупных городов Швейцарии (1943 г.)

Показатели	Города						
	Цюрих	Женева	Базель	Берн	Лозанна	Люцерн	С <sup>м</sup> -Галлен
Число жителей (тыс.) . . . . .	348	184	172	133	125	66	63
Общее потребление электроэнергии (млн. kWh) . . . . .	456	204	263	125	104	53	44
Максимум нагрузки (тыс. kW) . . . . .	90,0	38,8	35,6	21,6	20,9	9,8	10,5
Удельное потребление электроэнергии (в kWh на 1 жителя) . . . . .	1310	1110	1530	940	835	800	700
количество электроплит (шт.) . . . . .	21 000	4 500	3 400	5 900	6 000	1 050	1 170
Количество водонагревателей (шт.) . . . . .	33 850	11 740	23 000	12 300	5 730	6 000	2 660
Потребление электроэнергии для плит и водонагревателей (млн. kWh) . . . . .	116,0	80,9	68,0	46,0	48,9	22,5	7,6
То же в % к общему потреблению электроэнергии в городе . . . . .	25,4	39,7	25,8	36,8	47,0	42,5	17,3

время около 20% всех бытовых абонентов в Швейцарии готовят пищу исключительно на электрических плитах. Последние находят применение также в ресторанах, где их суммарная мощность составляет 115 000 kW. Большой популярностью в быту пользуются электрические водонагреватели, которые включаются преимущественно в ночные часы (по удешевленному тарифу), тем самым способствуя уплотнению суточных графиков нагрузки электростанций.

В таблице 2 приведены некоторые показатели электрификации (в частности, распространение электрических плит и водонагревателей) 7 крупных городов Швейцарии.

Электрокотлы имеют большое значение в электрохозяйстве Швейцарии, особенно в последние годы, не только как средство экономии топлива, но и как способ регулирования годовых графиков нагрузки электросистем. В летний сезон, когда имеется избыток электроэнергии, промышленность пользуется для производства пара и горя-

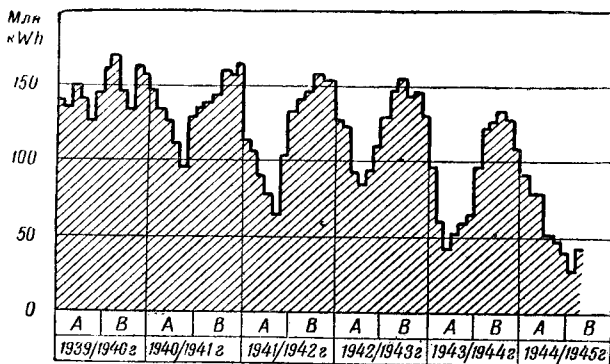
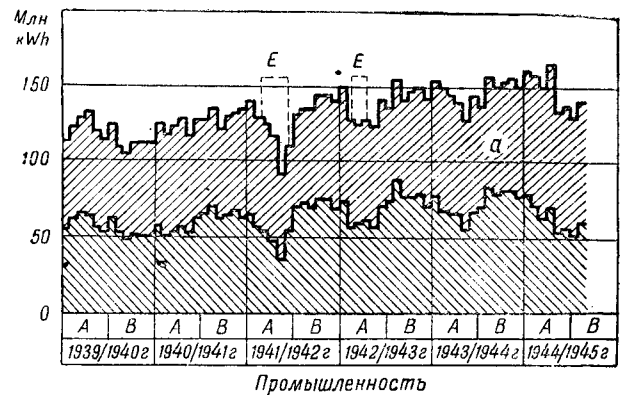
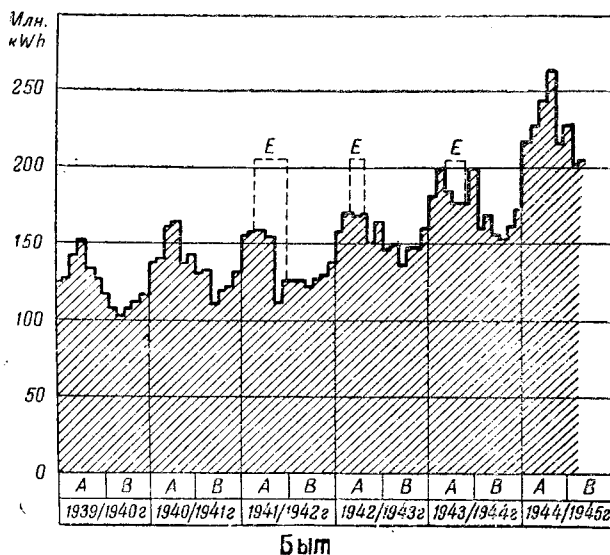


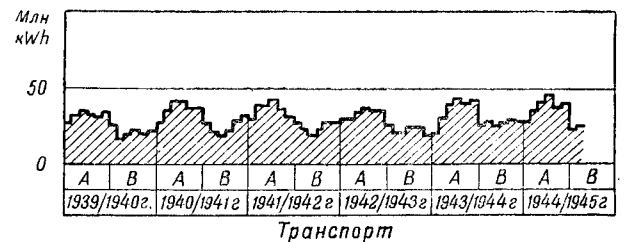
Рис. 2. Экспорт электроэнергии. А—зима; В—лето.



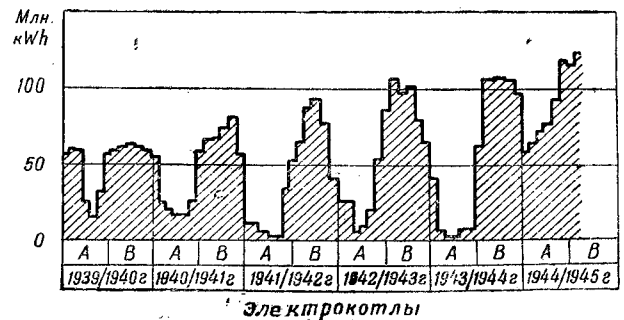
Промышленность



Быт



Транспорт



Электрокотлы

Рис. 3. Годовые графики месячных отпусков электроэнергии отдельными категориями потребителей. А—зима; В—лето; Е—периоды ограничения потребления; а—общая промышленность; б—электрохимическая и электрометаллургическая.

чей воды электрическими котлами, а зимой переходит на каменный уголь (рис. 3). Суммарная мощность электростанций (от 50 kW и выше), питаемых от электросетей общего пользования, составляла на 1 апреля 1945 г. 550 000, а их общее потребление в 1944—1945 г. — 1,5 млрд. kWh (в 3,3 раза больше общего потребления электроэнергии в г. Цюрихе в 1943 г.) Наиболее крупный электростанция в Швейцарии имеет мощность 12 000 kW. В 1945—1946 гг. ожидалось присоединение к сетям новых котлов общей мощностью порядка 100 000 kW.

В годы войны, особенно в маловодный период 1941—1942 гг., потребление электроэнергии жестко лимитировалось. Наряду с ограничением бытового потребления был проведен ряд мероприятий для сокращения потребления в коммунальном хозяйстве; например, занятия в школах происходили лишь в течение 5 дней в неделю, были ограничены — время работы ресторанов, отпуск горячих блюд и освещение витрин магазинов, запрещены световые рекламы, применение отопительных приборов и т. д.

Намечавшееся в период войны электростроительство

было осуществлено лишь частично, ввиду дефицита металлов и прочих материалов, а также трудностей в урегулировании вопросов, связанных с затоплениями. Фактически были пущены 4 новых гидроэлектростанции (Рекинген, Инерткирхен, Вербуа и Люсандро) и заканчивалась первая очередь гЭС Рупперсвилль. Кроме того, было построено несколько гЭС небольшой мощности и расширены некоторые из действовавших установок. Благодаря этим сооружениям, средняя технически возможная выработка гидроэлектростанций (в зимний сезон) повысилась по сравнению с 1939 г. примерно на 600 млн. kWh. Общая установленная мощность швейцарских электростанций в 1945 г. составила около 2,6 млн. kW.

**В. И. МИХАЙЛОВ**

### Литература

1. Bull. ASE, № 17a, 1945 и № 1, 1946.
2. Statistical Year Book of the World Power Conference-№ 3.

## Локомотивы настоящего и будущего

(Обзор)

В последние годы во всех странах идет интенсивная работа по созданию новых типов локомотивов. Характерным для новых локомотивов является все более широкое применение электродвигателей. Кроме тепловозов, которые получили за последние 5 лет широкое распространение в США, большой интерес вызывают турбовозы. В магистральных тепловозах электрическая передача является единственно применяемой. Турбовоз с газовой турбиной (газотурбовоз) по характеристикам близок к тепловозу и по общему мнению должен выполняться с электропередачей. Турбовоз с паровой турбиной может быть выполнен с механической или электрической передачей и эти передачи будут, очевидно, конкурировать между собой. Таким образом, перспективы развития локомотивостроения представляют существенный интерес и с точки зрения развития электропромышленности.

Фирма Westinghouse провела работу по сравнению различных видов локомотивов и оценке перспектив их применения. Результаты этой работы опубликованы в двух статьях, основные положения которых изложены ниже.

Паровоз имеет к. п. д. 6—9%. Известны средства к повышению к. п. д. паровоза: двухкратное расширение пара, применение конденсации пара, клапанное распределение вместо золотникового; но все эти средства усложняют конструкцию локомотива и повышают его стоимость. Поэтому массового применения их ожидать не приходится. Основные преимущества паровоза: низкая начальная стоимость, простота производства и ремонта, возможность работы на дешевых видах топлива.

Электрическая тяга, вследствие связанных с нею больших капитальных затрат, до сего времени применялась лишь на весьма грузонапряженных участках или там, где по эксплуатационным соображениям нельзя было применить другого вида тяги. Однако, в последнее время появились обстоятельства, которые выдвигают электрическую тягу на первое место. Во-первых, железные дороги должны повысить скорость движения: пассажирских поездов — выше 160 km/h, товарных — выше 110 km/h. Такие скорости можно осуществить только повысив мощности локомотивов. В этих условиях применение электрической тяги на грузонапряженных участках усиливает даваемые ею экономические выгоды и расширяет пределы ее применения. Во-вторых, прямые расходы при электрической тяге являются наименьшими по сравнению с другими видами тяги. В-третьих, стоимость электрической энергии, вследствие непрерывного повышения мощности и к. п. д. энергосистем, имеет тенденцию к снижению, в то время как все виды топлива повышаются в цене.

По мнению автора [Л. 1], будущие электровозы должны иметь следующие основные характеристики. Первый тип электровоза будет иметь обычную в настоящее время формулу 2—3—3—2. Эта формула является наилучшей, и локомотивы любого типа вероятно строились бы

по такой формуле, если бы это было возможно без ущерба для других их характеристик. Новый электровоз по габаритам будет не больше современных, возрастет лишь немного его вес. Мощность же возрастет более, чем на 50% и достигнет 7 500 л. с.—длительно и 13 000 л. с.—максимально. Второй тип будет иметь формулу 2—4—4—2. Без значительного увеличения обычных размеров он будет обладать длительной мощностью 10 000 л. с. и максимальной — 17 000 л. с.

Оба типа электровоза могут быть построены как для постоянного, так и для однофазного тока. Производство их может быть начато в ближайшее время. Мощность этих электровозов будет достаточна для тяги тяжелых пассажирских поездов из 15—20 вагонов со скоростью 160—200 km/h по участкам различного профиля, или для тяги товарных поездов из 125 вагонов со скоростью 110—120 km/h в аналогичных условиях. Такие локомотивы должны удовлетворять любым требованиям, которые возможно сейчас мыслить.

Тепловозы обязаны своим успехом техническим достоинствам: высокому к. п. д., высокому коэффициенту использования, большому пробегам, отсутствию потребности в угле и воде. Недостатки тепловоза — большой вес и большая длина — привели к большому числу движущих осей. Отсюда возникло случайное преимущество — очень высокое пусковое усилие без боксования и возможность спокойной остановки и трогания без толчков. Электрическая передача применяется на всех поездных и почти на всех маневровых тепловозах. Слабые места: 1) ограниченность мощности двигателя и 2) дизель является поршневой машиной. Первое постепенно преодолевается: имеется тепловоз на 3 000 л. с. и возможен на 5 000 л. с. Второй дефект является органическим.

Крупнейший современный тип тепловоза с одним кузовом имеет мощность около 2 500 л. с. на обходе или мощность дизеля—3 000 л. с. и длину около 28 м. При той же длине электровоз может давать 10 000 л. с., а паровоз—около 8 000 л. с. или почти в 3 раза более, чем тепловоз.

Современный сдвоенный тепловоз может еще вести состав весом 1 150 t со скоростью 125 km/h. При скорости 160 km/h требуется строенный тепловоз. Если же от современных тепловозов потребовать скорости более 160 km/h, то конструкция получается уже чудовишной: для скорости 200 km/h локомотив должен иметь длину 110 м, вес его будет достигать 80% веса поезда и почти половина мощности будет затрачиваться на передвижение самого локомотива. Неправильно мнение, что указанные недостатки связаны с электрической передачей на тепловозе. Наоборот, только благодаря электрической передаче тепловоз мог завоевать то место, которое он сейчас занимает.



Показатели	Паровоз	Электровоз	Тепловоз	Паротурбовоз	Газотурбовоз
Максимальная касательная мощность в л. с. в настоящем . . . . .	7 000	5 000	2 500	6 500	
в будущем . . . . .	8 000	10 000	5 000	9 000	7 000
Вероятная экономическая мощность единицы в л. с. . . . .	1 500—8 000	1 000—10 000	400—5 000	5 000—9 000	2 000—7 000
Топливо . . . . .	Уголь, нефть	Уголь, вод. энерг.	Нефть	Уголь, нефть	Нефть, уголь
Термический к. п. д. в %	6—9	20—25	20—25	7—10	15—20
Вес на единицу касательной мощности kg/л. с.	64—68	32—45	82—100	55—64	45—57
Длина на единицу касательной мощности m/1 000 л. с. . . . .	6,1—7,6	3,1—4,9	10,7—10,7	4,9—6,1	4,6—6,1
Коэффициент использования времени в % . . . . .	60—75	90—95	85—95	65—75	85—95
Потребление воды kg/л. с. h. . . . .	6,8—9,1	—	Незначительное	4,5—7,3	Незначительное
Кратковременная перегрузочная способность в % . . . . .	Ничтожная	175—200	Незначительная	Незначительная	Незначительная
Влияние климата . . . . .	Значительное	—	Незначительное	Значительное	Незначительное
Потери на остановах . . . . .	Высокие	Низкие	Низкие	Высокие	Низкие
Область эксплуатации . . . . .	Всевозможная	Всевозможная	Всевозможная	Поездная	Поездная

Положение с тепловозами значительно улучшилось бы, если можно было бы сосредоточить большую мощность в одном кузове. Технически возможно по условиям вписывания в габариты большинства дорог построить 12-осный локомотив длиной около 28 м. Из 12 осей при современных тяговых двигателях можно будет сделать ведущими только 8 осей и это удовлетворит большинству требований пассажирского движения по силе тяги. Однако, скорость будет ограничена мощностью дизеля. На таком локомотиве можно будет разместить дизель мощностью в 3 000 л. с., при суммарной мощности электродвигателей 6 000 л. с.

Можно надеяться, что недостатки тепловоза будут устранены. Самая большая работа должна вестись в области улучшения дизеля.

Паротурбовоз с механической передачей уже прошел в США свыше 76 000 км и после осмотра было установлено, что лопатки турбины и шестерни оказались в хорошем состоянии. В скором времени выйдет в эксплуатацию паротурбовоз с электрической передачей. Паротурбовоз имеет очень малый вес на единицу мощности, может быть выполнен очень мощным, имеет постоянное касательное усилие вместо пульсирующего усилия паровоза, его к. п. д. несколько выше, чем паровоза. Вместе с тем, к нему относятся главные преимущества паровоза: низкая начальная стоимость и потребление дешевых сортов топлива. Он может явиться серьезным конкурентом паровозу. Его недостатки те же, что и паровоза: низкий к. п. д., наличие парового котла и тендера.

Электрическая передача имеет за собой большой опыт эксплуатации; развитие электротехники ведет к получению более легкого и занимающего меньше места оборудования. Электрическая передача на турбовозе должна иметь другие характеристики, чем на тепловозе. Турбина работает с числом оборотов в 6—20 раз большим, чем дизель, имеет стабильный момент, не теряет скорости при перегрузке и ее мощность остается постоянной при широких изменениях скорости. При этих характеристиках передача переменным током заслуживает большого внимания. Первый турбозлектровоз имел, как опытный образец, передачу постоянным током, однако, дальнейшее развитие сделает вполне сравнимой по весу, стоимости и характеристикам и передачу переменным током.

Применение на локомотивах турбин позволяет решить вопрос о создании парового локомотива нового типа, в частности, поставить его на тележки, доказавшие свою практичность на электровозах и тепловозах.

Газотурбовоз в сравнении с паровыми локомотивами имеет то преимущество, что не требует чистой воды и котла и имеет более высокий к. п. д. Его преимущество по сравнению с дизелем — непрерывность работы. Три функции: сжатие, горение и расширение сгоревших газов, которые в дизеле скомбинированы в одном цилиндре и сменяются одна другой, прерываясь, — в турбовозе выполняются компонентами, каждый из которых предназначен для одной функции и работает непрерывно. Газовые турбины потребляют тяжелые сорта жидкого топлива, вдвое дешевле дизельного. В дальнейшем возможно применение угля. К. п. д. зависит от допускаемой температуры газов, входящих в турбину. В настоящее время при температуре около 700° С к. п. д. равен около 20%, при температуре 800—820° С он достигает ~ 24% и при 980° С — ~ 30%. Таким образом, он зависит от жаростойкости металлических частей турбины. Передача по всей вероятности будет, как и в тепловозе, электрической. Газотурбовоз является машиной, имеющей несомненную перспективу.

Сравнение различных видов локомотивов по основным показателям приведено в таблице (см. выше).

Следует заметить, что не со всеми данными таблицы, приведенной автором, можно согласиться. Коэффициент полезного действия тепловоза взят необоснованно низким. Эксплуатация показывает, что средний к. п. д. тепловоза составляет 26—29%. С другой стороны к. п. д. электрической тяги при питании от тепловой электростанции вряд ли составит 20—25%. Для паровоза и турбовоза правильнее было бы указать вес и длину вместе с тендером, составляющим неотъемлемую принадлежность их. При этом вес и длина паровозов получаются больше, чем вес и длина тепловозов.

Кандидат техн. наук А. Д. СТЕПАНОВ  
и инж. Л. А. ВИСЛОУХ

#### Литература

1. Westinghouse Eng., май 1946.
2. Railway Mech. Eng., май, стр. 239—244, 1946.

# Централизация питания сварочных постов

(Обзор)

Рассмотрение вопроса о централизации питания сварочных постов надлежит проводить по двум направлениям: сварка на постоянном токе и сварка на переменном токе. Остановимся сначала на сварке постоянным током.

Ряд судостроительных предприятий применяет для сварочных работ на постоянном токе питание индивидуальных сварочных постов от специальных центральных станций. Такие станции представляют собой совокупность многопостовых стационарных или передвижных сварочных агрегатов, которые питают рабочие посты через распределительную сеть сварочного тока с индивидуальными регуляторами у каждого рабочего места. Такая централизация дает возможность значительно уменьшить установленную мощность оборудования и сократить потери энергии.

Преимущества централизации сварочных постов объясняются следующим. При ручной сварке приходится прерывать сварку для смены створенного электрода и укрепления в электрододержателе нового электрода. Потеря времени на смену электрода зависит от опыта рабочего. В настоящее время считается, что длительность рабочего периода равна 0,4; например, при рабочем цикле в 5 мин дуга горит лишь 2 мин, пока производится сварка.

Делаются попытки увеличить длительность рабочего периода, тем более, что от него зависит коэффициент загрузки сварочного агрегата. На судостроительных верфях и в аналогичных предприятиях этот коэффициент мал и близок к 0,3. Экономия в расходе энергии при централизованном питании получается за счет устранения холостого хода индивидуальных установок. Централизованное питание обеспечивается, обычно, не одним агрегатом большой мощности, а двумя или несколькими работающими параллельно агрегатами. Это дает возможность нормально работать только частью мощности, включая полную мощность лишь при пиках нагрузки.

Распределительные сети, обычно, работают на напряжении в 40 В. Выбор такого напряжения объясняется стремлением максимально повысить к. п. д. установки. Имеется тенденция к дальнейшему снижению этого напряжения даже до 30 В (промышленного решения для 30 В пока еще нет).

Очень сложен вопрос о поддержании постоянства напряжения в распределительной сети с тем, чтобы колебания нагрузки в сети не влияли на дугу каждого отдельного сварщика. Величина напряжения на входных клеммах сварочного регулятора определяется двумя факторами: падением напряжения в линии в результате общей нагрузки сети, и колебаниями этого падения в результате мгновенных колебаний общей нагрузки. Первое падение зависит от длины линии, ее сечения и располагаемых электротехнических средств для увеличения напряжения на клеммах генератора в зависимости от общей нагрузки и может доходить до 8 В. Второе падение вызывается мгновенными колебаниями нагрузки и может влиять на устойчивость сварочной дуги; оно должно быть не более  $\pm 1$  В. Как показала практика, напряжение распределительной сети в 40 В вполне обеспечивает нормальные условия работы.

Агрегаты для питания централизованной сети обычно состоят из асинхронного двигателя и генератора постоянного тока. Двигатель питается непосредственно от сети переменного тока высокого напряжения (до 5,5 кВ). Пуск агрегата производится всегда «холостую» путем переключения со звезды на треугольник.

Сварочный генератор выбирается так, чтобы его напряжение несколько возрастало по мере увеличения нагрузки и в то же время не было чрезмерно велико при холостом ходе. Иногда от генераторов требуется работа в пределах 40—60 В. Все эти трудности решаются путем применения перекомпаундированной обмотки возбуждения. В этих генераторах обычно применяются медно-графитные щетки, что дает сокращение потерь на коллекторе. Генераторы рассчитываются на мгновенные перегрузки до 25%, причем их к. п. д. при нагрузке от 3/4 до 5/4 не изменяется.

Для того, чтобы несколько агрегатов могли работать параллельно, необходимо, чтобы напряжение соединенных

генераторов было строго одинаковым и, чтобы их компаундирование компенсировало колебания напряжения, получающиеся в результате колебаний сварочного тока. Эта компенсация к тому же должна происходить одновременно во всех включенных генераторах. Для регулирования напряжения этих генераторов применяются быстродействующие регуляторы напряжения типов, хорошо известных в практике работы электрических машин.

Практически такая работа двух станций дала вполне удовлетворительные результаты при очень чувствительной стабилизации мощности и напряжения обеих станций. Включение на параллельную работу более двух станций, не испытывалось ввиду большой сложности их соединения.

Перед войной были осуществлены передвижные станции (на 4000 А), смонтированные со всем необходимым оборудованием в нормальном железнодорожном вагоне. Эти вагоны подавались в любое место верфей, где имелось высокое напряжение для питания двигателей агрегатов. Такие установки оказались очень удобными в условиях судостроительных верфей с разбросанными объектами сварки.

Основным назначением сварочных регуляторов, подключаемых в ответвлениях от распределительной сети низкого напряжения, является регулирование силы тока сварщиком. Эти регуляторы представляют собой чаще всего омические сопротивления. При сравнительно высоких напряжениях в распределительной сети (60—65 В) эти регуляторы только омические. В случаях же, когда в целях экономии напряжение в сети понижено до 40 В, первое и повторное зажигание дуги становится возможным лишь при наличии мгновенных перенапряжений, для получения которых применяются устройства, действующие на принципе резонанса. Существует целый ряд типов подобных сварочных регуляторов: BBC, Westinghouse, AEG и др.

Распределительные сварочные сети должны рассчитываться, исходя не из нагрева, а из падения напряжения. Отходящие от станции питающие фидеры могут быть подземными или воздушными. Шины сварочного тока устанавливаются на изоляторах, расположенных на бетонных стойках, и защищаются кожухом от случайного замыкания. Очень важным моментом при монтаже сети является получение минимальных переходных сопротивлений в местах соединений. Сеть должна быть секционирована. Перед войной сварочные сети строились исключительно из меди, в настоящее же время ставится вопрос о применении алюминия. В связи с этим возникает проблема создания хороших контактов между алюминиевыми шинами и ответвлениями к регуляторам. В условиях приморских районов дело особенно усложняется повышенной влажностью воздуха, в результате чего сильно разъедается алюминий и на его поверхности образуется изолирующая окисная пленка, которая сильно увеличивает переходное сопротивление в местах соединений распределительных шин.

Ввиду дороговизны сети желательно доводить ее протяженность до минимума. Поэтому может оказаться лучшей схема с несколькими станциями, при расположении их в центрах сварочной нагрузки, или применение передвижных станций.

Дальнейшие перспективы применения централизованных станций постоянного тока следует считать весьма благоприятными. При их развитии придется разрешить некоторые проблемы, главнейшей из которых является повышение общего к. п. д. сварочных установок, что в основном зависит от напряжения питания сварочной сети. В настоящее время самым низким из применяемых напряжений является 40 В. Еще до войны делались попытки перейти на 30 В; при этом к. п. д. достигает 0,83.

Современные регуляторы рассчитаны на ток до 300 А. Однако, с технологической точки зрения, представляется очень желательным перейти на большие сварочные токи. Увеличение плотности тока в электроде даст значительное увеличение скорости отложения металла без понижения его механических качеств.

Централизация питания сварочных постов при сварке на переменном токе еще фактически только начинает раз-

живаться и ее широкое применение — дело будущего. Сварка на переменном токе имеет свою специфику, с которой приходится считаться при решении вопроса о переходе на центральное питание.

При сварке последовательно к дуге приходится подключать омическое или реактивное сопротивление. Основная разница между сварочными станциями на постоянном и переменном токе состоит в том, какое сопротивление включается последовательно с дугой: омическое или реактивное.

Сравнивая обе системы по току короткого замыкания, можно констатировать, что при одном и том же напряжении, одном и том же токе в дуге, токи короткого замыкания для системы с омическим сопротивлением будут в 2,5 раза больше, чем при реактивном. Величина сварочного тока сильно колеблется в зависимости от длины дуги. Как показали исследования при омическом сопротивлении и напряжении сети в 40 В, колебание напряжения дуги в 8% вызывает изменение тока на 13,5%, а при реактивном сопротивлении и 65 В, такое колебание напряжения вызывает изменение тока лишь на 1,5%. Влияние изменения напряжения в сети на сварочный ток будет также различно. При омическом сопротивлении и напряжении сети в 40 В — падение линейного напряжения на 2 В вызывает уменьшение сварочного тока на 13,5%, а при реактивном сопротивлении и 65 В — такое же падение напряжения вызовет уменьшение тока лишь на 4%. Устойчивость дуги при переменном токе получается большая при добавочном реактивном сопротивлении.

Все соображения относительно тока короткого замыкания, изменения силы тока в результате колебания напряжения в сети и изменения длины дуги остаются в силе.

При сварке на переменном токе возникают два дополнительных обстоятельства: а) необходимость в обманных электродах и б) необходимость работать более короткой дугой.

При сварке на постоянном токе имеет место неприятное явление магнитного дутья дуги. С возрастанием этого дутья получается: а) выдувание пламени дуги, что лишает расплавленный металл защиты от окисления, б) выдувание самой дуги приводит к тем же неприятностям, что и п. «а», и в) блуждание дуги по свариваемому изделию (этот случай имеет место, когда изделие соединено с плюсом).

При переменном токе этой опасности нет. Магнитное поле здесь демпфируется токами Фуко и гистерезисом в соседних металлических предметах.

Очень большой дискуссии подвергался вопрос о технике безопасности. Министерство труда во Франции установило в качестве предела для очень низкого напряжения постоянного тока — 50 В, а для переменного — 24 В. Однако, как показали работы Кервран, напряжение переменного тока в 65 В не является опасным и он рекомендует даже пользоваться трехфазными установками на 65—115 В.

Сравнительные данные для сварки на постоянном и переменном токе сведены в таблицу 1.

Следовательно при применяемых в настоящее время напряжениях переменного тока, обманных электродах и опытных рабочих, сварка на постоянном и переменном токе дает одинаковые результаты.

Рассмотрим сварочные центральные станции на переменном токе. Фактически эта установка будет представлять собой: трансформатор, сеть, соединяющую этот трансформатор со сварочными постами и индивидуальные сварочные посты, оборудованные реакторами. Индивидуальные сварочные посты имеют напряжения порядка 45—50 В. При централизации их питания желательно несколько повысить вторичное напряжение трансформатора для того, чтобы уменьшить сечения проводов. Обычно, по целому ряду соображений, во Франции применяют напряжения около 65 В, в Англии доходят до 100 В.

Мощность трансформатора желательно выбрать меньше суммы мощностей всех установленных постов потому, что: во-первых, не всегда работа производится с максимальной мощностью и, во-вторых, режим работы по сварке — прерывистый.

Возможно также непосредственное присоединение сварочной станции к трехфазной сети. При этом, однако, ввиду того, что свариваемые детали в условиях судостроения могут оказаться соединенными между собой, распределительная сварочная сеть должна быть обязательно четырехпроводной. Нейтральный провод присоединяется к свариваемому изделию, а фазовые провода — к различным реакторам, регулирующим сварочные токи.

Сварка не является единственной работой, выполняемой на судах. Здесь требуется также производить работы по шлифовке и обрубке, которые выполняются специальными приспособлениями с приводом от электродвигателей. Следовательно, сварочная сеть должна иметь такое напряжение, которое обеспечило бы как сварку, так и моторный привод. Таким напряжением является 115 В между фазами, что дает 65 В между фазой и нейтралью.

Трансформатор должен быть включен по схеме треугольных — звезда-зигзаг, ибо включение звезда — звезда, в условиях неуравновешенной нагрузки различных фаз, может повести к недопустимым напряжениям в отдельных фазах. Включение треугольник — звезда применяется в тех случаях, когда первичные напряжения ниже 10 кВ, а звезда — зигзаг — при напряжениях свыше 10 кВ.

Ввиду резко-переменного режима работы трансформатора, с возможными большими перегрузками, последний снабжается дистанционным термометром, вызывающим отключение трансформатора при повышении температуры масла выше определенной величины.

Вся распределительная сеть должна быть четырехпроводная, в общем кабеле. Сечение нейтрального провода принимается такое же, как и для фазовых проводов.

Распределение сварочных постов между отдельными фазами должно быть равномерным. Для повышения коэффициента мощности следует применять батареи конденсаторов или перевозбужденный синхронный двигатель. Для станций, питаемых от высокого напряжения, желательно применять конденсаторы, включенные на первичной стороне трансформатора, ибо напряжение на вторичной стороне так мало, что конденсаторы здесь получатся очень громоздкие и дорогие. Можно компенсировать реактивное падение напряжения в сети при помощи последовательно-включенных конденсаторов. Такой способ также имеет ряд достоинств.

Первоначальная стоимость станций на переменном токе значительно ниже, чем для постоянного тока. Это можно проследить по отдельным элементам: 1) Трансфор-

Таблица 1

Свойства	Система тока, система регулятора	Постоянный, омический	Переменный, омический	Переменный, реактивный
Электрические	Характеристика Ток короткого замыкания Коэффициент мощности Коэффициент полезного действия	Прямолинейная Повышенный Низкий Низкий	Прямолинейная Повышенный Повышенный Низкий	Эллиптическая Умеренный Низкий Высокий
Физические	Изменение силы тока Возможность применения не- обманных электродов	Повышенное	Повышенное	Малое
Эксплуатационные	Магнитное дутье Длина дуги Устойчивость дуги	Да Есть Длинная Хорошая	Нет Нет Короткая Посредственная	Нет Нет Короткая Средняя

мотор стоит значительно дешевле, чем агрегат из мотора и генератора низкого напряжения. Кроме того, при напряжениях свыше 5 kV трехфазные электродвигатели вообще не могут питаться непосредственно от высоковольтной сети и тогда приходится устанавливать еще дополнительный трансформатор, стоящий один столько же, сколько трансформатор для станции на переменном токе. 2) Стоимость распределительной сети, примерно, одинакова для обоих случаев. 3) Реакторы при сварке на переменном токе стоят несколько дороже, чем сопротивления, применяемые на постоянном токе в том случае, если эти последние не разделены на две части. В противном случае преимущество будет на стороне реакторов.

В приводимой ниже таблице 2 даны значения к. п. д. и коэффициента мощности, исчисленные для двух станций: на постоянном токе — 40 V и на трехфазном — 65 V. В обоих случаях принято, что станции питаются от трехфазной сети высокого напряжения и работают в половину нагрузки.

Таблица 2

Элементы установки	Постоянный ток		Переменный ток	
	к. п. д.	cos φ	к. п. д.	cos φ
Трансформаторы	0,96	0,95	0,94	0,95
Генераторы	0,73	0,87	—	—
Сварочные цепи	0,625	1,0	1,0	0,385
Общее значение	0,44	0,82	0,94	0,365

Расход энергии при станции на постоянном токе составляет 7,5 kWh на 1 kg расплавленного металла, а для переменного тока — 3,3 kWh на 1 kg.

Централизованная установка для сварки имеется на верфях в Дюнкерке и результаты ее эксплуатации настолько благоприятны, что предполагается еще более

увеличить ее мощность. Трансформатор этой установки имеет мощность в 150 kVA и включен непосредственно в трехфазную сеть 3 000 V, вторичное напряжение — 69 V. Это дает возможность получать на каждой фазе по 720 A, что достаточно для работы 6—7 сварщиков на фазу. Обмотки трансформатора включены по схеме звезда—зигзаг. Реактор представляет собой цилиндрическую обмотку, в которой может перемещаться железный сердечник, управляемый штурвалом. Эта установка дает расход энергии в 3,3 kWh/kg расплавленного металла и  $\cos \varphi = 0,5$ .

Централизованная установка на постоянном токе имеется на верфи в Пеное (Penhoet), на основании опыта работы которой и составлена статья Фаермана [Л. 1].

Первый крупный опыт в области сварки на переменном токе в Англии был проведен при сварке авианосца «Арк-Ройаль». Здесь были применены и постоянный и переменный ток. Первый получался от генераторов по 2 000 A, 60 V. Постоянным током питалось 40 сварочных постов, а переменным — 50. Кроме того, было установлено еще два более мелких трансформатора по 900 A, т. е. на 12—15 сварочных постов. Главное внимание было уделено равномерному распределению сварочных постов между фазами. Эксплуатация установки показала, что с точки зрения к. п. д. переменный ток имеет безусловное преимущество.

Из пяти английских верфей на трех применяют исключительно переменный ток, а на двух других — один и другой.

В качестве одной из проблем питания сварки на постоянном токе стоит также вопрос об использовании сухих выпрямителей.

Инж. А. Г. ФАЙН

## Литература

1. М. W. Faergaap. Электрические характеристики установки и оборудования централизованного питания дуговой сварки на постоянном токе. Bull. SFE, т. 6, № 55, 1946.
2. C. Wolff. Централизованное питание при сварке на переменном токе. Bull. SFE, т. 6, № 55, 1946.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СТАНЦИИ, СЕТИ И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

Исследования по вопросам электропередачи трехфазного тока в Германии. *El. World, m. 126, № 13, стр. 88 — 90, 1946.*

Изучение относящихся к 1942 г. работ немецких инженеров, посвященных техническим и экономическим вопросам передачи мощности 2 млн. kW на расстояние 600 km, показывает, что в случае реализации этого сооружения в тот период оно было бы осуществлено на трехфазном токе при напряжении 400 kV, 50 Hz. Рассматривались шесть систем передачи энергии.

Трехфазный ток: 1) воздушная линия 50 Hz; 2) воздушная линия с передачей энергии полуволной с частотой 239 Hz; 3) кабельная линия 50 Hz; 4) кабельная линия 16 2/3 Hz.

Постоянный ток: 5) воздушная линия; 6) кабельная линия.

Системы 2, 3 и 4 были отклонены вследствие их малой экономичности — к. п. д. этих передач соответственно составляли бы 77,8, 73 и 68%.

Детальному исследованию были подвергнуты передачи с применением: 1) воздушных линий 400 kV, 50 Hz, 2) воздушных линий 650 kV постоянного тока; 3) кабельных линий 800 kV постоянного тока. Принималось, что энергия передается в одном направлении, годовое число часов использования пропускной способности передачи высокое и величина напряжения электропередачи максимальная возможная.

Воздушная линия 400 kV трехфазного тока. Для передачи 2 млн. kW были выбраны 6 цепей с полыми сталеалюминиевыми проводами с наружным

диаметром 50 mm, суммарным сечением 630 mm<sup>2</sup>, сопротивлением 0,05 Ω/km (при температуре провода 45° C), индуктивностью 1,305 · 10<sup>-3</sup> H/km, емкостью 9,86 · 10<sup>-9</sup> F/km при утечке 0,5 kW/km. Предельная токовая нагрузка

Таблица 1

Электрические характеристики линий при передаче 2 млн. kW на расстояние 600 km

Характеристики	Воздушная линия 400 kV трехфазного тока	Воздушная линия 650 kV постоянного тока	Кабельная линия 800 kV постоянного тока
Напряжение на питающем конце, kV	395	682	839
Напряжение на приемном конце, kV	400	650	800
Регулирование, %	1,27	4,7	4,65
cos φ на питающем конце	0,968	—	—
cos φ на приемном конце	1,0	—	—
Суммарные потери, тыс. kW	166,34	207	204,8
Коэффициент полезного действия электропередачи, %	92,3	90,7	90,9

Таблица 2

## Стоимость электропередач

Название элемента электропередачи	Воздушная линия 400 kV трехфазного тока			Воздушная линия 650 kV постоянного тока			Кабельная линия 800 kV постоянного тока		
	Единичная (в марках)	Суммарная (в млн. марок)	В % относительно итога	Единичная (в марках)	Суммарная (в млн. марок)	В % относительно итога	Единичная (в марках)	Суммарная (в млн. марок)	В % относительно итога
Повысительная подстанция . . . . .	20,5 (на 1 kVA)	55,35	15,75	50 (на 1 <sup>1</sup> kW)*	132*	29	—	126*	30
Понижительная подстанция . . . . .	20,5 (на 1 kVA)	55,35	15,75	70 (на 1 <sup>2</sup> kW)**	168**	37	—	161,7**	39
Шунтовые реакторы	6,5 (на 1 kVA)	3,9	1,1	—	—	—	—	—	—
Устройства для компенсации тока замыкания на землю	18,5 (на 1A)	7,4	2,1	—	—	—	—	—	—
Всего по подстанциям . . . . .	—	122	34,7	—	300	66	—	287,7	69
Линия . . . . .	127 500 (на 1 km)	229,5	65,3	42 500 (на 1 km)	153	34	54 100 (на 1 km)	130	31
Итого . . . . .	176 (на 1 kW)	351,5	100	226,5 (на 1 kW)	453	100	208,85 (на 1 kW)	417,7	100
Относительная стоимость, % . . . . .	100	—	—	129	—	—	119	—	—

\* Включая стоимость выпрямителей.

\*\* Включая стоимость инверторов.

Таблица 3

## Относительная стоимость передачи 1 kWh (в %)

Годовое число часов использования электропередачи	Воздушная линия 400 kV трехфазного тока	Воздушная линия 650 kV постоянного тока	Кабельная линия 800 kV постоянного тока
5 000	100	135	122
6 500	77	104	94
8 000	63	84	76

ка (при 900 А на провод) каждой цепи составляет 623 тыс. kW. Потребность в реактивной мощности на приемном конце — 100 тыс. kVA, а зарядная мощность (при 400 kV) — 217 тыс. kVA.

Предельная, устойчиво передаваемая по одной цепи, мощность равна 685 тыс. kW; однако, из соображений надежности рабочий предел был принят равным 2/3 от этой величины, т. е. 457 тыс. kW.

Воздушная линия 650 kV, постоянного тока. Напряжение линии по отношению к земле с точки зрения работы изоляции и потерь на корону было принято равным амплитудному значению напряжения переменного тока, т. е.  $\frac{400\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 325$  kV. Была выбрана система

650 kV с заземленными средними точками по обоим концам линии. При аварийном отключении одного из проводов представлялось возможным передавать около 50% нагрузки по системе «провод—земля». Для передачи были выбраны 6 цепей, подвешенных на трех опорах, с применением тех же проводов, что и в линии 400 kV трехфазного тока. При той же токовой нагрузке в 900 А на провод предел передаваемой мощности составляет 585 тыс. kW на цепь.

Несмотря на то, что максимальное напряжение выпрямителей и инверторов по отношению к земле достигало в то время 200 kV, было принято, что дальнейший рост этой величины вполне возможен.

Таблица 4

## Потребность в основных материалах (в тыс. t)

Материал	Назначение	Воздушная линия 400 kV трехфазного тока	Воздушная линия 650 kV постоянного тока	Кабельная линия 800 kV постоянного тока
Сталь	Подстанции	20,34	42,6	41
	Линия	153	102	16,9
	Всего	173,34	144,6	57,9
Алюминий	Подстанции	0,54	0,68	0,65
	Линия	22,5	15	9
	Всего	23,04	15,68	9,65
Медь и бронза	Подстанции	2,48	6,27	6
	Линия	—	—	0,79
	Всего	2,48	6,27	6,79
Свинец	Линия	—	—	39,6
Приведенная медь	Всего	48,56	37,63	41,93
Относительный расход стали, %	—	100	83,5	33,5
Относительный расход приведенной меди, %	—	100	77,5	84

Кабельная линия 800 kV постоянного тока. Была допущена возможность создания кабелей, могущих работать при напряжении 400/440 kV по отношению к земле. Для передачи были выбраны 4 кабельных линии с укладкой 8 одножильных кабелей в две траншеи.

Конструктивные характеристики кабеля: диаметр жилы 28,6 мм, толщина бумажной изоляции 20 мм, толщина свинцовой оболочки 2,9 мм, толщина брони 6 мм, наруж-

ный диаметр 86,4 мм. Допустимый ток нагрузки 700 А, сопротивление 0,0506  $\Omega$ /км, диэлектрические потери 0,3 кВт/км, предел передаваемой мощности 560 тыс. кВт на цепь.

В табл. 1—4 для всех трех систем приведены электрические характеристики, стоимости, относительные стоимости передачи 1 кВт и потребности в основных материалах. При расчетах принималось, что на повысительной и понизительной подстанциях устанавливаются по шести групп однофазных трансформаторов мощностью по 150 тыс. кВА в фазе, а подача энергии к повысительной подстанции и распределение ее от понизительной подстанции производятся по 24 линиям 110 кВ. Каждый из трансформаторов снабжается устройством для регулировки напряжения и сдвига фаз на 10% и катушками для компенсации тока замыкания на землю.

Инж. Ю. А. ЯКУБ.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

**A. H. Maggs. Преобразователь однофазного тока в трехфазный. JEE, ч. II, т. 93, № 32, стр. 133—136, 1946.**

Для уяснения принципа преобразования однофазного тока в трехфазный по системе Феррарис-Арно, рассматривается сначала двухфазный электродвигатель, имеющий на статоре две независимые однофазные обмотки. Одна из этих обмоток, присоединяемая к однофазному источнику энергии, и может быть названа главной, другая, в силу того, что она сдвинута от главной на 90°, может быть названа поперечной. Далее предполагается, что роторная обмотка обладает двумя осями, совпадающими с соответствующими осями статорных обмоток, вне зависимости от того, вращается ли ротор, или находится в неподвижном положении. Если этот электродвигатель привести во вращение, питая его во время пуска от специального фазообразующего устройства, то двигатель приобретет почти синхронную скорость вращения. С этой же скоростью двигатель будет работать, получая питание только от однофазного источника энергии.

Подведенная к обмотке главной оси энергия, передается ротору посредством трансформации и накапливается в нем как механическая энергия; эта энергия вторично генерируется и передается поперечной обмотке статора путем трансформации.

Таким образом, при наличии однофазного источника электрической энергии имеется возможность питать двухфазную нагрузку с помощью указанного двухфазного электродвигателя.

Нет никакой существенной разницы, если применить для питания трехфазной нагрузки от однофазного источника энергии не двухфазный, а трехфазный асинхронный двигатель в качестве указанного фазообразователя. Это следует из того, что напряжение каждой фазы трехфазного электродвигателя может быть разложено на две компоненты — одна вдоль главной оси, другая — вдоль поперечной. В этом случае направление главной оси определяется вектором приложенного однофазного напряжения, на которое включаются две фазные обмотки трехфазного двигателя со статором, включенным в звезду. Направление поперечной оси машины совпадает с осью обмотки третьей невключенной фазы. При работе такого асинхронного двигателя в качестве фазообразователя, генерируемое напряжение в третьей невключенной фазе будет меньше за счет влияния полных сопротивлений машины по продольной и поперечной осям. Для устранения несимметрии напряжений, в созданной таким образом трехфазной системе, обмотка статора третьей фазы должна иметь большее число витков, чем в двух других фазах на 15—20%.

Оказывается работа указанного фазообразователя может быть существенно улучшена путем включения емкости между зажимом третьей фазы и любым другим зажимом, присоединенным к однофазному источнику энергии. В этом случае ток, протекающий через конденсатор и третью фазу, поднимает величину генерируемой в ней э. д. с., а также увеличивает вращающий момент. Преимущества преобразователя, включенного по указанной схеме следующие: 1) отпадает необходимость в специальном пускателе для начального пуска фазообразователя; 2) поднимается напряжение в третьей фазе; 3) улучшается коэффициент мощ-

ности ( $\cos \varphi$ ) установки; 4) повышается к. п. д. установки; 5) увеличивается перегрузочная способность преобразователя.

Общая мощность присоединенных трехфазных электродвигателей к преобразованной системе трехфазного тока может быть немного больше однофазной мощности фазообразователя или около 70% его трехфазной мощности. При включении двигателей с общей мощностью больше указанных значений напряжение в третьей фазе падает до 13% от однофазного напряжения. Указанный недостаток легко устраняется, если при увеличении мощности включаемых электродвигателей включить дополнительную емкость на те же фазы, что и у фазообразователя. Это важное свойство позволяет при небольшой мощности фазообразователя создавать системы трехфазного тока с мощностью больше их номинальной мощности. Совершенно очевидно, что расширение этих систем трехфазного тока также может быть легко осуществлено.

Преимуществами преобразователей однофазного тока в трехфазный по системе Феррарис-Арно с конденсатором являются: высокая надежность, хороший к. п. д. и сравнительно невысокая стоимость. Преобразование однофазного тока в трехфазный целесообразно осуществлять для сетей, где требуется установить два и более электродвигателя. Дальнейшее расширение системы трехфазного тока возможно и легко осуществимо.

Инж. С. П. ИНОЗЕМЦЕВ

**Электрическая катапульта. Westinghouse Eng., т. 6, № 5 стр. 160—161, 1946.**

Описан новый тип магнитофугального устройства, примененного во время войны в США в качестве электрических катапульт для сокращения пути разбега и облегчения условий взлета военных самолетов. Две такие установки, именуемые сокращенно «электротрультами», были выполнены на коралловых островах Тихого океана. В настоящее время эти установки используются для экспериментов в области запуска реактивных самолетов и самолетов с автопилотами.

Электротрульта представляет собой, по существу, асинхронный двигатель, у которого обмотка статора расположена не по окружности, а развернута в длинную дорожку. Бегущее поле, создаваемое статором, приводит в прямолинейно-поступательное движение подвижный элемент в виде тележки, перемещающейся вдоль статора. Самолет устанавливается на этой тележке и разгоняется до взлетной скорости за счет объединенного действия электротрульты и пропеллеров.

В данном устройстве роли статора и ротора взаимно обменены, и в качестве дорожки развернута беличья клетка, т. е. вторичная обмотка, а первичная помещена на подвижной тележке. Подвод энергии к подвижной тележке осуществляется с помощью пролентных проводов.

В более мощной электротрульте вторичная обмотка (дорожка) имеет длину 420 м и разбита на 76 участков, уложенных в уровень с поверхностью земли. Ширина активного сердечника равна 300 мм. Активное сопротивление вторичной обмотки на протяжении первых 300 м пути постепенно (в 4 ступени) уменьшается. Это осуществлено путем применения для стержней обмотки и замыкающих их по обеим сторонам накоротко шин материалов с различным удельным сопротивлением. Благодаря такой конструкции двигатель получает такие же пусковые свойства, как и у двигателя с фазовым ротором при реостатном пуске, и позволяет выдерживать постоянство тягового усилия, действующего на тележку с самолетом во время разбега. На последних 120 м пути осуществляется динамическое торможение тележки постоянным током.

Подвижная тележка имеет в длину 3,6 м, а в ширину около 1 м; ее колеса выступают за края пазов и катятся по рельсовому пути, утопленному в земле.

С помощью электротрульты реактивный самолет весом в 5 т достигает на пути около 100 м взлетной скорости в 360 км/ч за 4,2 сек.

Мощность, которую установка развивает в момент взлета самолета, около 10 000 кВт. Для собирания с контактных рельсов тока, имеющего наибольшее значение около 7 000 А во время ускорения и около 10 000 А в период динамического торможения на каждую фазу, применено по 12 токоприемников — медно-графитных башмаков, которые прижимаются к рельсам с помощью пружин.

Силовая станция для питания установки и пункт управления расположены под землей. Схема питания: авиационный двигатель вращает генератор постоянного тока мощностью в 750 kW. Генератор питает постоянный ток, включенный по схеме Леонарда, который вращает находящиеся на одном валу с ним тяжелый маховик и генератор переменного тока. Около 95% энергии в момент взлета получается за счет накопленной кинетической энергии маховика, а остальные 5% доставляет первичный двигатель.

По сравнению с гидравлическими катапультами электропульта отличается более плавной и лучше регулируемой характеристикой разбега.

Примечание референта. В данной установке обращает на себя внимание то обстоятельство, что неподвижной частью всего устройства сделан ротор, а не статор, в связи с чем потребовалось такое усложнение, как троллейная подводка токов до 10 000 А помощью скользящего контакта. Нужно полагать, что это усложнение оправдывает себя по следующим соображениям: удешевляется устройство развернутой дорожки со стержнями беличьей клетки по сравнению с устройством трехфазной обмотки. Кроме того, благодаря возможности применять стержни различного удельного сопротивления на отдельных участках дорожки достигается регулируемая характеристика момента, определяющего собой необходимую скоростную характеристику в процессе разбега тележки.

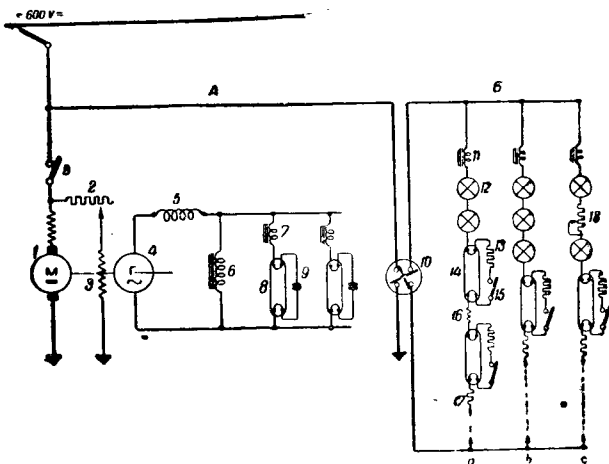
Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

### ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

G. R. Mason. Флюоресцирующее освещение трамвайного вагона в Шеффилде. *M. V. Gaz.* № 354, стр. 259 — 261, 1946.

В Шеффилде (Англия) оборудован флюоресцирующим освещением двухэтажный трамвайный вагон. В вагоне имеется всего 26 флюоресцирующих ламп (8 в нижнем салоне, 2 на передней и задней площадках, 12 в верхнем салоне и по 2 для маршрутных указателей с каждого конца вагона) мощностью по 20 W. Питание экспериментальной осветительной установки осуществлялось как на переменном, так и на постоянном токе. Лампы были рассчитаны на питание переменным током, но оказалось возможным использовать их и на постоянном токе, что важно для широкого внедрения флюоресцирующих ламп на трамвае.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке. Для питания осветительных цепей на переменном токе (левая часть схемы А) установлен двигатель-генератор, преобразующий постоянный ток напряже-



нием 600 V, получаемый от контактного провода, в переменный напряжением 110 V при 500 Hz. При питании переменным током 11 флюоресцирующих ламп включались параллельно. Каждая лампа снабжена индивидуальным резонансным стартером 9. Управление двигателем 1 преобразователя осуществлялось с помощью моторного выключателя В, а регулирование напряжения генератора 4 — путем изменения тока в обмотке возбуждения 3 генератора с помощью переменного сопротивления 2. Для общей стабилизации напряжения в цепи ламп предусмотрены дрос-

сель без железа 5 и дроссель с железным сердечником 6. Кроме того, для стабилизации напряжения на лампах 8 в цепь каждой из ламп включается дроссель с железным сердечником 7.

Питание цепей освещения на постоянном токе (правая часть схемы В осуществляется непосредственно от контактного провода переключателем 10; при этом образуются три осветительных цепи: а) цепь из 6 флюоресцирующих ламп, включенных последовательно с двумя стабилизирующими лампами накаливания 12 и дросселем с железным сердечником 11. Включение ламп 14 осуществляется с помощью термических стартерных выключателей со стартерным сопротивлением 13, контактами стартера 15 и стартерными катушками 17; б) цепь из 5 флюоресцирующих ламп с 3 стабилизирующими лампами накаливания; в) цепь из 4 флюоресцирующих ламп с 2 стабилизирующими лампами накаливания и регулируемым сопротивлением 18. Стабилизирующие лампы накаливания используются для сигнального освещения и освещения измерительных приборов. Во избежание эффекта «темного конца», получающегося при длительном питании флюоресцирующих ламп током одной полярности, в схеме предусматривается переключатель 10, обеспечивающий изменение полярности при каждом включении ламп. Все флюоресцирующие лампы располагаются вдоль стенок вагона и устанавливаются в арматуре утопленного типа, закрытой опаловым стеклом.

Результаты экспериментов и эксплуатации показали, что опытная установка обеспечивает вполне равномерную освещенность при полном отсутствии блискости. Уровень освещенности составил 108 lm/m<sup>2</sup>. Четкая работа установок флюоресцирующего освещения на переменном и постоянном токе позволяет дать вполне положительную оценку флюоресцирующего освещения на трамвае.

Примечание референта. Учитывая существенное экономическое и эстетическое преимущество флюоресцирующих ламп перед лампами накаливания, следует признать целесообразным применение флюоресцирующего освещения для трамвая и троллейбуса с оборудованием для этой цели первых опытных установок. При этом установке с преобразователем, работающей на переменном токе, следует отдать безусловное предпочтение, так как при питании ламп на постоянном токе, от напряжения контактного провода, колебания напряжения в контактном проводе, имеющие место в различных участках сети, могут неблагоприятно отозваться на стабильности работы ламп.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

Новый швейцарский электровоз. *Modern Transport*, № 1407, стр. 11, 1946.

Швейцарские федеральные железные дороги заказали 26 электровозов нового типа для легких скорых поездов. Первый из этих электровозов сдан в эксплуатацию на линии Женева—Лозанна—Берн—Цюрих. Электровозу присвоена серия Ae 4/4, что соответствует осевой формуле В<sub>0</sub>—В<sub>0</sub>. Основные характеристики его следующие: часовая мощность на ободу 2 240 л. с., длительная—2 170 л. с.; максимальная скорость—125 км/ч; число тяговых двигателей—4, часовая мощность двигателя 580 л. с., передаточное число 1:2,85, длина по буферам—14,7 м, жесткая база тележки—3,0 м, диаметр колес 1 040 мм, максимальная сила тяги на ободу—14 т, вес механической части—33,7 т, вес электрической части—22,45 т, вес песка—0,25 т, полный вес—56,4 т. Тележки—сварные, кузов электровоза—цельнометаллический. Трансформатор имеет масляное охлаждение. Силовой выключатель типа выключателя с сжатым воздухом.

Предусмотрена дистанционная система управления, обеспечивающая возможность езды двойной или тройной тягой с управлением из кабины одного локомотива, а также возможность управления электровозом из концевого вагона поезда при челночной схеме движения, когда в одном из направлений поезд следует с локомотивом, находящимся сзади. На электровозе установлен быстродействующий пневматический тормоз и оборудована схема регенеративного торможения.

Нормальный вес поезда, на который рассчитан электровоз, 300—350 т, однако он может вести на подъеме 11,9% поезд весом 480 т со скоростью 90 км/ч.

Инж. Л. А. ВИСЛОХУ

## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

**J. E. Allen. S. K. Waldorf. Исследования дуговых замыканий на землю на шинах 13 kV. В системе с изолированной нулевой точкой. *El. Eng.*, № 5, стр. 298, 1946.**

При однофазных замыканиях на землю в системах с изолированной нулевой точкой ток замыкания на землю, как правило, получается небольшой и серьезные разрушения оборудования не имеют места. Однако, в 1942 г. на шинах 13,2 kV электростанции Holtwood в США возникло двойное замыкание на землю (на расстоянии 90 м друг от друга) сопровождавшееся мощными дугами и серьезными разрушениями конструкций. В связи с этим на электростанции были поставлены исследования с целью выяснения величины перенапряжений, возникающих при различного рода дуговых замыканиях на землю на сборных шинах. В первую очередь были исследованы частотные характеристики основных видов оборудования (силовые трансформаторы и генераторы), присоединенного к шинам, так как дуговые замыкания могут вызвать резонансные колебания в них. Возникающие при этом стоячие волны приводят к неравномерному распределению напряжения вдоль системы шин. Исследование собственных частот велось путем фиксирования изменений полных сопротивлений машин и трансформаторов при одновременном изменении частоты напряжения, приложенного между одной фазой и землей, в пределах от 100 до 100 000 Hz. Кроме того, было проведено повышение напряжения, обусловленное стоячими волнами, путем присоединения высокочастотного генератора к одной из двух точек, в которой имело место аварийное замыкание на землю, и измерения напряжения во второй точке системы. При этом оказалось, что повышение напряжения в результате возникновения стоячих волн не превосходит прекратного фазового напряжения при частотах порядка 50 и 100 kHz.

Были исследованы характеристики нескольких типов искровых промежутков с целью использования последних для имитации дуговых замыканий на землю при последующих испытаниях. Исследовались открытые промежутки между головками болтов и закрытые в фарфоровой трубке промежутки между круглыми металлическими электродами, в которых промежуток был заполнен измельченным фарфором. Оба вида промежутков исследовались как без плавкой вставки, так и с плавкой проволокой, обгорающей при каждом новом закипании дуги, в результате чего удлиняется искровой промежуток и новые закипания дуги происходят при нарастающих напряжениях.

При самих испытаниях на шинной сборке с присоединенными к ней генераторами и силовыми трансформаторами зарядный ток на землю составлял 2,5 А. Емкостное сопротивление одной фазы на землю равнялось 9 100 Ω. Перенапряжения на шинах фиксировались с помощью электромагнитного осциллографа и клидонографа. Испытания с применением как открытого, так и закрытого искрового промежутка фиксированной длины без плавкой проволоки показали, что максимальные потенциалы неповрежденных фаз лишь на немного превосходят  $\sqrt{3} \cdot U_{\phi}$ , достигая  $2,0 U_{\phi}$  по осциллографу (по клидонографу  $2,33 U_{\phi}$ ) при нормальном рабочем напряжении шин 13,2 kV. Самоудлиняющиеся искровые промежутки с плавкой проволокой привели к более высоким перенапряжениям, которые, однако, ни в одном случае не превосходили  $3,0 U_{\phi}$ . Насколько известно, более высокие перенапряжения дуговых замыканий на землю никогда не наблюдались в реальных установках сборных шин на напряжения 13 kV и ниже.

Проведенные испытания показали также, что в условиях дуговых замыканий на землю максимальные потенциалы двух неповрежденных фаз получаются, как правило, неодинаковыми. В некоторых случаях закипания дуги происходят лишь при одной полярности напряжения; возможно, что это связано с несимметричностью электродов, применявшихся при испытаниях искровых промежутков с плавкой проволокой.

Дуговые замыкания приводят также к повышению напряжения между шинами неповрежденных фаз вплоть до 1,74 нормального. Частота колебаний этих перенапряжений оказалась равной 6,78 kHz, так что они могут представлять опасность для междувитковой изоляции машин.

Учитывая результаты проведенных испытаний, можно полагать, что авария на электростанции Holtwood была вызвана дефектами шинных изоляторов, один из которых был перекрыт, в результате чего потенциалы других фаз поднялись в пределах от 1,73 до  $3 U_{\phi}$ . Это, в свою очередь повлекло перекрытие одного или нескольких других дефектных изоляторов. Авторы приходят к выводу, что во многих случаях перекрытия изоляции шин заключаются не столько в больших повышениях напряжения, сколько в ослаблении изоляции. В связи с этим большое значение имеет обеспечение первоначальной прочности изоляции сборных шин по отношению к земле более  $3 U_{\phi}$  в системах с изолированной нулевой точкой и поддержание прочности этой изоляции на должном уровне в процессе эксплуатации.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Новый диэлектрик — тефлон.

В США начал находить применение новый диэлектрик-политетрафторэтилен (англ. Polytetrafluoroethylene), получивший сокращенное название „Тейлон“. Он представляет собой полимер тетрафторэтилена  $F_2C=CF_2$  и имеет структуру... —  $CF_2 - CF_2 - CF_2 - \dots$

Тетрафторэтилен-мономер может быть получен с помощью различных химических реакций: разложением тетрафторметана вольтовой дугой, действием цинка на тетрафтордихлорэтан, пиролизом хлордифторметана или бромдифторметана и др. Он представляет собой бесцветный газ, не имеющий запаха и не ядовитый; температура кипения его —  $76,3^{\circ}C$ , температура заморозания —  $142,5^{\circ}C$ ; критическая температура  $+33,3^{\circ}C$ . Реакция полимеризации его является экзотермической (выделение тепла — в количестве 20—25 kcal на моль), почему требуется охлаждение во избежание образования углерода и  $CF_4$ .

Полимер исключительно стоек к действию химически активных веществ и растворителей. Он совершенно негорюч. При испытании нескольких сот разнообразных растворителей не было найдено ни одного, который вызывал бы растворение или набухание тефлона. Так, на тефлон не действуют при температурах, вплоть до температуры их кипения, вода, спирты, кетоны, углеводороды, фенолы, анилин, нитробензол, диоксан, пиридин, простые и сложные эфиры и пр., включая столь высококипящие вещества как дибутилфталат. Также не действуют на тефлон концентрированная и дымящаяся серная кислота (даже при  $300^{\circ}C$ ), концентрированная и дымящаяся азотная кислота, плавиковая кислота, царская водка, органические кислоты, концентрированные растворы щелочей, аммиак, хлор, бром, перекись водорода, перманганат калия, озон и др.; некоторое действие оказывают лишь расплавленные щелочные металлы (например, натрий при  $+200^{\circ}C$ ), а также газообразный фтор при  $+150^{\circ}C$ . Тефлон практически негигроскопичен. При выдержке на открытом воздухе в течение года тефлон не дает заметных изменений.

Нагревостойкость тефлона также весьма высока. При нагреве до  $300^{\circ}C$  в течение 1 месяца он дает снижение разрывной прочности на 10—20%; нагрев до  $250^{\circ}C$  материал переносит длительно без заметных изменений. Рентгеновский снимок провода с изоляцией из тефлона, который был изогнут в виде петли на цилиндрической оправке и подвергнут напреву до  $+235^{\circ}C$  в течение 42 h, причем на петле был подвешен груз 22,5 kg, обнаружил, что проводник не вдавился в изоляцию. Тефлон не имеет резко выраженной точки размягчения, но сильное снижение прочности и резкое возрастание коэффициента теплового расширения имеют место при  $+320 - 327^{\circ}C$ ; при этом материал становится прозрачным даже в толстых слоях, изменяя свою мелкокристаллическую структуру на аморфную. При нагреве выше  $+400^{\circ}C$  обнаруживается потеря веса; при этом освобождается мономер и другие обладающие токсическим действием газы, содержащие фтор. Поэтому при горячем прессовании тефлона следует иметь хорошую вентиляцию и принимать другие меры предосторожности.

Тефлон обладает также и выдающейся морозостойкостью: пленки из него сохраняют гибкость при температуре минус  $100^{\circ}C$ .



Удельная теплоемкость тефлона  $0,25 \text{ cal/}^\circ\text{C.g}$ ; коэффициент теплового расширения  $1 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$  (в интервале  $25 \div 60^\circ\text{C}$ ); теплопроводность  $2,1 \text{ cal/cm. h. }^\circ\text{C}$ . Тефлон является типичным термопластиком, и способность к деформации при нагрузке у него быстро повышается при возрастании температуры.

Плотность тефлона  $2,2 \div 2,3 \text{ kg/dm}^3$ . В тонких слоях он (при нормальной температуре) прозрачен, в толстых — просвечивает, имеет вид воска и серый или беловатый цвет. Коэффициент преломления  $1,37 \text{—} 1,38$ . В тонких слоях весьма прозрачен для ультрафиолетовых лучей с длиной волны от 2000 до 4000 Å. Механические свойства: прочность на разрыв  $130 \text{—} 300$  (в ориентированных пленках более 1000)  $\text{kg/cm}^2$  при удлинении  $300 \text{—} 450\%$ , прочность на изгиб  $130 \text{ kg/cm}^2$ . Прочность на удар по Izod (в образцах с надрезом, в  $\text{kg/cm}$  на 25 мм надреза): при  $-57^\circ\text{C} \dots 27$ , при  $+25^\circ\text{C} \dots 54$ , при  $+77^\circ\text{C} \dots 90$ . Твердость по дюрометру 55. Коэффициент трения: тефлон по тефлону  $0,1 \div 0,2$ , тефлон по полированной стали  $0,2 \div 0,3$ .

Электрические свойства тефлона: диэлектрическая проницаемость при частотах от 60 до  $3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$  равна 2,0; тангенс угла диэлектрических потерь в том же интервале частот менее 0,0002. Объемное удельное сопротивление  $10^{16} \Omega \text{ cm}$ ; поверхностное сопротивление (при 50% относительной влажности)  $3,5 \cdot 10^{13} \Omega$ . Пробивная прочность от 20  $\text{kV/mm}$  (при толщине 2 мм) до 80  $\text{kV/mm}$  (при толщине 0,1 мм). Дугостойкость (по ASTM) более 700 сек. Столь высокие электроизоляционные характеристики тефлона позволяют применять его для изоляции в наиболее ответственных случаях, в частности при высоких и ультравысоких частотах.

Тефлон обрабатывается посредством компрессионного и экструзионного прессования. Из него изготавливаются стержни, трубы, пластины, пленки, различные фасонные детали и т. п. Кабельная изоляция из тефлона может быть получена непосредственным опрессованием проводниковой жилы. Прессованные детали из тефлона могут дополнительно обрабатываться различными инструментами. При прессовании могут добавляться кварц, слюда и др. наполнители. Адгезионной способностью по отношению к клеям и цементам тефлон не обладает.

Весьма желательна постановка работ по получению и исследованию тефлона в СССР.

### Литература

1. M. M. Renfrew and E. E. Lewis. Polytetrafluoroethylene. Heat Resistant, Chemically Inert Plastic. Ind. Eng. Ch., т. 38, № 9, стр. 870—877, 1946.

2. E. B. Yelton. Teflon—New Resin with Unusual Properties. Plastics and Resins, т. 5, № 5, стр. 14—16, 36, 1946.

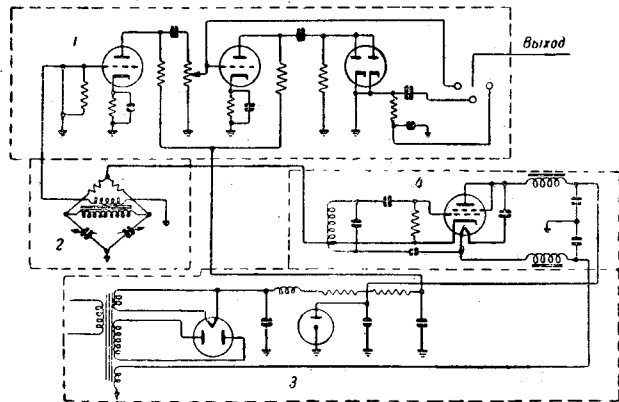
3. A New Industrial Resin. Modern Plastics, т. 23, № 10, стр. 134—135, 1946.

Кандидат техн. наук **Б. М. ТАРЕЕВ**

### Разное

W. F. Brown. Электронный прибор для измерения давлений. Electronics, т. 19, № 2, стр. 168—170, 1946.

Для измерения давления, времени открытия и закрытия клапанов и т. д. сконструирован прибор «Pressurograph». Основной частью прибора является емкостный мост, питающийся от лампового генератора с частотой 100 kHz. Два плеча моста содержат постоянные сопротивления, третье содержит полупеременный конденсатор, а в четвертое включен датчик емкостного типа, воспринимающий давление.



Принципиальная схема прибора представлена на рисунке. При действии давления на диафрагму датчика равновесие моста нарушается. При этом на выходе моста появляется напряжение, которое трансформируется и со вторичной обмотки трансформатора подается на усилитель. Трехпозиционный переключатель дает возможность подавать на осциллограф весь модулированный сигнал, или лишь верхнюю половину модулированного сигнала, или же демодулированный сигнал.

Калибровка прибора производится при помощи конденсатора переменной емкости.

Инж. **П. П. ХРАМОВ**



## В Энергетическом институте им. Кржижановского Академии наук СССР

### Работа научных семинаров

В Энергетическом институте Академии наук СССР в 1946 г. работали следующие научные семинары по проблемам энергетики и электротехники: по научным основам промышленной энергетики, руководитель—член-корр. Академии наук СССР **В. И. Вейц**; по научным основам энергетики сельского хозяйства и городов, руководитель—член-корр. Академии наук СССР **В. И. Вейц**; по постоянному току высокого напряжения, руководитель—кандидат техн. наук **Я. М. Червоненкис**; по электросистемам, руководитель—член-корр. Академии наук СССР **И. С. Брук**; по теории электрических цепей и электромеханических систем, руководитель—доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**; по высоковольтному газозому разряду, руководитель—доктор техн. наук **И. С. Стекольников**; по электромеханике, руководитель—академик **К. И. Шенфер**.

В работе семинаров помимо научных сотрудников Энергетического института принимали участие работники отраслевых научно-исследовательских институтов, учебных институтов и промышленности.

На заседаниях семинаров были заслушаны и обсуждены следующие доклады:

Семинар по научным основам промышленной энергетики: 1. О направленности и методике исследовательских работ по энергетическому балансу и схемам развития энергетики промышленности. Член-корр. Академии наук СССР **В. И. Вейц**.

2. Современная структура энергетического баланса заводов черной металлургии. Инж. **В. Д. Пашков**.

3. Коэффициент полезного действия промышленной энергетики. Член-корр. Академии наук СССР **В. И. Вейц**.

4. Энергетические характеристики промышленных предприятий. Член-корр. Академии наук СССР **В. И. Вейц**.

5. Использование низкотемпературного тепла вторичных энергетических ресурсов технологических процессов для производства электроэнергии. Кандидат техн. наук **Г. И. Росиевский**.

6. Взаимосвязь технологических и энергетических факторов в процессе прокатки металлов. Проф. **Я. Л. Франкфурт**.

Кроме того, семинар заслушал ряд докладов по энергетике сталеплавильных и металлонагревательных процессов, доменного производства и др.

Семинар по научным основам энергетики сельского хозяйства и городов: 1. Энергетический баланс и принципиальная схема развития энергетики Ленинграда. Доктор эконом. наук **Л. А. Мелентьев**.

2. Некоторые вопросы электроснабжения сельскохозяйственных районов. Кандидат с.-х. наук **А. Г. Захарин**.

3. Научные основы развития энергетики городов. Кандидат техн. наук **Е. О. Штейнгауз**.

4. Пятилетний план электрификации сельского хозяйства—**С. Г. Щуров**.

5. Проспект научной монографии по основам электрификации сельского хозяйства. Член-корр. Академии наук СССР **В. И. Вейц**.

6. Программные вопросы раздела энерготехнологических характеристик основных отраслей сельского хозяйства. Кандидат с.-х. наук **П. Н. Листов**.

7. Программные вопросы раздела энергетических ресурсов и схем электроснабжения в научной монографии по

основам энергетики сельского хозяйства. Кандидат с.-х. наук **А. Г. Захарин**.

Семинар по постоянному току высокого напряжения: 1. Проблема передачи энергии постоянным током. Кандидат техн. наук **Я. М. Червоненкис**.

2. Устойчивость инвертера. Кандидат техн. наук **Я. М. Червоненкис**.

3. Система заземления при передаче энергии постоянным током. Кандидат техн. наук **Я. М. Червоненкис**.

4. Искусственная коммутация инвертора. Кандидат техн. наук **Я. М. Червоненкис**.

Семинар по электросистемам: 1. Следящий привод с прерывистым регулированием. Кандидат техн. наук **И. Т. Турбович**.

2. Колебания в нелинейных системах с переменными параметрами. Кандидат техн. наук **И. Т. Турбович**.

3. Линейные преобразования и матричные исчисления. Кандидат техн. наук **В. И. Горушкин**.

Семинар по теории электрических цепей и электромеханических систем: 1. Физическое обоснование и некоторые приложения геометрической теории цепей, развитой Г. Кронмом. Доктор техн. наук **Э. А. Меерович**.

2. Вывод уравнений синхронной машины из уравнений Лагранжа. Кандидат техн. наук **В. А. Тафт**.

3. О некоторых особенностях цепей с переменными параметрами. Кандидат техн. наук **Р. П. Жежерин**.

4. Применение симметричных составляющих для расчета трехфазных электрических цепей. Кандидат техн. наук **В. Л. Фабрикант**.

5. Об электрических аналогах линейных электромеханических систем. Кандидат техн. наук **П. Г. Зубков**.

6. Численные методы определения оригинала функций по ее операторному изображению. Кандидат техн. наук **Л. С. Гольдфарб**.

7. Расчет стационарного режима сложной системы с нелинейными нагрузками и нелинейными сопротивлениями генератора. Кандидат техн. наук **Р. П. Жежерин**.

8. Новая схема для решения системы алгебраических уравнений. Доктор техн. наук **Э. А. Меерович**.

9. О различных критериях устойчивости систем регулирования. Кандидат техн. наук **Н. И. Шиферсон**.

10. Об одном методе расчета электрических цепей. Доктор техн. наук **Э. А. Меерович**.

11. Новая эквивалентная схема синхронной машины с выступающими полюсами. Кандидат техн. наук **В. М. Матюхин**.

Семинар по электрическому моделированию физических явлений: 1. Результаты работы на опытном экземпляре электроинтегратора для решения систем линейных дифференциальных уравнений. Инж. **Н. В. Корольков**.

2. К вопросу о проектировании промышленного типа электроинтегратора для решения систем линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Кандидат техн. наук **Г. Л. Полисар**.

3. Устройство для решения систем линейных дифференциальных уравнений методом электрической аналогии. Инж. **Н. В. Корольков**.

4. Метод электрического моделирования (состояние и задачи). Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**.

5. Модели на активных сопротивлениях. Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**.
6. Процессы в сетях из активных сопротивлений. Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**.
7. Решение задач математической физики на интеграторе из активных сопротивлений. Инж. **Л. Г. Коган**.
8. Твердые выпрямители. Инж. **З. Б. Голембо**.
9. Новый способ для изготовления сопротивлений для интегратора. Инж. **Б. А. Вольнский**.
10. Решение задач подземной гидравлики при помощи электроинтегратора. Кандидат техн. наук **Ю. Г. Толстов**.
11. Электромагнитные расчеты на электроинтеграторе. Инж. **Л. Г. Коган**.
12. Твердые выпрямители — последние достижения зарубежной промышленности. Кандидат техн. наук **В. А. Комар**.
13. Моделирование электромагнитных полей в железе с учетом нелинейности и гистерезиса. Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**.
14. Модель на сопротивлениях и емкостях. Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**.
15. Электромеханические и механические модели. Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**.
16. Решение системы линейных алгебраических уравнений на матричной схеме с усилителями. Доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер** и инж. **Н. В. Корольков**.
- Семинар по высоковольтному газовому разряду: 1. Успехи катодной осциллографии. Доктор техн. наук **И. С. Стекольников**.
2. Установка для исследования скоростей восстановления диэлектрической прочности разрядных промежутков. Доктор техн. наук **И. С. Стекольников**.
3. Исследование цепочечных схем и неискажающие делители напряжения. С. А. Назаров.
4. Изучение искрового разряда. Кандидат техн. наук **В. С. Комельков**.
5. Изучение короны. Кандидат техн. наук **В. И. Попков**.
6. Методы улучшения работы высоковольтной линейной изоляции. Инж. **Г. Л. Эпштейн**.
- Семинар по электромеханике: 1. Новый пятилетний план и работы лаборатории электромеханики. Академик **К. И. Шенфер**.
2. Электромашинные усилители. Академик **К. И. Шенфер**.
3. Нелинейные электросопротивления. Кандидат техн. наук **И. А. Будзко**.
4. Безредукторные электромашинные. Доктор техн. наук **А. И. Москвитин**.
5. Новая эквивалентная схема синхронной машины. Кандидат техн. наук **В. М. Матюхин**.
6. Экспериментальное исследование амплитудного генератора. Инж. **Г. В. Михневич**.
7. О безискровом включении электромагнита. Доктор техн. наук **А. И. Москвитин**.
8. Общая теория амплитудина. Доктор техн. наук **А. Г. Иосифьян**.

Кандидат техн. наук **Г. А. МАТВЕЕВ**

Ученый секретарь Энергетического института  
им. Кржижановского Академии наук СССР



## ДИССЕРТАЦИИ

### Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

В ученом совете Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с 1942 г. по март 1947 г.:

**Р. П. Жежерин** защитил 17 апреля 1942 г. диссертацию на тему «Методика расчета однофазного параметрического генератора реактивного типа».

Официальные оппоненты: член-корр. Академии наук СССР **К. А. Круг** и доктор техн. наук **Э. А. Мееро-вич**.

Применен оригинальный метод расчета электрических машин, построенный на определении энергии, накапливаемой в отдельных частях магнитной цепи, на изменении этой энергии во времени и на взаимном преобразовании магнитной и механической энергии. При определении отдельных параметров, зависящих от конструкции машины и ее геометрических размеров и необходимых для составления соответствующих уравнений и выяснения количественных соотношений, подробно исследована на электрической модели в предположении бесконечной проницаемости железа. Зависимость модуляции, так называемого магнитного сопротивления между статором и ротором, при различном их взаимном положении, с учетом соотношений воздушного зазора, ширины зубца и зубцового шага. Рассмотрены вопросы самовозбуждения параметрической машины. Построены оригинальные «контурные» диаграммы, которые позволяют проследить процесс самовозбуждения.

**С. В. Клопов** защитил 5 августа 1942 г. диссертацию на тему «Технические и технико-экономические особенности использования энергии малых горных рек СССР».

Официальные оппоненты: член-корр. Академии наук СССР **Ф. П. Саваренский**, проф. **А. А. Труфанов** и проф. **А. И. Фидман**.

Обобщены материалы по многолетним полевым экспедиционным обследованиям горных рек Кавказа, проведенных автором. Исследованы принципиальные вопросы схемы использования горных рек. Предложено использование малого высокогорного стока «зимним» аккумулярованием высокопарными установками.

**В. М. Алексеев** защитил 26 мая 1943 г. диссертацию на тему: «Применение переменного тока повышенного напряжения на кораблях морского флота».

Официальный оппонент: академик **К. И. Шенфер**.

Определены перспективы развития судовой электротехники и дано практическое решение задачи по выбору параметров электрической установки на кораблях морского флота.

**Б. Е. Телишевский** защитил 9 декабря 1943 г. диссертацию на тему «Фотоэлектрическая фазоимпульсная система и область ее промышленного применения».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук **Л. И. Гутенмахер**, доктор техн. наук **Г. Г. Тагер**.

Рассмотрены вопросы промышленного использования фотоэлементов. Подробно описан новый метод управления фазой зажигания тириатрона, позволяющий регулировать анодный ток тириатрона в зависимости от положения тени на вращающейся шторе (диске). Приведены результаты испытаний этой системы на примере регулирования напряжения генератора Леонарда. Рассмотрено приложение разработанной системы к копированию на металлорежущих станках.

**Е. А. Карпович** защитил 15 июня 1944 г. диссертацию на тему «Применение высокой частоты в азимуте линий электропередачи».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук Л. И. Гутенмахер и кандидат техн. наук А. Д. Дроздов.

Описаны современные системы высокочастотной блокировки. Приведены результаты исследования высокочастотных характеристик линий электропередачи.

**М. С. Либкинд** защитил 15 июня 1944 г. диссертацию на тему «Механические силы в обмотках трансформаторов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук Г. Н. Петров и кандидат техн. наук Э. А. Манькин.

Рассмотрены вопросы, имеющие теоретический и практический интерес при расчете и конструировании трансформаторов. Исследованы электромагнитные и механические процессы, возникающие при коротких замыканиях. Спрессованная обмотка трансформатора рассматривается как упругая среда, в которой под действием внешних и внутренних периодических сил могут возникнуть колебания, распространяющиеся с конечной скоростью в пределах обмотки. Эти положения иллюстрированы опытными данными, полученными с помощью измерителей давлений, основанных на пьезоэлектрическом эффекте.

**В. Н. Глазанов** защитил 22 декабря 1944 г. диссертацию на тему «Заземление и электронагрев грунта в районах вечной мерзлоты».

Официальные оппоненты: академик В. Ф. Миткевич и доктор техн. наук И. С. Стекольников.

Дан подробный анализ вопроса о заземлении в условиях вечной мерзлоты. Выведенные формулы по расчету сопротивлений заземлителей в неоднородной среде дали возможность производить все практические расчеты заземлителей. Описан новый глубинный способ прогрева грунта. Приведен подробный анализ распределения тока и энергии в грунте и тепловые расчеты по потреблению энергии и потерям при разных методах электронагрева. Глубинный метод дал возможность проводить массовые прогревы грунта с применением широкой механизации. Этот способ нашел применение на строительных работах в условиях почв крайнего севера.

**П. А. Светлов** защитил 15 марта 1945 г. диссертацию на тему «О связях расхода энергии с технологией и энергетикой рабочих процессов при обработке металлов».

Официальные оппоненты: кандидат техн. наук Б. А. Гуревич и кандидат с.-х. наук Н. А. Сазонов.

Рассмотрен вопрос о производительности процесса резания и режима обработки металлов резанием и установлена зависимость между этими факторами и расходом электроэнергии. Предложена схема нормирования расходов электроэнергии на обработку металлов точением. Рассмотрены вопросы расхода электроэнергии на термическую обработку металлоизделий и предложена соответствующая схема нормирования.

**А. Л. Гофлин** защитил 11 июня 1945 г. диссертацию на тему «Электрическое моделирование изгиба балки, лежащей на упругом основании».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук Г. И. Бабат и кандидат техн. наук С. И. Тетельбаум.

Проанализирован ряд электрических схем, имеющих математическое соответствие с явлением изгиба балки на упругом основании. Выбрана схема, обеспечивающая возможно точное соответствие моделируемому процессу и вместе с тем наиболее удобная для практического выполнения. Разработан метод последовательных приближений и постепенной подгонки цепочки или сетки до полного совпадения с исследуемым явлением.

**С. А. Совалов** защитил 25 марта 1946 г. диссертацию на тему «Некоторые методы исследования переходных процессов в электрических системах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук П. С. Жданов и кандидат техн. наук В. А. Веников.

Исследованы в практическом аспекте задачи численного решения сложных систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих совокупность переходных электромагнитных и механических процессов в электриче-

ских системах, а также ряд вопросов по расчету не только простых, но и самых сложных электрических систем. Количественные соотношения обоснованы и иллюстрированы, вплоть до выполнения расчетов сложных систем на моделях сетей.

**В. А. Тафт** защитил 25 апреля 1946 г. диссертацию на тему «Об эквивалентной схеме синхронной машины».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук П. С. Жданов и доктор техн. наук Э. А. Меерович.

Рассмотрены: уравнения синхронной машины при установившемся и переходном режимах, методы решения систем уравнений с помощью электрических схем, применение тензорного исчисления к расчету электрических цепей, преобразования координат, применяемые в электротехнике. Проведено исследование влияния собственных параметров, на основании которого указано, как надо преобразовывать матричную схему с усилителями для изучения переходного процесса в синхронной машине.

**С. С. Чугунов** защитил 4 июня 1946 г. диссертацию на тему «Электрические методы регистрации пульсаций давлений и скорости водных потоков».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук Л. И. Gutenмахер, кандидат техн. наук А. Л. Гофлин и кандидат техн. наук К. А. Царевич.

Дан обзор существующих электрических методов регистрации пульсаций давлений и скоростей водных потоков и приведены результаты исследований новых эффективных методов.

**Р. Ю. Малая** защитила 13 июля 1946 г. диссертацию на тему «Методика определения минимального резерва генераторной мощности на тепловых электростанциях».

Официальные оппоненты: кандидат техн. наук Б. Л. Эрлихман и кандидат техн. наук Н. Н. Николаев.

Определен оптимальный процент резерва по аналитическим уравнениям расходных характеристик агрегата и по теории вероятностей на основе статистических данных о средних простоях турбин в аварийном ремонте. Уточнен термин «надежность» и его аналитическое выражение. Рассмотрены вопросы применения метода частных производных для определения внутреннего резерва в котлах. Исследован вопрос о применении теории вероятностей для определения: числа аварийных выходов агрегатов в зависимости от величины системы при заданной надежности, использования резервных агрегатов в часах в зависимости от их порядкового места, себестоимости вырабатываемой резервными агрегатами энергии, недоотпуска энергии потребителям-регуляторам при использовании резерва по его прямому назначению. Дан метод определения оптимального числа резервных агрегатов в зависимости от масштаба и структуры системы. Исследованы условия работы потребителей-регуляторов энергетической нагрузки при питании их резервными агрегатами в зависимости от местоположения последних в пише графика нагрузки.

**В. И. Попков** защитил 12 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Исследование электрического поля коронирующих проводов и теория потерь энергии на биполярную корону на высоковольтных линиях передачи постоянного тока».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук С. П. Жебровский и доктор техн. наук Н. А. Капцов.

Исследовано поле короны постоянного тока и потери энергии на биполярную корону. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование поля униполярной и биполярной короны и дано теоретическое выражение для тока короны и потерь энергии на корону для случая двух параллельных проводов.

*Кандидат техн. наук Г. А. МАТВЕЕВ*

*Ученый секретарь Энергетического института им. Вржжшановского Академии наук СССР*



## Московский институт инженеров связи

В Ученом совете МИИС защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с января 1944 г. по октябрь 1946 г.:

**Е. П. Корчагина** защитила 18 января 1944 г. диссертацию на тему: «Теория и расчет автогенераторов УКВ».

Официальные оппоненты: доктор физ.-матем. наук, проф. С. Э. Хайкин и кандидат техн. наук, проф. Г. А. Левин.

Дан анализ схемы автогенераторов УКВ, работающих на прехэлектродных лампах. Исследованы вопросы о частоте генерируемых колебаний, коэффициенте обратной связи и величине эквивалентного сопротивления нагрузки, включенной в анодную цепь лампы для генераторов, собранных по схеме Эзау и Хольборна, в диапазоне волн 5—10 м. Произведено качественное сравнение полученных теоретических результатов с результатами опубликованной экспериментальной работы Миллера и Цимбаллина.

**А. Б. Эренбург** защитил 17 февраля 1944 г. диссертацию на тему «Основы теории и механического расчета проводов и антенн».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Китаев и кандидат техн. наук, доц. И. В. Колтев.

Приведены основы теории гибкой нити, расчетные формулы для определения провеса и натяжения провода и антенны и примерные расчеты телеграфного провода и антенны при переменных атмосферных условиях. Для решения характеристических уравнений состояния провода или антенны дана специальная номограмма.

**М. Ф. Копп** защитил 13 апреля 1944 г. диссертацию на тему «Анализ обходных путей систем автоматических телефонных станций».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Китаев и кандидат техн. наук, доц. Е. В. Мархай.

Сообщен новый уточненный метод расчета влияния обратной блокировки приборов в схеме автоматических телефонных станций. Дан анализ и сравнение обходных систем с шаговыми и машинными системами АТС. Рассмотрен вопрос о трансляции абонентских импульсов в схемах АТС.

**Б. С. Лившиц** защитил 13 апреля 1944 г. диссертацию на тему «Некоторые вопросы предвысказания».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Китаев и доц. Е. Н. Бухман.

Исследованы вопросы, связанные с определением технической скорости ответа телефонной станции в применении к скелетной схеме ИВ-ПИ шаговой АТС. На основе математического анализа, подтвержденного рядом экспериментальных данных, предложена схема предвысказания, обеспечивающая максимальную техническую скорость времени ожидания станции.

**И. В. Басик** защитил 20 апреля 1944 г. диссертацию на тему «Преобразование спектров в некоторых нелинейных электрических системах».

Официальные оппоненты: кандидат техн. наук, проф. Н. А. Баев и кандидат техн. наук, доц. М. И. Пономарев.

Рассмотрен вопрос об определении продуктов преобразования в нелинейных электрических системах (преобразователях частот) с учетом комплексных нагрузочных сопротивлений. Дан метод решения вопроса с применением установленного автором нового вида функций—обобщенных многократных функций Бесселя от многих переменных.

**И. И. Шумлянский** защитил 8 июня 1944 г. диссертацию на тему «Управление и регулировка режима лампового генератора».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. С. Гоноровский и кандидат техн. наук, доц. Б. П. Терентьев.

Исследованы различные режимы лампового генератора с посторонним возбуждением при изменении нагрузочного сопротивления. Установлены законы эволюции режима генератора и оптимальные условия для различных режимов работы генератора. Полученные соотношения разрешают построение различных регулировочных кривых, облегчаю-

щих настройку и регулировку генератора в условиях эксплуатации.

**И. А. Бабицкий** защитил 13 июля 1944 г. диссертацию на тему «Теория совершенного пучка».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Китаев и доц. Е. Н. Бухман.

Приведены систематизация и сравнительный анализ различных методов расчета погрешного числа механизмов на АТС при так называемой «совершенной схеме» включения.

**П. П. Романов** защитил 30 ноября 1944 г. диссертацию на тему «Уплотнение стальных цепей телеграфных каналов».

Официальные оппоненты: кандидат техн. наук, проф. Б. С. Комаров и кандидат техн. наук, доц. П. А. Наумов.

На основе теоретического исследования телеграфных искажений обоснована возможность увеличения пропускной способности стальных проводов и практически осуществлено увеличение ее на 100%. Представлены конструктивные разработки о конечной, промежуточной и трансляционной аппаратуры на основе существующей и практически достигнуто увеличение дальности телеграфирования на повышенной скорости. Разработки автора применяются на магистральных линиях связи системы Министерства путей сообщения, в частности, на линиях Москва—Ташкент—Ашхабад и Москва—Свердловск, Омск—Челябинск—Пермь.

**А. П. Резвяков** защитил 31 мая 1945 г. диссертацию на тему «Снижение помех в высокочастотных телефонных каналах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. К. Акульшин и кандидат техн. наук, доц. М. И. Пономарев.

Доказана возможность снижения помех в телефонных каналах и каналах проволочного вещания путем использования метода «амплитудного контроля», заключающегося в использовании разработанных автором «амплитудных фильтров» (устройств, ограничивающих действующий динамический диапазон) и компандорных устройств различных классов (устройств, регулирующих действующий динамический диапазон).

**Ю. А. Якуб** защитила 31 мая 1945 г. диссертацию на тему «Параметрическая стабилизация и принудительная синхронизация маломощных генераторов в установках дальней связи».

Официальные оппоненты: доктор физ.-матем. наук, проф. С. Э. Хайкин и кандидат техн. наук, доц. Г. В. Добровольский.

Приведен математический анализ различных схем параметрической стабилизации автогенераторов и выведены расчетные формулы стабилизирующих элементов. Исследован стационарный режим автогенератора, находящегося под воздействием посторонней э. д. с. близкой к ней частоты и синхронизированной ею. Получены расчетные формулы зависимости полосы синхронизма генератора от амплитуды и фазы синхронизирующей э. д. с. для реальной схемы генератора. Анализ проведен при помощи составления уравнений фазного баланса.

Экспериментальная проверка дала хорошее совпадение результатов с полученными расчетными формулами.

**И. И. Вольман** защитил 28 июня 1945 г. диссертацию на тему «Возбуждение электромагнитных волн в прямоугольном волноводе линейным вибратором».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Г. Аренберг и доктор техн. наук, проф. Л. А. Жекулин.

Рассмотрен идеальный волновод с бесконечной проводимостью стенок. Методом зеркальных изображений решена задача возбуждения электромагнитных волн двумя проводящими параллельными плоскостями. Методом «наведенных» э. д. с. вычислено сопротивление излучения путем суммирования полей вибратора и его зеркальных изображений. Решена задача о возбуждении электромагнитных волн в прямоугольных волноводах линейным вибратором.

М. С. Орлов защитил 17 января 1946 г. диссертацию на тему «Теория и расчет радиотрансляционных сетей вещания».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук И. Г. Дрейзен и доц. В. А. Новиков.

На основе теоретического и экспериментального материала проанализированы электрические свойства трансляционных сетей вещания и приведены различные методы их расчета.

В. А. Дубовик защитил 17 января 1946 г. диссертацию на тему «Теоретические и экспериментальные исследования телеграфных сигналов в каналах тонального телеграфирования».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. К. Аккульшин и кандидат техн. наук, доц. К. Е. Кульбацкий.

Определены факторы, влияющие на искажения телеграфных сигналов в каналах тонального телеграфирования. Установлена зависимость искажений телеграфных сигналов от изменения уровня и метод качественной оценки приемников с точки зрения искажения телеграфного сигнала. Указаны недостатки существующих систем аппаратуры.

Р. Д. Лейтес защитила 7 марта 1946 г. диссертацию на тему «Анализ прохождения кратковременных импульсов через радиоприемное устройство».

Официальные оппоненты: проф. Г. А. Левин и доц. Ю. В. Кобзарев.

Исследованы нестационарные явления, сопровождающие прохождение кратковременных импульсных посылок различной формы через многокаскадный усилитель высокой частоты. Сделан ряд выводов по рациональному выбору ши-

рины полосы усилителя при заданной форме посылки. Рассмотрены нестационарные процессы в детекторе с емкостной и смешанной нагрузками при мгновенном включении на вход синусоидальной э. д. с. и при воздействии линейно-нарастающей синусоидальной э. д. с. Экспериментальная проверка показала совпадение опытных данных с результатами расчета.

Г. А. Ремез защитил 10 октября 1946 г. диссертацию на тему «Некоторые свойства пьезоэлектрических фильтров из сегнетовой соли».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Е. Горон и доктор физ.-матем. наук, проф. С. Э. Хайкин.

Показано, что в фильтрах из сегнетовой соли представляется возможным в отличие от кварцевых фильтров регулировать ширину полосы пропускания путем изменения площади электродов. Последние должны быть наложены на сегнетовую пластинку так, чтобы отсутствовал зазор. Приведен экспериментальный и расчетный материал по определению резонансной и антирезонансной частот сегнетовой пластинки в функции площади электродов.

Б. Г. Страусов защитил 10 октября 1946 г. диссертацию на тему «Измерение мощности с непрерывным отсчетом на радиочастотах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. А. Жекулин и доктор техн. наук Г. З. Айзенберг.

Предложен новый исследованный теоретически и экспериментально метод измерения мощности в фидерах, на основе которого разработан прибор, успешно прошедший эксплуатационные испытания для измерения мощности в фидере коротковолновых передатчиков.

Кандидат техн. наук, доц. М. Р. ШЕБЕС  
Ученый секретарь Ученого совета МИИС



## В комиссии по истории физико-математических наук Академии наук СССР

На заседании (XXIII) Комиссии по истории физико-математических наук 4 марта с. г. был заслушан доклад проф. Я. Г. Дорфмана «О магните—Уильяма Гильберта». На пороге семнадцатого столетия (1600 г.) в Англии появился знаменитый труд на латинском языке выдающегося врача и физика Уильяма Гильберта (1540—1603) «О (природном) магните, магнитных телах, а также о большом (природном) магните—Земле; новое учение о природе, доказанное многочисленными аргументами и экспериментами». Проф. Я. Г. Дорфман дал подробный анализ этого произведения и указал, что эта книга выдержала на протяжении 35 лет не менее 8 изданий в Лондоне, Амстердаме, Ферраре, Штеттине и Франкфурте.

Трактат Гильберта—это не только капитальный научный труд, но вместе с тем—это первый манифест опытной науки нового времени, «которая извлекает познания не только из книг, но и из самих вещей». «При открытии тайных предметов и при исследовании скрытых причин более серьезные основания добываются из надежных экспериментов и доказанных аргументов, чем из правдоподобных предположений и мнений обычных философских спекулянтов». Так провозгласил Уильям Гильберт за 20 лет до появления «Нового органа» Фр. Бэкона.

Предметом непосредственного исследования Гильберта служат магнитные свойства тел. Он поставил себе задачей критически проверить все, что написано до него о магнетизме. Он отмечает, что магнитные явления открыты практиками-металлургами при выплавке железа, но их опытные познания окутаны бесчисленными небылицами и спекуляциями. И вот Гильберт шаг за шагом расчищает вопрос от ошибочных утверждений, подвергая их проверке с помощью кропотливых и остроумных опытов. Так Гильбертом были постепенно созданы твердые основы учения о ферромагнетизме. Впервые он открыл то, что мы называем магнит-

ным полем, и дал первую наметку графического метода его изображения с помощью силовых линий,—метода, впоследствии доведенного до совершенства Фарадеем. Впервые в физике Гильберт применил принцип подобия, воспользовавшись в своих опытах намагниченной сферой в качестве модели земного шара. И этими опытами он впервые установил, что Земля—естественный магнит.

Гильберт установил и объяснил различие между явлениями электростатическими и магнитостатическими и ему принадлежит самый термин «электрические свойства». Изобретенные им магнитные и электрические приборы явились прототипами наших магнетометров, электроскопов и электрометров.

Опираясь на свое открытие магнетизма земного шара, Гильберт экстраполировал его на другие небесные тела и приписал магнитным силам ту роль, которая, как показал впоследствии Ньютон, принадлежит тяготению. При этом Гильберт объявил себя горячим приверженцем «воссоздателя астрономии» Коперника, решительно отвергая схоластическое учение о вращении небес, «как рассказы старух баб». Таким образом, труд Гильберта «De Magnete»—первая яркая пропаганда системы Коперника, это предшественник знаменитых «Диалогов» Галилея. Недаром Галилей изучал, повторял и проверял опыты Гильберта и объявил себя его горячим почитателем и приверженцем.

Вместе с тем именно Галилей отметил основной недостаток всех исследований Гильберта—их исключительно качественный характер: «Ему следовало бы быть несколько больше математиком». «Но это несколько не умаляет славы первого наблюдателя»,—добавляет Галилей.

М. И. РАДОВСКИЙ  
Ученый секретарь Комиссии по истории физико-математических наук Академии наук СССР

## Книга по промышленным электрическим печам

V. Paschkis. *Industrial Electric Furnaces and Appliances, том I. Interscience Publishers Inc., New York, 1945. Сmp. 242.*

Работа Пашкиса о промышленных электрических печах состоит из двух томов; первый том охватывает изложение общих принципов (термических электрических и экономических) для всех типов печей и устройств, а также изложение вопросов, связанных с дуговыми печами (сталеплавильными и ферросплавными); второй том посвящается индукционному и диэлектрическому нагреву, а также нагреву с противлением.

Настоящая рецензия касается первого тома.

Пашкис является крупным специалистом в области электрических печей и известен работникам советской электротермии по более ранней книге «Электрические промышленные печи», переведенной с немецкого языка на русский в 1934 г. Рассматриваемая работа охватывает гораздо более широкий круг вопросов и представляет собой значительную ценность.

Книга состоит из двух частей.

Главы I—V первой части посвящены классификации существующих способов электронагрева, выбору того или другого способа для различных технологических процессов и рассмотрению преимуществ и недостатков электронагрева по сравнению с другими видами нагрева. Эти вопросы освещены в сжатой, но весьма последовательной форме и сопровождаются таблицами, дающими наглядное представление по рассматриваемым вопросам.

Глава VI посвящена основам расчета электропечей. Эта глава разбита на два раздела: 1) принципы теплотехнического расчета и 2) принципы электрического расчета, которые совершенно не равноценны по объему и значимости приведенного в них материала. Первый раздел занимает 90% объема всей главы и представленный в нем материал довольно полно охватывает общие принципы теплотехнического расчета печей. Во втором разделе автор ограничивается лишь общим определением основных понятий. Такая неравноценность указанных разделов в значительной степени объясняется тем, что расчет рассматриваемых далее различных типов электропечей имеет много общего в своей теплотехнической части и принципиально различен в своей электротехнической части. Однако, нам представляется, что такие общие понятия, как скин-эффект и индуктивность, следовало осветить значительно полнее. Следовало бы также при описании общих принципов электрического расчета рассмотреть в общей форме вопросы электрического к. п. д. и т. д.

Глава VII дает краткий обзор экономических вопросов, связанных с электрическим нагревом (источники потерь энергии, сравнение стоимости электрических печей и пламенных печей, основные моменты экономической эксплуатации печей).

Вторая часть книги посвящена дуговым печам и печам смешанного типа (с нагревом дугой и сопротивлением).

В главах I и II этой части книги после краткого введения автор приводит довольно подробные данные о размерах плавильного пространства печи и футеровке печи и свода, а также описание отдельных узлов конструкции и загрузочных устройств для дуговых сталеплавильных печей. Но, к сожалению, следя, очевидно, примеру книги Сижко-Крица («Производство электростали»), Пашкис почти совершенно избегает как критики приведенных материалов, так и расчетной стороны вопроса. Хотя достоверность отдельных диаграмм (например, рис. 53) вызывает серьезное сомнение, но все же приведенные фактические данные, осо-

бенно о крупных дуговых печах, представляют несомненный интерес.

Глава III, отведенная электродам, изложена достаточно подробно и, в целом, на современном техническом уровне. Было бы полезно пополнить эту главу методом расчета электродов. Весьма интересны данные об удельном сопротивлении графитовых и угольных электродов в зависимости от температуры и размера сечения, о теплоемкости электродов, о допустимой плотности тока и т. д.

Главы IV—VI посвящены шинам, трансформаторам, реакторам и автоматическому управлению работой дуговых печей. Здесь приведены некоторые формулы и кривые для расчета, активного и реактивного сопротивлений короткой сети, а также пример расчета короткой сети без применения шихтовки шин низкого напряжения, заимствованный из статьи Levy (1932 г.) К сожалению, ничего не сказано о выборе сечения шин, о распределении тока по отдельным шинам для шихтованных и нешихтованных пакетов и о расчете шихтованных пакетов. Кривая коэффициента скин-эффекта в прямоугольных полосах (рис. 103) повторяет пространственную кривую, выведенную из предположения, что силовые линии магнитного поля полосы параллельны ее длинной стороне. Такая кривая, как уже давно указано, совершенно непригодна для практических расчетов. Материал о современных трансформаторах, реакторах и аппаратуре авторегулировки—очень поверхностный, ряд современных систем авторегулировки (например электронных) даже не упомянут.

В главе VII подробно изложены электрические характеристики дуговых печей для различных значений параметров.

Для графического изображения характеристик применены оригинальные диаграммы со ступенчатым изменением шкалы по оси абсцисс, позволяющим в небольшом рисунке охватить весьма широкие интервалы значений отдельных величин.

Автор впервые в иностранной литературе в качестве основного аргумента, определяющего изменения различных характерных величин, ввел отношение реактивного сопротивления к активному сопротивлению установки, как это принято в СССР. Кроме того, в качестве второго аргумента он вводит отношение сопротивления дуги к активному сопротивлению установки, включенному дополнительно к дуге. Применение этих двух отношений позволяет автору строить универсальные диаграммы электрических характеристик, что выгодно отличает данную книгу от монографии, написанной в 1933 г. И. Вочке «Электрическая плавильная печь». Приведены также формулы для однофазных и трехфазных дуговых печей, позволяющие установить максимальные значения полезной и общей активной мощности установки, а также соотношения при коротком замыкании электродов в печи. В сводной таблице обобщены все выводы в виде расчетных формул, позволяющих найти необходимые значения отдельных величин; подобная таблица весьма полезна для занимающихся построением дуговых печей и анализом их электрических характеристик.

Рассмотрено также влияние на электрические характеристики изменений напряжения печи, частоты питающего тока и влияния тока холостого хода печного трансформатора и несимметрии подвода тока к печи. Здесь Пашкис ссылается на другие источники, ограничиваясь только

кратким изложением вопроса и некоторыми иллюстрациями. Далее рассматриваются вопросы перенапряжений в установках дуговых печей и меры для их уменьшения. Как известно, этот вопрос приобрел в США особую остроту в связи с установкой в последние годы мощных дуговых печей, питаемых от крупных электрических станций воздушными линиями высоких напряжений и значительной протяженности; в данной книге он изложен довольно кратко, но правильное представление о его сущности дается.

В конце VII главы, впервые в книжной литературе, рассмотрены способы снятия электрических характеристик дуговых печей и определения потерь в отдельных участках установок. Наш опыт позволяет несколько пополюнить эту часть главы, но и в своем настоящем виде она имеет значительный практический интерес. Кроме этого приведены соображения о различных значениях к. п. д. и о тепловых балансах печи, а также кратко изложен метод расчета производительности и электрической части печи. В этом последнем вопросе автор занимает несколько устаревшую позицию, ориентируя рабочие режимы дуговых печей на максимумы полезной мощности (мощность электрических дуг). Последние работы в СССР ясно показали, что подобная ориентировка не может быть рекомендована безоговорочно для всех случаев работы дуговых печей.

Глава VII вообще выгодно отличается обилием расчетов и цифровых данных, охватывающих весьма широкий диапазон значений характерных величин.

Однако, эта глава имеет и весьма серьезный недостаток, заключающийся в том, что Пашкис, так же как и другие авторы напечатанных до настоящего времени книг по дуговым печам, не связал в одно целое различные стороны единой проблемы рационального устройства и работы дуговых печей, а именно: металлургических особенностей процесса плавки, конструкции и размеров плавильного про-

странства печи, ее тепловых потерь и электрической части печной установки. Необходимость в таком комплексном решении весьма назрела, трудности здесь весьма значительны, но возможные результаты могут оказаться также очень существенными. Работы, проводимые в СССР, позволяют рассчитывать, что подобное комплексное решение сможет быть предложено советскими электрометаллургами. Недостатком данной главы является также крайняя недостаточность сведений об электрической дуге.

В последней (VIII) главе кратко рассматриваются особенности устройства и конструкции ферросплавных печей. Данные, сообщаемые в этой главе, являются достаточно новыми, но они охватывают весьма небольшой круг печей и не претендуют, повидимому, на исчерпывающий характер.

В конце книги приведен краткий цифровой справочный материал.

Автор широко использовал литературные источники на немецком, французском и английском языках, но, повидимому, он совершенно не знаком с литературой по вопросам дуговых печей на русском языке; это лишило его ряда материалов, которые могли быть весьма полезными ему при составлении настоящей работы.

В целом первый том книги Пашкиса представляет несомненную ценность для советских электрометаллургов и перевод этого тома на русский язык с некоторой переработкой и дополнением можно было бы безусловно приветствовать.

*Инж. Д. Б. МОНДРУС,  
кандидат техн. наук А. В. ДОНСКОЙ  
и кандидат техн. наук А. Н. СОКОЛОВ  
Секция электротермии ВНИТОЭ*



## К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ И АВТОРОВ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

*Ниже публикуются к сведению читателей и авторов журнала „Электричество“ указания по оформлению библиографических и т. п. данных.*

Порядок указания журнальных статей в перечнях литературных источников и в заголовках рефератов:

1. Инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции).
2. Название статьи (в оригинале; в заголовках рефератов — в русском переводе).
3. Название журнала.
4. Часть журнала (для журналов, каковы El. Eng, JIEE и др., имеющих разделение на части).
5. Том (для журналов, не имеющих счета томов, — номер).
6. Страница начала статьи (в заголовках рефератов указываются через тире страницы начала и конца статьи).
7. Год издания.

### *Примеры*

М. П. Костенко и Л. Р. Нейман. Электромагнитные процессы в мощных выпрямителях и их связь с параметрами энергоснабжающей системы. *Электричество*, № 1, стр. 7, 1947.

H. Stainer, F. Zehner, and H. Züvers. Pentode Ignitrons for Electronic Converters. *El. Eng, Tr.*, т. 63, стр. 693, 1944.

Порядок указания книг (отдельных изданий) в перечнях литературных источников:

1. Инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции).
2. Заглавие книги (в оригинале) и том.
3. Издательство.
4. Место издания (для иностранных изданий).
5. Число страниц.
6. Год издания.

### *Примеры*

К. А. Андрианов и О. И. Грибанова. Кремний-органические полимерные продукты для промышленности. Ч. II. Госэнергоиздат, 56 стр., 1946.

G. M. Chute. *Electronics in Industry*. Mc Graw-Hill, Нью-Йорк — Лондон, 451 стр., 1946.

Указания на фамилии иностранных авторов в тексте статей даются в русской транскрипции. Лишь в тех случаях, когда русская транскрипция не дает ясного представления об оригинальной транскрипции (например, первая буква фамилии К или С), то после упоминания автора в первый раз дается в скобках оригинальная транскрипция, если только работы данного автора не имеются в указателе литературных источников в конце статьи. При упоминании в тексте русские авторы обязательно указываются с инициалами.

Иностранные географические названия даются по-русски, и лишь в необходимых случаях после упоминания названия в первый раз дается в скобках оригинальное название.

Названия иностранных фирм приводятся в оригинальной транскрипции, причем следует пользоваться употребительными сокращениями, например:

ASEA — Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget  
GE — General Electric Company  
MV — Metropolitan Vickers и т. п.



Обозначения наименований журналов, которые употребляются во всех случаях при ссылках на материалы, опубликованные в соответствующих журналах

А. и Т.	Автоматика и телемеханика	GER	General Electric Review
Амер. пром.	Американская промышленность и техника	Ind. Eng. Ch.	Industrial and Engineering Chemistry
Брит. пром.	Британская промышленность и техника	Illum. Eng.	Illuminating Engineering
ВЭП	Вестник электропромышленности	JAIEE	Journal of the American Institute of Electrical Engineers
ДАН СССР	Доклады Академии наук СССР	J. Am. Cer. Soc.	Journal of the American Ceramic Society
ЖПХ	Журнал прикладной химии	J. Am. Ch. Soc.	Journal of the American Chemical Society
ЖОХ	Журнал общей химии	J. Appl. Phys.	Journal of the Applied Physics
ЖТФ	Журнал технической физики	JIEE	Journal of the Institution of Electrical Engineers, London
ЖЭТФ	Журнал экспериментальной и теоретической физики	J. Faraday Soc.	Journal of the Faraday Society
Изв. ОТН	АН СССР Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук	J. Franklin Inst.	Journal of the Franklin Institute
ИЭСТ	Известия электропромышленности слабого тока	J. Sc. Instr.	Journal of Scientific Instruments
Пром. эн.	Промышленная энергетика	Light. a. L.	Lighting and Lamps
Хим. пром.	Химическая промышленность	MVG	Metropolitan Vickers Gazette
Эл. ст.	Электрические станции	Pass. Transport J.	Passenger Transport Journal
AEG M.	AEG Mitteilungen	Phil. Mag.	Philosophical Magazine and Journal of Science
A. i. E.	Archiv für Elektrotechnik	Phys. Rev.	Physical Review
Allis Ch. El. Rev.	Allis Chalmers Electric Review	Phys. Z.	Physikalische Zeitschrift
ASEA J.	ASEA Journal	PIRE	Proceedings of the Institute of Radio Engineers
ASEA T.	ASEA's Tidning	Power Plant Eng.	Power Plant Engineering
BVM	Brown Boveri Mitteilungen	Prod. Eng.	Product Engineering
BEAMA J.	BEAMA Journal	Railw. Age	Railway Age
Bell. Lab. Rec.	Bell Laboratories Record	Railw. G.	Railway Gazette
Bell. Syst. Techn. J.	Bell System Technical Journal	Rev. Sc. Instr.	Review of Scientific Instruments
Bull. ASE	Bulletin de l' Association Suisse des Electriciens.	RGE	Revue Générale de l'Electricité
Bull. Edison El. Inst.	Bulletin of the Edison Electric Institute	Rural El. News	Rural Electrification News
Bull. SFE	Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens	SZ	Siemens Zeitschrift
E. u. M.	Elektrotechnik und Maschinenbau	Tr. AIEE	Transactions of the American Institute of Electrical Engineers
ETZ	Elektrotechnische Zeitschrift	Westinghouse Eng.	Westinghouse Engineer
El. Contr.	Electrical Contracting	Wire a. Wire Prod.	Wire and Wire Products
El. Eng.	Electrical Engineering	Wirel. Age	Wireless Age
El. Ind.	Electrical Industry	Wirel. World	Wireless World
El. Light a. Power	Electric Light and Power	Z. f. Phys.	Zeitschrift für Physik
El. Mfg.	Electrical Manufacturing		
El. News a. Eng.	Electrical News and Engineering		
El. Rev.	Electrical Review, London		
El. West	Electrical West		
El.-wirt.	Elektrizitätswirtschaft		
El. World	Electrical World		
Electronic Eng.	Electronic Engineering		

Наименования журналов: Электричество, Радиотехника, Электросвязь, Electrician, Electricien, Electronics, Engineer, Engineering, Nature, Power, Science а также журналов, не указанных в настоящем списке, даются полностью.



ПОПРАВКИ

В информации о Всесоюзной научно-технической сессии по электрическим машинам в Ленинграде (Электричество, № 2, 1947) на стр. 89, правый столбец, 27 строка сверху—следует читать: „электромашинных щеток“ и т. д.

В автореферате Л. Б. Гейлера „Оптимальное скольжение асинхронного двигателя при переменной нагрузке“ (Электричество, № 3, 1947) на стр. 74 последнее число в первой колонке таблицы—следует читать не „200“, а „3 200“.



# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Москва, Шлюзовая наб., 10

**ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА**

на II полугодие 1947 г.

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## **„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“**

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

Основан в 1880 году Русским техническим обществом

12 номеров в год по 12 печ. листов

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием всех отраслей электротехники и электрификации СССР

### **ТЕМАТИЧЕСКИЕ ОТДЕЛЫ ЖУРНАЛА**

- Физические и общетеоретические вопросы электричества и электротехники
- Общие вопросы электроэнергетики
  - Электрические системы, станции, сети и передача электроэнергии на дальние расстояния
  - Электрические машины и трансформаторы
  - Электропривод и электрификация отраслей промышленности
  - Электрификация транспорта
  - Электрификация сельского хозяйства
- Техника высоких напряжений (высоковольтная аппаратура и грозозащита)
- Ионно-электронные преобразователи
- Радиотехника
- Электросвязь по проводам
- Автоматика, телемеханика, техника релейной защиты
  - Кабельная техника
  - Светотехника
  - Электротермия и электросварка
  - Электрические измерения и приборы
  - Электротехнические материалы
  - Электротехнические стандарты, правила, нормы, терминология
- История науки об электричестве и история электротехники

#### **КРОМЕ ТОГО, В ЖУРНАЛЕ ИМЕЮТСЯ ОТДЕЛЫ:**

Из научно-исследовательских работ (авторефераты); Дискуссии; Рефераты (по иностранным техническим журналам); Хроника; Библиография.

**Подписная цена на полугодие 48 руб.**

**ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ В ОТДЕЛЕНИЯХ „СОЮЗПЕЧАТИ“ И НА ПОЧТЕ**