

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

946



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

5

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>В. А. Фабрикант</i> — Современная физика и энергетика . . . . .	8
<i>Н. Д. Папалекси</i> — К вопросу об измерении расстояния от земли до луны с помощью электромагнитных волн . . . . .	9
<i>А. Я. Буйлов</i> — Основные типы современных выключателей высокого напряжения . . . . .	16
<i>Е. М. Цейров</i> — Гасительная камера воздушного выключателя ВЭИ на 110 kV . . . . .	24
<i>И. С. Трухманов</i> — К итогам испытаний воздушного выключателя на 110 kV в энергосистеме	31
<i>Ю. В. Буткевич</i> и <i>А. М. Бронштейн</i> — Выключатель с твердым газогенерирующим веществом 6—10 kV, 200—300 тыс. kVA . . . . .	35
<i>Т. А. Суетин</i> — Стенотрон — ионная генераторная лампа . . . . .	44
<i>Б. Г. Жданов</i> — Анализ опыта эксплуатации ртутных выпрямителей на московском метрополитене . . . . .	49
<i>С. И. Тельный</i> — Автоматическое регулирование трехфазных дуговых электропечей . . . . .	53
<i>Ю. Е. Ефроймович</i> — Совместная работа автоматических регуляторов на трехфазных электросталеплавильных печах . . . . .	62
<i>Н. Н. Щедрин</i> — К теории сложных несимметричных режимов электрических систем . . . . .	66
<i>Б. Л. Айзенберг</i> — Селективная система плазменных предохранителей . . . . .	77
<i>Е. И. Дмитриев</i> — Расчет функциональных делителей напряжения . . . . .	81
<i>И. Е. Балыгин</i> — Емкостный делитель высокого напряжения с экранировкой . . . . .	84
<i>И. Л. Файбисович</i> — Автоматическое отключение контактного провода в случае его обрыва	85
<i>главнии Ипполитович Шенфер</i> . . . . .	86
Хроника . . . . .	87
Рефераты . . . . .	91



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Академик **Б. Е. Веденеев** (отв. редактор), член-корр. АН СССР  
**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**, академик **Н. Д. Папалекси**, доктор техн. наук, проф.  
**Г. Н. Петров**, канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, инж. **А. И. Товсто-**  
**палов**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

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

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10; тел. К 4-24-80  
Адрес для корреспонденции: Москва. Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

# Современная физика и энергетика

Доктор физико-матем. наук, проф. В. А. ФАБРИКАНТ

Московский энергетический институт им. Молотова

Несмотря на отличающийся своей сложностью математический аппарат современной физики, в ее основе по существу лежат две очень простых по внешнему виду формулы.

Это формула де Брогеля:

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

и формула Эйнштейна:

$$E = mc^2. \quad (2)$$

Физический смысл обеих формул далеко не так прост, как их внешний вид.

Формула де Брогеля говорит, что движущейся со скоростью  $v$  частице, обладающей массой  $m$ , соответствует распространяющаяся волна с длиной волны  $\lambda$  ( $h$ —знаменитая постоянная Планка).

Любопытно, что сначала сами физики не приписывали формуле де Брогеля какого-либо непосредственного физического смысла. Но вскоре совершенно случайно была экспериментально обнаружена полная реальность *волн материи*. В настоящее время существуют уже тысячи работ, в которых исследовались волновые свойства материи (интерференция и дифракция). Более того, огромное число работ посвящено практическому использованию дифракции электронов для исследования строения поверхностных слоев и других объектов.

Трудно себе представить что-либо более противоположное, чем *частица и волна*. Частица локализована в определенной точке пространства, волна непрерывно заполняет все пространство. Для того чтобы соединить воедино столь противоположные свойства, пришлось трактовать волны де Брогеля как волны вероятности. Интенсивность волны де Брогеля в каждой точке пространства дает вероятность нахождения частицы. Термин волны вероятности вряд ли звучит убедительно для специалистов.

Согласно формуле Эйнштейна всякой массе эквивалентна энергия  $E$ , равная массе, умноженной на квадрат скорости света  $[(3 \cdot 10^{10})^2 =$

$= 9 \cdot 10^{20}]$  и, наоборот, всякой порции энергии  $E$  соответствует масса, равная  $\frac{E}{c^2}$ .

**Волновая природа материи и электрический ток.** Возвращаясь к формуле де Брогеля, остановимся лишь на самых фундаментальных и вместе с тем на самых поразительных энергетических следствиях, вытекающих из

волновых свойств материи. *Для любой волны нет в природе непреодолимых преград.* Все мы знаем, что световая волна проникает на некоторую глубину в любое реальное зеркало. Даже при явлении полного внутреннего отражения световая волна заходит во вторую среду и там поворачивает обратно. Также звуковые волны проникают в любую стену, как бы прочна она ни была. Наименьшая глубина, на которую проникает волна в препятствие, в какой-то мере соизмерима с длиной волны. В обычной механике частиц, существовавшей до появления волновой механики, дело обстояло как раз обратным образом. Если частица обладает полным запасом энергии  $E$ , то весь мир делится для нее на две резко отделенные области: „дозволенную“ и „недозволенную“. В дозволенной области потенциальная энергия частицы  $U$  меньше  $E$ , в недозволенной  $U$  больше  $E$ . Частица не может проникнуть в область, где ее потенциальная энергия становится слишком большой. Ведь полная энергия  $E$  равна сумме кинетической и потенциальной энергии:

$$E = T + U, \quad (3)$$

где  $T = \frac{mv^2}{2}$ .

Если  $U$  больше  $E$ , то  $T$  должно быть согласно (3) отрицательной величиной, а скорость  $v$ —мнимой величиной.

Волновая теория материи дает конечную величину для вероятности нахождения частицы в недозволенной области. Для волн материи, так же как для любых волн, нет непреодолимых препятствий. Правда, согласно формуле де



Брогля даже для самых легких частиц—электронов длина волны представляет величину порядка  $10^{-8}$  с.п., т. е. только на такую примерно глубину могут проникать электроны в недозволённую область. Казалось бы о таком незначительном расширении дозволённой области не стоило бы и говорить. Однако, это не так. Далее мы увидим, что это расширение проявляет себя весьма ощутительным образом и имеет большое чисто практическое значение.

Представим себе частицу, обладающую запасом энергии  $E$  и встречающую на своем пути „потенциальный барьер“, т. е. область, где ее потенциальная энергия имеет резкий максимум, причем высота максимума больше  $E$ . Если, однако, толщина барьера соизмерима с глубиной проникновения деброглевской волны, то волна частично пройдет сквозь него и, следовательно, будет существовать конечная вероятность обнаружить частицу по ту сторону барьера.

Вот эта прозрачность барьеров или „туннельный“ эффект (как бы прохождение частицы сквозь туннель в потенциальной горе) проявляется прежде всего при выходе электронов из металлического катода в вакуум или газовую среду. На границе металл—вакуум существует барьер, препятствующий выходу электронов. Однако, при наложении электрического поля начинает сказываться прозрачность барьера, и электронный ток холодной эмиссии достигает заметной величины при полях значительно меньших, чем это следует из классических представлений.

В результате технические характеристики кенотронов (выпрямителей) и других приборов с холодной эмиссией несут на себе явный отпечаток волновой природы материи.

Наконец, волновая природа материи весьма ярко проявляется в процессе, служащем основой современной энергетики. Я говорю об *электрическом токе*. Сравнительно недавно физики считали, что электроны—носители электрического тока—двигаются в проводнике, подчиняясь законам обычной механики. При своем движении электроны сталкиваются с атомами, из которых построен проводник, и поэтому средняя длина свободного пробега электрона—порядка расстояния между атомами. Проводники потому и проводят ток, что в них есть свободные электроны, способные двигаться среди атомов. В диэлектриках свободных электронов нет. Картина отличалась большой наглядностью, но приводила к большим противоречиям с опытом. Ток, очевидно, пропорционален произведению длины свободного пробега электронов на концентрацию свободных электронов. Так как в классической теории длина свободного пробега очень невелика, число свободных электронов должно быть, наоборот, очень велико. При нагревании металла этот электронный газ также должен нагреваться. Поэтому теплоемкость металла должна быть равна сумме теплоемкостей кристаллической решетки и электронов. Опыт же на долю электронов не оставлял ничего.

Тогда предположили, что только небольшая часть свободных электронов участвует в теплоемкости и в переносе тока (Паули—Ферми). Но тогда необходимо предположить, что длина свободного пробега электронов значительно больше расстояния между соседними атомами. Ведь произведение из длины свободного пробега на число носителей задано величиной тока, измеряемой амперметром.

Выход из этого острого конфликта дает только *волно-механическая картина процесса проводимости*. Согласно этой картине электроны свободны и в металлах и в диэлектриках. Электронные волны свободно распространяются по всем направлениям в любых кристаллах с идеально правильной структурой кристаллической решетки. Препятствиями служат только места, где правильность атомной решетки нарушается. Расстояния между этими местами естественно значительно больше, чем расстояния между соседними атомами.

Вопрос о причинах различия между проводниками и диэлектриками получил решение, в некотором смысле диаметрально противоположное классическому решению. Диэлектрики не проводят ток, так как электроны в них слишком свободны. Как это не парадоксально, но это именно так. При отсутствии электрического поля и в диэлектрике и в проводнике имеется совершенно хаотическое движение электронов. Никакого направленного тока электронов нет. При наложении внешнего электрического поля проявляется резкое различие в поведении электронов в диэлектрике и в проводнике. В диэлектрике электроны, не реагируя на внешнее поле, продолжают свободно двигаться во всех направлениях. В проводнике, наоборот, движение электронов поддается регулированию внешним электрическим полем. Под действием этого поля возникает упорядоченное движение электронов в одну сторону—то, что мы наблюдаем как электрический ток.

**Соотношение неопределенностей и ресурсы старой энергетики.** Как было отмечено, современная физика разрешает вещи, категорически запрещенные классической физикой. Но имеется и обратное—в современной физике возникают запреты, неведомые классике. Остановимся только на одном из наиболее фундаментальных запретов современной физики—на соотношении неопределенностей. Это соотношение было окружено вначале каким-то буквально мистическим ореолом и вызвало весьма бурные споры.

Соотношение неопределенностей или неточностей имеет следующий вид:

$$\Delta q \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}, \quad (4)$$

где  $\Delta q$  и  $\Delta p$  неопределенности, возникающие при одновременном определении координаты частицы  $q$  и ее импульса  $p$  ( $mv$ ). Соотношение неточностей имеет такой же простой внешний вид, как формулы (1) и (2), и такой же глубокий и сложный физический смысл.

Согласно (4) невозможно одновременно задать с любой степенью точности и координату и скорость частиц. Но ведь описание всякого механического движения начиналось в классической физике с задания начальных условий, т. е. координаты и скорости частицы в начальный момент времени. Значит, вся эта классическая картина рушится. Вместе с тем нетрудно видеть, что соотношение неопределенностей как раз является весьма наглядным следствием формулы де Броглия, иными словами,—следствием волновой природы материи. Каждый электротехник знает, что короткий импульс тока, распространяющийся вдоль линии, может быть разложен в интеграл Фурье. Получающиеся при этом частоты—не математическая фикция, а физическая или, если угодно, даже техническая реальность. Элементы сети, резонирующие на соответствующие частоты, могут в очень резкой форме подтвердить реальность данной математической операции. Электротехники, и особенно радиотехники, знают, что чем короче импульс, тем шире область соответствующих ему частот или длин волн. Но ведь это соотношение неопределенностей в электротехнике.

Возвратимся к физике. Если положение частицы задано с точностью  $\Delta q$ , то такой частице должна соответствовать волна де Броглия с амплитудой, отличной от нуля в области, имеющей длину, равную  $\Delta q$ . Ведь квадрат этой амплитуды (интенсивность) равен вероятности нахождения частицы. Такому обрывку волны, так же как импульсу тока, соответствует целый участок длин волн де Броглия. Но согласно формуле (1) каждой длине волны соответствует определенный механический импульс частицы  $mv$ . Значит, неопределенность импульса частицы  $\Delta p$  должна действительно возрастать с уменьшением  $\Delta q$ . Таким образом, соотношение неопределенностей является типичным волновым соотношением и лишено какого-либо „потустороннего“ содержания. Больше того, это соотношение имеет очень конкретные и важные энергетические следствия. Без всякого преувеличения можно сказать, что соотношение неопределенностей очень удобно для грубых прикидок наших энергетических возможностей. Такие прикидки очень любят инженеры, от них не отказываются и физики.

Переведем соотношение неопределенностей на энергетический язык. Формулу де Броглия (1) можно переписать в таком виде:

$$\lambda p = h. \quad (5)$$

Сопоставив соотношение неопределенностей (4) и (5), мы видим, что неопределенность импульса  $\Delta p$  становится существенной, т. е. сравнимой с самим  $p$  только при  $\Delta q$ , сравнимом с  $\lambda$ .

Следовательно, соотношение неопределенностей становится существенным только для объектов, размеры которых равны или меньше длины волн де Броглия. Такими объектами как раз являются атом и его ядро.

Как известно, атом состоит из массивного положительного ядра, имеющего радиус порядка  $10^{-13}$  см, и легкого облака отрицательных электронов, окружающего это ядро и имеющего радиус  $10^{-8}$  см. Напомним, что для электронов длина деброглевской волны порядка  $10^{-8}$  см. Близость между размерами атома и длиной деброглевской волны определяет все энергетические свойства атомов и молекул. Оценим запас энергии, которым может обладать электрон, входящий в состав атома. Ведь в нашей обычной энергетике при использовании процесса горения, как основного источника энергии, мы по существу используем часть энергии электронной оболочки атома. При горении, как и при всякой химической реакции, происходят деформации электронных оболочек атомов и выделяющаяся при этом энергия превращается в тепло. Подставим в соотношение неопределенностей вместо  $\Delta q$  размеры атома  $10^{-8}$  см, а вместо  $h$ — $6,6 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек, тогда  $\Delta p \approx 10^{-19}$  г·см·сек<sup>-1</sup>. Ясно, что сам импульс электрона в атоме должен быть не меньше  $\Delta p$ . Но кинетическая энергия частицы  $T$  весьма просто связана с импульсом:

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}. \quad (6)$$

Заменим  $p$  через  $10^{-19}$  г·см·сек<sup>-1</sup>, а  $m$ —массой электрона  $10^{-27}$ г:

$$T \approx \frac{10^{-38}}{2 \cdot 10^{-27}} \text{ эрг} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}.$$

Число атомов в килограмме угля порядка  $10^{25}$ , следовательно, запас энергии атомных электронных оболочек порядка  $10^{13}$  эрг или, что то же, несколько киловаттчасов. Именно такова реальная теплотворная способность угля. Соотношение неопределенностей с честью выдержало испытание, как инженерная расчетная формула в области обычной энергетике. Но соотношение неопределенностей содержит в себе большее. При помощи этого соотношения можно оценить ресурсы будущей ядерной энергетике.

**Ядерная энергетика.** Многочисленные и разнообразные эксперименты показали, как известно, что ядро атома состоит из протонов и нейтронов. Протоны—это положительно заряженные частицы с массой, примерно в 2 тыс. раз большей, чем масса электрона. Нейтроны имеют ту же массу, что и протоны, но лишены всякого электрического заряда. Радиус ядра очень мал, как было отмечено раньше,—порядка  $10^{-13}$  см. Это и есть  $\Delta q$  для частиц, входящих в ядро. Неопределенность импульса частицы, входящей в состав ядра, должна быть во столько же раз больше  $\Delta p$  для электрона атомной оболочки, во сколько раз радиус ядра меньше радиуса этой оболочки ( $10^{-8}$ ).

Таким образом, для ядерных частиц неопределенность импульса возрастает в 100 тыс. раз по сравнению с электронной оболочкой. Для энергии это даст увеличение согласно формуле

(6) в  $10^{10}$  раз, но надо учесть, что массы протона и нейтрона в  $10^3$  раз больше массы электрона (масса в знаменателе). В результате энергия частиц, входящих в состав ядра, должна быть примерно в 10 млн. раз больше, чем энергия электронной оболочки атома. В пересчете на килограмм вещества мы получаем уже *десятки миллионов киловаттчасов энергии!* Весь вопрос состоит в том, как извлечь эту огромную энергию. На этот вопрос дает нам ответ формула Эйнштейна, написанная нами вначале. Формула Эйнштейна представляет один из фундаментальных выводов теории относительности. Но сам творец теории относительности сначала не верил в возможность на земле убедиться в справедливости этой формулы. Согласно формуле Эйнштейна, масса может нацело превратиться в энергию и, наоборот, энергия— в массу.

Следует сделать одно существенное замечание философского характера. Лет сорок назад слово „энергетик“ имело совсем иное значение, чем теперь. Существовала философская школка, возглавлявшаяся Оствальдом— „крупным химиком и мелким философом“ по меткому определению В. И. Ленина. Так вот члены этой школки называли себя „энергетиками“ и занимались „ниспровержением“ научного материализма. Основной аргумент „энергетиков“ заключался в том, что, якобы, материя исчезает, превращаясь в энергию. „Энергетики“ смешивали физическое понятие массы с философским понятием материи. Ясно, что формула Эйнштейна ни в какой мере не затрагивает философского понятия материи как объективной реальности, существующей вне нас. Масса и энергия есть различные формы существования материи.

В своем знаменитом труде „Материализм и эмпириокритицизм“ Ленин писал: «... выражение „материя исчезает“, „материя сводится к электричеству“ и т. п., есть лишь гносеологически—беспомощное выражение той истины, что удаётся открыть новые формы материи, новые формы материального движения, свести старые формы к этим новым и т. д.».

Законы сохранения энергии и массы должны быть заменены общим законом сохранения, учитывающим возможность взаимных превращений энергии и массы. Все развитие физики не изменило ни одной буквы в формулировке закона сохранения, данной Лукрецием 2 тысячи лет назад— „Из ничего, даже волей богов, ничего не творится“.

Перейдем, однако, от философии к физике и технике. В 1919 г. Резерфорд превратил атом одного вещества в атом другого вещества. Он бомбардировал атом азота ядрами гелия и, расколов ядро атома азота, превратил его в ядро изотопа кислорода. Однако, с энергетической точки зрения опыт имел отрицательный результат. Происходила затрата, а не выигрыш энергии. Картина резко изменилась, когда Резерфорд перешел к расщеплению атома алюминия. При этом выделилась часть огромной энергии, заключенной в ядре атома алюминия.

Почему при раскалывании атомного ядра может выделяться энергия? Точное взвешивание показало, что масса атомного ядра меньше, чем сумма масс, входящих в ядро протонов и нейтронов. Имеется эффект „упаковки“, за счет которого при соединении протонов и нейтронов в одно ядро исчезает часть массы. Исчезнувшая масса\* (истинный дефект массы) невелика и составляет доли процента от всей массы ядра.

Однако, согласно формуле Эйнштейна, исчезнувшей массе соответствует выделившаяся при образовании ядра огромная энергия, равная  $m \cdot 9 \cdot 10^{20}$ . Один килограмм исчезнувшей массы превращается в  $9 \cdot 10^{23}$  erg, т. е. в 25 млрд. kWh энергии.

Теперь представим себе, что, раскалывая ядро атома с меньшим „дефектом“ массы, мы получили два ядра с большими „дефектами“ массы. Иными словами, тяжелое „рыхлое“ ядро развалилось на два более прочных, лучше „упакованных“ ядра. Ясно, что разность „истинных дефектов“ масс исходного ядра и ядер, получившихся в результате расщепления, умноженная на  $9 \cdot 10^{20}$ , даст выделившуюся при этом энергию. Вот откуда взялась энергия, выделившаяся в опытах Резерфорда. Масса превратилась в энергию. То, в чем сомневался сам Эйнштейн, произошло.

С точки зрения физика задача искусственного превращения массы в энергию была решена таким образом почти 30 лет назад. Но до практического решения задачи было еще очень далеко. Достаточно сказать, что из 100 тыс. ядер гелия, выпущенных при обстреле ядра алюминия, только один снаряд попадал в цель. Ясно, что при такой меткости стрельбы терялся весь выигрыш энергии, получающийся при удачном попадании снаряда.

Более 20 лет напряженной работы физиков ушло на нахождение подходящей мишени и подходящего снаряда для обстрела атомного ядра.

Бэкону Веруламскому принадлежат слова, немного обидные для физиков: „Человек ничего другого не может делать, как сближать и удалять тела, остальное делает природа“. При бомбардировке атомного ядра мы тоже имели дело только со сближением тел. Но если вспомнить, что плотность вещества в ядре достигает  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>, тогда как плотность стали  $10$  g/cm<sup>3</sup>, и что снаряд все-таки должен проникнуть внутрь ядра, то станет ясна сложность задачи. К этому надо добавить, что положительно заряженный снаряд будет отталкиваться положительным зарядом ядра.

Наиболее подходящим снарядом для бомбардировки ядра оказался нейтрон. Выше было отмечено, что нейтроны не имеют заряда. Вместе с тем они достаточно массивны для бомбардировки ядер.

\* Примечание. Все термины здесь применяются в более прямом смысле, чем это принято в специальной литературе.

При выборе объекта для бомбардировки пришлось руководствоваться двумя соображениями. Прежде всего ядро должно быть достаточно „рыхлым“, т. е. обладать маленьким „дефектом“ массы. Во-вторых, при расщеплении должны возникать не только новые ядра, но и новые нейтроны. Без этого ведь не может образоваться *цепной развал ядер*, аналогичный горению. Наоборот, если число новых нейтронов будет превышать число нейтронов, вызвавших расщепление, реакция будет развиваться и может произойти взрыв. Удачная комбинация была обнаружена случайно. Оказалось, что при бомбардировке нейтронами последнего элемента менделеевской таблицы — урана возникают как раз нужные условия.

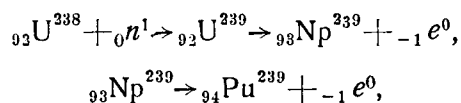
При расщеплении *изотопа урана* с атомным весом 235 (U-235) получаются атомы *бария* и *криптона* с хорошо упакованными ядрами и один—три новых нейтрона. По сообщениям американцев масса продуктов расщепления на одну тысячную меньше исходной массы. Следовательно, согласно формуле Эйнштейна *расщепление одного килограмма U-235 дает „всего лишь“ 25 млн. kWh энергии*. Эта энергия получается в виде кинетической энергии частиц, возникающих при развале ядра.

Бор дал очень наглядную модель ядра как положительно заряженной капли. На основании этой модели можно себе представить протекание процесса деления ядра и становится ясным возникновение больших скоростей у продуктов деления. Когда нейтрон попадает в каплю—ядро, она начинает дрожать и в ней возникает колебание. „Остальное делает природа“. Образуется перетяжка и капля делится на две меньшие капельки. Обе капельки заряжены положительно и находятся на исчезающе малом расстоянии друг от друга—порядка  $10^{-12}$  см. Ясно, что под действием кулоновых сил отталкивания, возникающих между зарядами одинакового знака, эти частицы разлетятся с огромной скоростью в противоположные стороны. Энергия поступательного движения этих частиц при соударениях с атомами вещества быстро превратится в тепло. Таким образом, теплотворная способность килограмма U-235 равна  $2,5 \cdot 10^7$  kWh, что, к слову сказать, соответствует оценке, сделанной на основании соотношения неопределенностей.

Нетрудно видеть, что при заданном положительном заряде исходного ядра наибольшие силы отталкивания возникнут при делении этого заряда как раз пополам. При этом из ядра урана получатся ядра элементов, соответствующих примерно середине менделеевской таблицы. Атомный номер бария 56, а криптона 36 ( $36 + 56 = 92$ —атомный номер урана). У таких элементов абсолютный „дефект“ массы наибольший, т. е. „упаковка“ ядер наиболее компактная.

В ряде американских журналов, в сентябрьских номерах за прошлый год, появилась официальная информация о возможностях мирного применения ядерной энергии. В этой информа-

ции дано некоторое представление о трудностях проблемы и даже дана оценка экономической стороны дела. Первая трудность заключается в том, что изотоп урана U-235 составляет только 0,7% в обычном металлическом уране. Основной изотоп U-238 составляет 99,3%. Основной изотоп U-238 не только не разрушается нейтронами, но перехватывает их и тем самым мешает делению более легкого изотопа U-235. Атом урана U-238, поймавший нейтрон, превращается в нестабильный изотоп урана U-239. В ядре этого изотопа нейтрон превращается в протон, причем ядро испускает электрон. Возникает новый элемент *нептуний* Np-239. Этот элемент также живет недолго, еще один нейтрон превращается в протон и испускается еще один электрон. В результате возникает уже стабильный новый элемент—*плутоний* Pu-239. Схема получения плутония может быть записана в виде двух уравнений:



где  ${}_0n^1$ —символ нейтрона—заряд—0, масса—1;  ${}_{-1}e^0$ —символ электрона—заряд—1, масса практически—0.

Создав плутоний, человек впервые вышел за пределы менделеевской таблицы элементов. Судя по опубликованным данным, плутоний может быть применен наряду с легким изотопом урана U-235.

При использовании легкого изотопа урана возникает очень сложная проблема выделения этого изотопа. Ведь разность атомных весов изотопов урана составляет немногим больше 1%, а как всякие изотопы, они химически не различаются. Все способы разделения изотопов (диффузии, центрифугирование, масспектрограф) используют только различие в атомных весах.

Иное дело плутоний—это элемент, химически отличный от урана. Его отделение не должно представлять таких затруднений. При использовании урана хотя бы и с обогащенным содержанием легкого изотопа приходится применять специальные замедлители для нейтронов. Медленные нейтроны чаще разрушают легкий изотоп, чем захватываются тяжелым изотопом. Для быстрых нейтронов существует обратное соотношение. Наиболее эффективным замедлителем нейтронов является тяжелая вода. Важно, чтобы замедлитель слабо поглощал нейтроны. Несколько худшим, но вполне удовлетворительным замедлителем нейтронов служит очень чистый графит. Большое преимущество графита состоит в его дешевизне по сравнению с тяжелой водой.

Окончательно ядерный генератор тепла имеет вид решетки, в которой чередуются слои урана, запаянного в алюминиевые коробки (защита от коррозии) и слои графита. Слоистое расположение эффективнее, чем образование смеси из урана и графита. Между слоями урана и графита оставлены небольшие зазоры, где прохо-

дит либо воздух, либо вода. Вся эта решетка заключена в коробку с толстыми стенками, защищающими окружающих людей от очень сильного радиоактивного излучения. На дне коробки установлен источник нейтронов, служащий как бы запалом. Таким запалом может служить ячейка из радия и бериллия. Воздух или вода, проходя сквозь такую коробку, будут нагреваться за счет энергии ядерного расщепления. Неблагоприятным моментом является невозможность получения высоких температур. При высоких температурах скорости нейтронов возрастают и их эффективность падает, расщепление атомов замедляется. Вместе с тем известно, что в теплотехнике часто выгодно применять высокие температуры.

Оценивая ближайшие практические перспективы мирного использования ядерной энергии, американцы пишут, что четыре следующих утверждения *неверны*:

1. Уголь скоро будет применяться только как сырье в химической промышленности.

2. Через несколько лет тонкая пластинка урана, вставленная на заводе в автомобиль, будет двигать его в течение всего срока службы.

3. Все большие центральные электрические станции скоро перейдут на использование энергии атомного ядра.

4. Дешевая ядерная энергия необычайно снизит стоимость эксплуатации всех силовых установок.

По поводу последнего пункта отмечается, что стоимость топлива составляет только 17% от стоимости электроэнергии. Но в противовес указывается, что все же следует помнить о таких фактах:

1. В больших масштабах было продемонстрировано контролируемое (без взрыва) получение тепловой энергии с помощью легкого изотопа урана.

2. Без сомнения, эта энергия может быть применена для нагрева воды или воздуха и для получения пара.

3. Такое тепло может быть либо использовано непосредственно, либо превращено в механическую или электрическую энергию при помощи паровых и газовых турбин.

4. Если легкий изотоп урана в концентрациях до 10% будет стоить дешевле 55 000 долларов за килограмм, то он найдет себе применение, но будет конкурировать сначала с первосортными топливами (бензин), а не с углем.

По поводу последнего пункта делается примечание — при прочих равных условиях. Что это значит, неясно. Надо думать, наоборот, никаких равных условий нет и что использование ядерной энергии должно открыть принципиально новые пути для техники.

Первую попытку непосредственного превращения ядерной энергии в электрическую сделали два молодых советских ученых — научные сотрудники ВЭИ Лобанев и Беляков. Сообщение об этом было опубликовано в „Докладах Академии наук СССР“ за 1945 г.

Когда Эйнштейна спросили в свое время, что принесет человечеству практическое использование его формулы, он сказал: „Допустим, в самом деле, что нашли бы средства освободить все это необъятное количество энергии — это только привело бы нас к такому веку, в сравнении с которым наша черная угольная современность показалась бы золотой“. Эйнштейн имел при этом перед глазами весь капиталистический строй с его вопиющими противоречиями.

В плановом социалистическом хозяйстве Советского Союза ядерная энергия найдет свое плодотворное и гармоничное применение, ибо у нас нет противоречия между ростом производительных сил и производственными отношениями людей.



# К вопросу об измерении расстояния от земли до луны с помощью электромагнитных волн

Академик Н. Д. ПАПАЛЕКСИ

Физический институт им. Лебдева Академии наук СССР

Вряд ли можно сомневаться в том, что вопрос о расстоянии от земли до небесных светил и в первую очередь до солнца и луны живо интересовал человека уже с самого зарождения культуры. Насколько известно, первые попытки измерить расстояние до луны были сделаны еще в третьем веке до нашей эры греческим

астрономом Аристархом. Примерно через 100 лет после него знаменитый астроном древности Гиппарх измерил расстояние до луны с огромной для того времени точностью, получив при этом значение, близкое к действительному, что ознаменовало собой существенный этап в развитии наших знаний о вселенной.

Как известно, современные астрономические методы определения расстояния до луны основаны на измерении горизонтального экваториального параллакса ее, т. е. угла, под которым видна с луны большая полусфера геоида. Для этой цели применяется тригонометрический метод, который принципиально заключается в одновременном измерении углов, под которыми видна какая-нибудь определенная точка луны (например, вершина определенной горы) из двух земных пунктов, достаточно удаленных друг от друга и расстояние между которыми точно известно. Так, в одном из первых точных определений расстояния до луны, произведенного в середине 18 века французскими астрономами Лаландом и Лакайлем, первый производил измерения в Берлине, а второй на расстоянии в 10 000 км от него на мысе Доброй Надежды. Так как луна совершает движение вокруг земли приблизительно по эллиптической орбите, эксцентриситет которой в предположении невозмущенного ее движения равен  $\epsilon = 0,0549$ , то расстояние ее до центра земли не остается постоянным, а изменяется в пределах от 356 000 км до 407 000 км. За расстояние до луны в астрономии принято некоторое среднее его значение  $\Delta_c$ , которое на основании многочисленных наблюдений в настоящее время считается рав-

*Достижения последних лет в области генерации мощных микрорадиоволн и концентрации их в тонкие направленные пучки огромной мгновенной мощности обусловили поразительные успехи радиолокации, сыгравшей выдающуюся роль во второй мировой войне. Современное состояние импульсной радиотехники сделало возможным осуществление отражения электромагнитных волн от луны и создание нового точного радиолокационного метода определения расстояния до луны, что представляет большой научный интерес. Статья, содержащая краткое изложение расчетов, связанных с обоснованием этого нового метода, является докладом, который был сделан автором в Физическом институте им. Лебедева 1 февраля 1946 г.*

ным в круглых цифрах 384 400 км в соответствии с величиной лунного параллакса, равного  $\pi_c = 57' 2''{,}7$ . Точность определения  $\Delta_c$  можно оценить в  $1/30\,000$ . Это дает уверенность в расстоянии до луны порядка 10—15 км.

Ввиду такой большой точности, достигнутой астрономами, может воз-

никнуть вопрос, есть ли необходимость в новых методах определения расстояния до луны и какой они могут представить интерес. Ясно прежде всего, что всякая возможность дальнейшего повышения точности определения расстояния до луны уже представляет интерес для теоретической астрономии. Нет сомнения также в том, что особую ценность представил бы метод, позволяющий быстро определять из одного пункта расстояние до луны и непрерывно следить за его изменением во времени. Дело в том, что достигаемая в настоящее время высокая астрономическая точность получается в результате многочисленных наблюдений, требующих благоприятных атмосферных условий и связанных с измерениями из двух пунктов, расположенных примерно на одном меридиане на огромном расстоянии друг от друга (чаще всего в разных государствах), а также с сложными вычислениями и учетом многочисленных поправок. Поэтому разработка новых точных и в то же время более простых методов определения расстояния до луны из одного пункта, несомненно, представляет не только, а бы сказал, „спортивный“, но и большой научный интерес.

Такими многообещающими представляются методы, основанные на осуществлении отражения электромагнитных волн от поверхности луны и измерении времени их пробега до луны и обратно.

Нет сомнения в том, что идея о возможности осуществления отражения световых волн от поверхности луны возникла у астрономов и оптиков уже давно. Однако, простые расчеты показывали, что существовавшие в то время тех-

вические средства были недостаточны не только для осуществления заметного на земле отражения от луны, но и для сигнализации на луну. Даже современный мощный прожектор силой в миллиарды свечей был бы с земли заметен на луне лишь как звезда шестой величины. Не нова также и идея осуществления отражения радиоволн от луны. Она, несомненно, возникла у многих физиков и радиоспециалистов, особенно после появления импульсного метода, или так называемого „метода радиоэхо“, впервые примененного Брайтом и Тювом в 1925 г. для измерения высоты отражающих радиоволны слоев ионосферы. Так, наблюдавшие в 1928 г. известным норвежским исследователем полярных сияний Штермером и голландским радиофизиком Ван дер Полем радиоэхо с аномально большими запаздываниями (от 1—2 до 30 sec) вызвали у многих радиоспециалистов предположение о том, что эти „космические“ радиоэхо обязаны своим происхождением отражению радиоволн от поверхности луны. Однако, элементарные подсчеты (такие подсчеты были тогда же сделаны и у нас акад. Л. И. Мандельштамом и автором) показали, что при существовавших в то время радиотехнических средствах, как передающих, так и приемных, не могло быть и речи об отражении от луны. Идея об отражении радиоволн от луны высказывалась неоднократно и позднее, однако для ее осуществления до самого последнего времени не было достаточных технических предпосылок. Эти предпосылки были созданы в последние годы исключительным прогрессом как в области генерации мощных микрорadiоволн, которые проходят через ионосферу, не отражаясь, так и в технике концентрации их в тонкие направленные пучки огромной мгновенной мощности, что и обусловило поразительные успехи радиолокации, сыгравшей такую выдающуюся роль во второй мировой войне.

Проведенные нами еще в 1943 г. первые подсчеты показали, что современное состояние импульсной радиотехники сделало возможным осуществление отражения радиоволн от луны, а дальнейшие расчеты подтвердили наши предположения о том, что это может быть использовано для создания нового точного метода определения расстояния до луны. По данным американских журналов точность определения расстояния до земных объектов методом радиолокации в условиях прямой видимости выражается десятками метров и, следовательно, можно рассчитывать, что точность измерения расстояния до луны методом радиоэхо, несомненно, превысит астрономическую. Кроме того, метод радиоэхо обладает еще рядом других преимуществ: простота и быстрота измерений, возможность измерять непосредственно и притом непрерывно расстояние до луны от определенного пункта на земле и др. Следует заметить, что в методе радиоэхо расстояние получается умножением измеренного времени запаздывания на величину скорости распространения радиоволн, которая при беспрепятственном распространении в вакууме равна скорости света, т. е. 299 796 км/сек,

и в настоящее время известна с точностью до одной стотысячной. Развитие этого метода с целью дальнейшего повышения его точности повлечет за собой необходимость в более точном измерении скорости распространения радиоволн.

Согласно американским сообщениям, в Северной Америке с помощью специально переоборудованной радиолокационной аппаратуры 10 января с. г. были проведены первые успешные опыты по осуществлению отражения радиоволн от луны, которые дали для времени запаздывания радиоэхо, как и следовало ожидать, около  $2\frac{1}{2}$  sec. Таким образом, экспериментально доказана возможность получения с помощью современных технических средств достаточной мощности для измерений отраженных от луны радиоволн и тем самым подтверждена правильность проведенных нами расчетов. Предметом моего сообщения и является краткое изложение этих расчетов. При рассмотрении вопроса об отражении от луны радиоимпульсов у меня, естественно, возникло желание проанализировать также и возможность осуществления современными техническими средствами отражения световых импульсов. В своем сообщении коснусь и этого вопроса.

**Отражение импульса электромагнитных волн от луны.** Для того, чтобы сформулировать математически задачу отражения электромагнитных волн от поверхности луны, необходимо прежде всего задаться определенной идеализацией свойств этой поверхности. Из данных астрофизики следует, что поверхность луны отнюдь нельзя считать гладкой. Необходимо, наоборот, предположить ее весьма неровной и изрезанной; она, по видимому, в значительной части состоит из пористых пород и покрыта вулканическим пеплом и космической пылью. Таким образом, нельзя предполагать, что от поверхности луны в целом кроме отдельных небольших участков возможны регулярные отражения как световых волн, так и радиомикроволн. Ее, несомненно, правильнее рассматривать как „шероховатую“ в оптическом смысле. Поэтому в качестве возможной идеализации, дающей скорее преуменьшение оценки отраженной мощности, можно принять, что к поверхности луны, которую мы будем считать шаром, применим закон Ламберта<sup>1</sup>. Тогда нашу задачу можно сформулировать следующим образом: пусть импульс электромагнитных волн произвольной формы продолжительностью  $\tau$  и мощности  $P$ , сосредоточенный в телесном угле  $\Omega$ , падает на сферу радиуса  $R$  с идеально шероховатой поверхностью, удаленной от источника излучения на расстояние  $D$  и обладающей коэффициентом отражения  $\sigma$ . Требуется найти зависимость от времени плотности потока мощности,

<sup>1</sup> Действительное, приблизительно равномерное, распределение яркости по диску луны не полностью соответствует этому предположению, а здесь скорее можно считать, что не яркость, а сила отраженного света не зависит от угла наблюдения, т. е., что здесь скорее применима формула Ломмеля—Зеелигера. Результаты, получаемые при этом предположении, приводятся ниже.



возвращающегося обратно к источнику излучения после отражения от сферы. При этом предполагается, что коэффициент пропускания (прозрачности) излучения на пути от источника к сфере равен  $\beta$ .

Рассмотрим сначала случай, когда импульс имеет прямоугольную форму и толщина его  $\Delta b = c\Delta\tau$  очень мала по сравнению с  $R$ . В случае луны это условие можно считать практически выполненным, если длительность импульса  $\Delta\tau$  порядка  $10^{-5}$  сек и меньше.

Как видно из рис. 1, падающие на сферу волны последовательно рассеиваются от различных сферических колец, вследствие чего импульс после отражения растягивается на длину, равную диаметру сферы, если телесный угол  $\Omega$  равен или больше угла  $\Omega_0$  под которым видна сфера, и на соответственно меньшую длину, если  $\Omega < \Omega_0$ . Так как площадь кольца  $\Delta S_\vartheta$ , соответствующая центральному углу  $\vartheta$  (рис. 1), равна

$$\Delta S_\vartheta = 2\pi R \sin \vartheta \cdot R \Delta\vartheta = 2\pi R \Delta b, \quad (1)$$

то  $\Delta S_\vartheta$  не зависит от  $\vartheta$ . Телесный угол  $\Delta\Omega_\vartheta$ , под которым видна площадь  $\Delta S_\vartheta$  из источника излучения, равен

$$\Delta\Omega_\vartheta = \frac{\Delta S_\vartheta \cdot \cos \vartheta}{D^2}. \quad (2)$$

Введя понятие силы излучения  $J$ , соответствующее силе света в оптике, и принимая во внимание, что коэффициент пропускания равен  $\beta$ , получаем для потока мощности  $\Delta P_\vartheta$ , падающего на поверхность  $\Delta S_\vartheta$ :

$$\Delta P_\vartheta = \beta J \cos \vartheta \frac{\Delta S_\vartheta}{D^2}, \quad (3)$$

а для рассеянного от  $\Delta S_\vartheta$  потока мощности:

$$\Delta P'_\vartheta = \varepsilon \Delta P_\vartheta = \varepsilon \beta J \cos \vartheta \frac{\Delta S_\vartheta}{D^2}. \quad (4)$$

так как яркость  $B'$  излучения от поверхности  $\Delta S_\vartheta$  связана с  $\Delta P'_\vartheta$  соотношением<sup>2</sup>:

$$\pi B' \Delta S_\vartheta = \Delta P'_\vartheta \quad (5)$$

<sup>2</sup> В случае диффузного отражения не по закону Ламберта, т. е. когда  $J' = \text{const}$ , а не  $B'$ , мы имеем:

$$B' = \frac{\beta \varepsilon}{2\pi} \frac{J}{D^2},$$

а вместо (7):

$$J'_\vartheta = \frac{\varepsilon \beta}{2\pi} \frac{J \cos \vartheta}{D^2} \Delta S_\vartheta,$$

откуда

$$p'(t) = \varepsilon \beta^2 \frac{Jb}{D^4} R \left(1 - \frac{ct}{2R}\right). \quad (10')$$

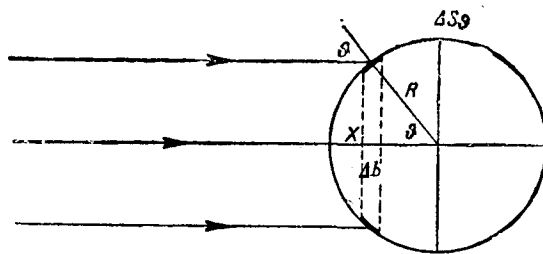


Рис. 1.

и, с другой стороны, мы имеем между  $B'$  и силой излучения  $J'$  поверхности  $\Delta S_\vartheta$  в направлении  $\vartheta$  к ее нормали следующую зависимость:

$$J'_\vartheta = B' \cos \vartheta \Delta S_\vartheta, \quad (6)$$

то на основании (4), (5) и (3) получаем:

$$J'_\vartheta = \frac{\varepsilon \beta}{\pi} \frac{J \cos^2 \vartheta}{D^2} \Delta S_\vartheta. \quad (7)$$

Отсюда получаем для плотности  $p'$  отраженного от потока мощности в месте источника излучения (на земле):

$$p' = \frac{\Delta J'_\vartheta}{\Delta S} = \frac{\varepsilon \beta^2}{\pi} \frac{J}{D^4} \Delta S_\vartheta \cos^2 \vartheta. \quad (8)$$

Подставляя в это выражение значение  $\Delta S_\vartheta$  из (1)

и принимая во внимание, что  $\cos \vartheta = \frac{R-x}{x}$  (рис. 1), получаем:

$$p' = \varepsilon \beta^2 \frac{J}{D^4} 2\Delta b R \left(1 - \frac{x}{R}\right)^2. \quad (9)$$

Если считать время от момента падения импульса на верхушку сферы (луны),  $x = \frac{c}{2}t$ , где  $c$  — скорость электромагнитных волн, то мы имеем следующую зависимость плотности отраженного потока мощности от времени:

$$p'(t) = \varepsilon \beta^2 \frac{J\Delta b}{D^4} 2k \left(1 - \frac{ct}{2R}\right)^2. \quad (10)$$

Здесь  $t$  должно удовлетворять условию:

$$0 \leq t \leq \frac{2R}{c}, \text{ если } \Omega \geq \Omega_0, \quad (10_1)$$

и

$$0 \leq t \leq \frac{2m}{c}, \text{ если } \Omega < \Omega_0. \quad (10_2)$$

$m$  (рис. 1) определяется из:

$$m = R - \sqrt{R^2 - \frac{\Omega}{\pi} D^2} = \frac{D}{\sqrt{\pi}} \left[ \sqrt{\Omega_0} - \sqrt{\Omega_0 - \Omega} \right]. \quad (11)$$



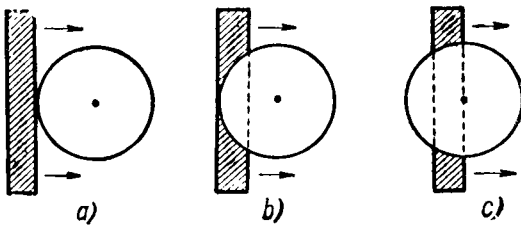


Рис. 2.

*a* — начало первой фазы (первый контакт); *b* — начало второй фазы (второй контакт); *c* — начало третьей фазы (прохождение через центр).

Пользуясь формулой (9), можно легко рассчитать и случай импульса сравнимой с *R* толщины *b*. В самом деле, полагая  $\Delta b = dx$  и для упрощения записи  $\sigma_3^2 \frac{J}{D^4} 2R = A$ , мы, очевидно, получим:

$$p' = A \int_{x_1}^{x_2} \left(1 - \frac{x}{R}\right)^3 dx, \quad (12)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  имеют различные значения в зависимости от положений импульса относительно сферы (рис. 2), которые мы для краткости будем обозначать как его фазы. В первой фазе, которая простирается от момента соприкосновения передней плоскости импульса со сферой до момента соприкосновения его задней плоскости,  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = \frac{ct}{2}$ ; во второй фазе, которая длится до момента перехода передней плоскости импульса через центр сферы,  $x_1 = \frac{ct - 2b}{2}$ ,  $x_2 = \frac{ct}{2}$  и, наконец, в третьей фазе:  $x_1 = \frac{ct - 2b}{2}$ ,  $x_2 = R$ . Таким образом, имеем:

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ 1 - \left(1 - \frac{ct}{2R}\right)^3 \right], & 0 \leq t \leq \frac{2b}{c}, \\ p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ \left(1 - \frac{ct - 2b}{2R}\right)^3 - \left(1 - \frac{ct}{2R}\right)^3 \right], & \frac{2b}{c} \leq t \leq \frac{2R}{c}, \end{aligned} \right\} (13)$$

$$p'(t) = \frac{AR}{3} \left[ 1 - \left(1 - \frac{ct - 2b}{2R}\right)^3 \right], \quad \frac{2R}{c} \leq t \leq \frac{2(R+b)}{c}.$$

Формулы (13) показывают, как изменяются после отражения форма и интенсивность импульса толщины *b*, если  $\Omega \geq \Omega_0$ . Легко видеть, что в случае  $\Omega < \Omega_0$  мы будем иметь для отраженного импульса следующие формулы:

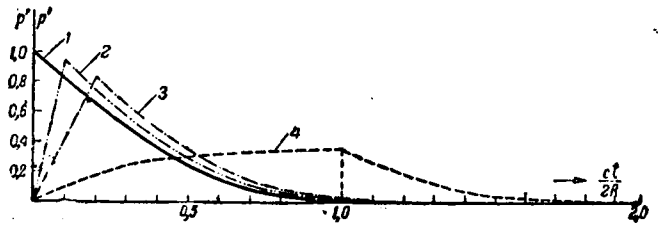


Рис. 3. Форма импульса после отражения от луны. 1 — толщина импульса очень мала по сравнению с *R*; 2, 3, 4 — толщина равна соответственно 0,1*R*, 0,2*R* и *R*.

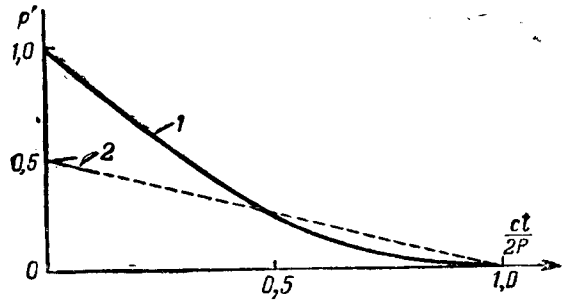


Рис. 4. Форма импульса после отражения. — в случае отражения по закону Ламберта; 2 — в случае  $J = \text{const}$  [формула (10)].

в случае  $b \leq m$

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ 1 - \left(1 - \frac{ct}{2R}\right)^3 \right], & 0 \leq t \leq \frac{2b}{c}, \\ p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ \left(1 - \frac{ct - 2b}{2R}\right)^3 - \left(1 - \frac{ct}{2R}\right)^3 \right], & \frac{2b}{c} \leq t \leq \frac{2m}{c}, \\ p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ \left(1 - \frac{ct - 2b}{2R}\right)^3 - \left(1 - \frac{m}{R}\right)^3 \right], & \frac{2m}{c} \leq t \leq \frac{2(m+b)}{c}; \end{aligned} \right\} (14)$$

в случае  $b > m$

$$\left. \begin{aligned} p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ 1 - \left(1 - \frac{ct}{2R}\right)^3 \right], & 0 \leq t \leq \frac{2m}{c}, \\ p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ 1 - \left(1 - \frac{m}{R}\right)^3 \right], & \frac{2m}{c} \leq t \leq \frac{2b}{c}, \\ p'(t) &= \frac{AR}{3} \left[ \left(1 - \frac{ct - 2b}{2R}\right)^3 - \left(1 - \frac{m}{R}\right)^3 \right], & \frac{2b}{c} \leq t \leq \frac{2(b+m)}{c}. \end{aligned} \right\} (15)$$

На рис. 3 и 4 изображено изменение после отражения формы прямоугольных импульсов различной толщины *b* при условии, что общая энергия падающего на сферу импульса одна и та же, т. е.  $J\tau = \frac{Jb}{c}$  или, что то же,  $Ab = \text{const}$ .

Как видно из рис. 3, чем короче импульс, тем резче (круче) поднимается фронт отраженного импульса и тем больше максимальная плотность его мощности («освещенность») в месте излуче-

ния на земле. Для  $b \ll R$  ( $b$  порядка нескольких километров и короче в случае отражения от луны) форма импульса передается формулой (10), а максимальная плотность отраженной мощности выразится как

$$p'_m = \sigma\beta^2 \frac{Jb}{D^4} 2R = \frac{\sigma\beta^2}{\pi} \frac{W}{D^3} \frac{2c}{R} \frac{\Omega_0}{\Omega}, \quad \Omega_0 \leq \Omega, \quad (16)$$

где  $W$  — общая энергия импульса.

Интересно отметить, что величина  $w'$  плотности всей энергии импульса, отраженной от сферы в направлении падения его, равна <sup>3</sup>:

$$w' = \frac{4}{3} \frac{\sigma\beta^2}{\pi} \cdot \frac{W}{D^3} \frac{\Omega_0}{\Omega}. \quad (17)$$

Формулы (16) и (17) и могут быть положены в основу оценки мощности импульса электромагнитных волн, которая необходима для того, чтобы его можно было обнаружить на земле после отражения от луны. Для этой цели можно применить как радиомикроволны (метрового диапазона и короче), так и видимый свет. Ввиду особенностей, присущих как условиям осуществления мощных импульсов электромагнитного излучения каждого рода, так и условиям приема их после отражения, целесообразно рассмотреть отдельно случаи применения радиоволн и видимого света.

**Применение радиоволн.** Для оценки требуемой величины мощности излучения необходимо исходить из минимальной величины отраженной от луны плотности излучения  $p'$ , которая может быть уверенно зарегистрирована на земле. Так как

$$p' = \frac{cE^2}{4\pi}, \quad (18)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля волны, то, задавшись необходимой для приема напряженностью поля, мы из (18) получим требуемое значение  $p'$ . При этом следует принять во внимание, что вследствие полной деполяризации излучения при отражении от идеально-шероховатой поверхности мы в случае обычного дипольного приема должны, очевидно, положить  $E^2 = 2E_1^2$ , где  $E_1$  необходимая для приема сила поля. Принимая это во внимание, получаем, исходя из (18), следующее выражение для  $E_1$ :

$$\left[ E_1, \frac{\text{mV}}{\text{m}} \right]^2 = 60 \pi \cdot 10^6 p' \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]. \quad (19)$$

Если принять, что для уверенного приема необходимо иметь напряженность поля не меньше  $0,02 \frac{\text{mV}}{\text{m}}$ , то из (19) получаем, что для этого потребуется, чтобы  $p' = 2,1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . В наших расчетах мы и будем исходить из этой величины.

<sup>3</sup> Заметим также, что от формулы (17) практически мало отличается (17<sub>1</sub>), получаемая в случае  $J' = \text{const}$ :

$$w' = \frac{\sigma\beta^2}{\pi} \cdot \frac{W}{D^2} \cdot \frac{\Omega_0}{\Omega}. \quad (17_1)$$

Из формулы (16), которую мы можем переписать в виде:

$$W = \frac{\pi}{\sigma\beta^2} D^3 \frac{R}{2c} \frac{\Omega}{\Omega_0} p'_m, \quad (20)$$

видно, что  $W$  существенно зависит от  $\sigma\beta^2$ . Величину  $\sigma$  для света можно на основании астрономических наблюдений положить равной 0,07. Если принять во внимание, что значительная часть поверхности луны покрыта вулканическим пеплом и космической пылью, то нужно думать, что для микроволн порядка дециметров величина  $\sigma$  будет скорее больше. Мы примем  $\sigma = 0,1$ . Что же касается величины  $\beta$ , то для света она сильно зависит от  $\lambda$ . Согласно формуле Буге  $J = J_0 u^\mu$ , где  $\mu$  — масса атмосферы, пройденная лучами и отнесенная к массе, проходимой при вертикальном направлении луча, а  $u$  — коэффициент прозрачности. О зависимости от зенитного угла  $\zeta$  можно судить по следующей таблице (Бемпорад) [Л. 1]:

Таблица 1

$\zeta$	0°	20°	40°	60°	75°	85°	90°
$\mu$	1,00	1,06	1,30	2,00	3,32	10,40	35,40

Величина же  $u$  зависит от  $\lambda$  следующим образом:

Таблица 2

$\lambda$ в $\mu$ (микронах)	0,40	0,50	0,70	1,0	2,0
$u$	0,535	0,704	0,838	0,901	0,909

Приведем также, что из наблюдений над яркостью звезд для  $u$  получается в среднем значение 0,83. Все эти данные позволяют считать, что мы не сделаем ошибки в сторону преувеличения, если положим, что для радиомикроволн  $\beta^2 = u^{2\mu}$  не меньше 0,8 при  $\zeta \leq 40^\circ$ . Таким образом, полагая  $\frac{1}{\sigma\beta^2} = 15$ , мы вряд ли сделаем слишком оптимистическую оценку. Подставляя теперь это значение  $\frac{1}{\sigma\beta^2}$  в (20) и принимая во внимание, что для луны в круглых цифрах  $D^2 = 15 \cdot 10^{16} \text{ m}^2$ ,  $R = 1,75 \cdot 10^6 \text{ m}$ , получаем:

$$W = 43,3 \frac{\Omega}{\Omega_0} [\text{kJ}].$$

При продолжительности импульса  $\tau = 10^{-5} \text{ sec}$  это дает для мощности  $p = 4 \cdot 33 \cdot 10^6 \frac{\Omega}{\Omega_0} \text{ kW}$ , т. е.

величину, для радиомикроволн явно неосуществимую при достижимых в настоящее время величинах  $\frac{\Omega}{\Omega_0}$ . Таким образом, задача осуществления

отражения радиоволн от луны, которое можно было бы с уверенностью измерить на земле, была бы неразрешима, если бы мы не обладали в настоящее время средствами, позволяющими концентрировать падающую на землю излучение радиомикроволн в тысячи раз. Если положить коэффициент концентрации мощности  $g$  равным 5 000, то тогда будем иметь:

$$W = 8,55 \frac{\Omega}{\Omega_0} \text{ [J]}$$

или при продолжительности импульса  $\tau = 10^{-5}$  sec

$$P = 855 \frac{\Omega}{\Omega_0} \text{ kW,}$$

что при экспериментально достижимых значениях  $\frac{\Omega}{\Omega_0}$  вполне осуществимо.

Из приведенной нами оценки величины мощности, требуемой для осуществления отражения радиоволн от луны, ясно, что главная задача здесь заключается не в получении импульсов достаточной мощности, а в возможности, с одной стороны, сконцентрировать излучаемую мощность в достаточно малом телесном угле и, с другой стороны, собрать с возможно большей площади мощность, падающую на землю после отражения. Эти задачи в настоящее время технически вполне разрешимы, что полностью подтверждается упомянутыми выше первыми успешными опытами по осуществлению отражения радиоволн от луны, проведенными в январе с. г. в Северной Америке\*.

**Случай световых волн.** В отличие от рассмотренного выше случая радиоволн задача осуществления отражения от луны световых лучей имеет одну существенную особенность. В то время, как для радиоволн мы при оценке плотности мощности падающего на землю от луны излучения исходили только из чувствительности приемной аппаратуры, в случае световых волн мы должны иметь в виду еще ту освещенность, которую создает на земле либо луна (ночью), либо солнце (днем или вечером). Кроме того, здесь возможны принципиально два различных по чувствительности способа обнаружения световых волн: субъективный — помощью зрения и объективный — с помощью фотоэлемента.

Рассмотрим сначала вопрос о минимальной  $p_0$ , требуемой для уверенного обнаружения на земле светового отражения от луны. Как известно, порог видимости для белого света соответствует примерно освещенности в  $10^{-9}$  lx или в энергетических единицах плотности светового потока около  $2 \cdot 10^{-13}$  W/m<sup>2</sup>. Это дает для величины пороговой энергии от  $10^{-16}$  до  $5 \cdot 10^{-17}$  J. Порог чувствительности для фотоэлементов много больше. Если принять для порога чувствительности фотоэлемента величину, в 1 000 раз большую, то плотность светового потока  $p_0$ , необходимую для

уверенного приема световых волн с его помощью, можно взять порядка  $10^{-9} - 10^{-10}$  W/m<sup>2</sup>. Так как с помощью линз или зеркал можно увеличить приходящую после отражения световую мощность в  $g$  раз, то мы получаем для требуемой минимальной освещенности на поверхности земли:

$$p'_c = \frac{p_0}{g}.$$

Подставляя  $p'_c$  в (20), получаем для мощности  $P$  светового потока импульса выражение:

$$P = \frac{W}{\tau} = \frac{\pi}{2\beta^2} \cdot \frac{D^2 R}{b} \cdot \frac{p'_0}{g} \cdot \frac{\Omega}{\Omega_0}. \quad (21)$$

Это дает при различных предположениях относительно  $p_0$ ,  $g$  и  $\frac{\Omega}{\Omega_0}$  следующую таблицу:

Таблица 3

Значения $P$ (kW)			
$\Omega/\Omega_0$	$p_0$ $g$	$10^{-9}$ W/m <sup>2</sup>	$10^{-10}$ W/m <sup>2</sup>
		1,0	$10^4$
0,1	$10^4$	$4,8 \cdot 10^4$	4 800
1,0	$10^5$	$4,8 \cdot 10^4$	4 800
0,1	$10^5$	4 800	480

Как известно, при конденсированном мощном искровом разряде выделяемая в искре мощность может достигать сотен тысяч киловатт [Л. 4, 5, 6]. Примерно такие же мощности получают и при импульсном распылении проволок. Таким образом, как видно из табл. 3, при осуществлении достаточно большой концентрации как излучаемой мощности в очень узкий пучок, так и отраженной мощности с возможно большей площади действительно возможно получить отраженную от луны мощность световых волн, достаточную для приема их с помощью фотоэлементов. Однако, здесь, в отличие от случая применения радиомикроволн, когда чувствительность приема ограничивается в основном лишь собственными «шумами» радиоаппаратуры, задача приема отраженных от луны световых волн осложняется тем, что отраженный световой импульс должен быть выделен на фоне отраженного от луны солнечного света. Так как освещенность, создаваемая луной на земле, равна во время полнолуния  $0,21 \text{ lx} \approx 3 \cdot 10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>, тогда как  $p = 10^{-13}$  W/m<sup>2</sup> (при  $g = 10^{11}$ ), то это означает, что отраженный свет импульса составляет лишь  $3 \cdot 10^{-9}$  от постоянного лунного света и, казалось бы, уверенное обнаружение его должно быть сопряжено с огромными трудностями или даже просто невозможно. Однако, в действительности здесь дело обстоит не так плохо, так как опыт можно поставить во время полного лунного затмения<sup>4</sup>, когда освещенность от луны ослабевает в де-

\* Примечание к корректуре. Как видно из заметки, опубликованной в Science News Letters от 2 февраля 1946 г., при опытах для обнаружения радиозно от луны применялись радиоволны с частотой  $f = 1,12 \cdot 10^8$  Hz, причем длительность импульса доходила до 0,5 sec.

<sup>4</sup> На эту возможность было указано Е. Я. Богуславской.

сятки тысяч раз<sup>5</sup>. С другой стороны, ввиду сравнительной неизменности лунного света его действие можно в значительной степени скомпенсировать так, что освещенность от отраженного импульса можно будет сравнивать не с полной освещенностью от луны, а лишь с флуктуациями ее. Весьма эффективным средством для радикального ослабления лунного света является также применение обтюратора, открывающегося только на время прихода отраженного импульса. Оптимальный эффект при пользовании этим приемом получится тогда, когда время пропускания будет как раз равно длительности импульса, но даже если допустить, что оно будет превосходить длительность импульса в 10 раз (а это, вероятно, придется сделать из практических соображений), то и тогда при  $\Delta\tau = 10^{-5}$  sec освещенность, создаваемая луной, будет ослаблена в 10 000 раз, т. е. вместо светового фона в  $3 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup> мы будем иметь лишь  $3 \cdot 10^{-13}$  W/m<sup>2</sup>. Такого ослабления светового фона уже вполне достаточно для уверенной регистрации отраженного импульса. Следует заметить, что эффективное применение метода обтюратора существенно облегчается тем обстоятельством, что расстояние до луны известно с точностью до немногих десятков километров. При посылке весьма частых импульсов  $N$  раз в секунду метод обтюратора превращается в стробоскопический и его можно весьма эффективно соединить с выделением переменного тока, создаваемого импульсами, с помощью электрического резонанса.

Другое средство для выделения отраженного светового импульса заключается в посылке вместо «белых» «цветных» импульсов, содержащих лишь несколько отдельных линий спектра, как это, например, имеет место в искре. В этом случае разложение в спектр отраженного импульса может существенно помочь при его выделении. Применение комбинаций указанных средств (спектрального анализа с «стробоскопическим» методом с помощью обтюратора и использование резонанса) позволит, повидимому, разрешить задачу приема отраженных от луны световых

По любезному сообщению А. В. Маркова.

импульсов, во всяком случае во время полного лунного затмения.

В заключение я позволю себе сделать следующее замечание. Как известно из опубликованных в печати и по радио сообщений, взрыв атомной бомбы сопровождается вспышкой света гигантской интенсивности, во много раз превосходящей силу света солнца. Поэтому представлялось бы чрезвычайно интересным произвести наблюдения за луной во время взрывов атомных бомб, которые, вероятно, будут производиться с научными целями. Разумеется, что для этих наблюдений должны быть выбраны соответствующие пункты наблюдений и подходящее время.

Кроме того, одновременное измерение из одного пункта как радиоимпульсным методом, так и с помощью световых импульсов даст возможность произвести сравнение значений скорости распространения электромагнитных волн, полученных этими обоими методами. Наконец, изучение формы отраженных импульсов позволит судить о характере отражения от различных зон поверхности луны, что, несомненно, даст новый ценный материал о ее природе. Мне кажется, что необходимость разработки этих новых методов определения расстояния до луны, особенно метода «радиоэхо», не подлежит сомнению.

#### Литература

1. П. Н. Тверской. Курс геофизики, стр. 477—478, 1936.
2. Н. С. Хлебников. Электронные умножители. УФН XXIV, в. 3, стр. 370, 1940.
3. Л. А. Кубецкий. Изв. Акад. наук СССР, серия физ., VIII, стр. 357—365, № 6, 1944.
4. З. А. Бабушкин. Спектроскопия мощных разрядов. Изв. Акад. наук СССР, серия физ., IX, № 3, 1945.
5. К. С. Вульфсон. Об импульсном разряде в инертных газах. Изв. Акад. наук СССР, серия физ., IX, стр. 239, 1945.
6. И. С. Стекольников. Доклад, сделанный 18 марта 1946 г. на коллоквиуме в ФИАН.
7. И. С. Стекольников. Сверхмощный генератор импульсных токов. Электричество, № 3, 1946.



# Основные типы современных выключателей высокого напряжения

Доктор техн. наук, проф. А. Я. БУЙЛОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В области построения выключателей высокого напряжения наша электропромышленность недопустимо отстала от передовой техники. Начатые до войны и продолжающиеся в период войны работы по созданию новейших современных типов советских высоковольтных выключателей должны быть всемерно ускорены. В связи с этим представляется важной задачей правильно оценить достоинства и недостатки основных типов современных выключателей. Попытка такого критического анализа конструктивных принципов выключателей сделана ниже.

**Основные критерии выбора типа выключателя.** Современные высоковольтные выключатели можно разделить на следующие основные группы: 1) масляные многообъемные выключатели; 2) масляные малообъемные выключатели; 3) выключатели со сжатым воздухом; 4) прочие конструкции.

К четвертой группе, в частности, отнесены воздушные деионные выключатели, выключатели с твердым дугогасящим веществом, с магнитным дутьем и водяные выключатели. Данная группа выключателей не может конкурировать с первыми тремя во всем диапазоне рабочих напряжений и мощностей. Эти конструкции могут быть с успехом применены только в некоторых частных случаях эксплуатации выключателей при небольших мощностях или небольших сравнительно напряжениях. В данной статье остановимся поэтому только на первых трех группах.

Основные требования, предъявляемые к современному высоковольтному выключателю, следующие: 1) надежность работы; 2) быстродействие; 3) безопасность; 4) легкость ревизии и транспортабельность; 5) дешевизна в изготовлении и эксплуатации.

Первое требование — *надежность* — означает способность выключателя отключать все токи в диапазоне, ограниченном его предельным от-

*В новой пятилетке должно быть освоено и развито производство новейших, наиболее совершенных типов выключателей высокого напряжения. В свете этой задачи, а также главных требований, предъявляемых к выключателю, рассмотрены принципы устройства дугогасящих систем основных типов современных выключателей. Со всей очевидностью выявляются преимущества выключателей со сжатым воздухом. Отмечается необходимость дальнейшей разработки малообъемных масляных выключателей, которые могут быть использованы в ряде случаев. Особое внимание уделено выключателю со сжатым воздухом и шунтирующим сопротивлением. Статья является изложением доклада автора на научной сессии МЭИ в январе 1946 г.*

ключающим током. Первая и вторая группы выключателей удовлетворяют этому требованию: имеются типы многообъемных выключателей, отключающих очень большие токи, и нет оснований считать, что гарантия отключения ими малых токов является проблемой. Аналогичное можно утверждать относительно

малообъемных масляных выключателей, дугогасящая часть которых устроена по тому же принципу, что и многообъемных.

Выключатели со сжатым воздухом хорошо справляются с отключением больших токов, однако при отключении ими *малых токов* возможны перенапряжения. Этот вопрос должен быть еще исследован надлежащим образом. Косвенное суждение о возможности положительного решения вопроса о перенапряжениях при отключении малых токов можно сделать на основании прогрессирующего применения воздушных выключателей. Однако, здесь все же возможно встретиться со значительными трудностями. Действительно, мощность струи сжатого воздуха, гасящей дугу, очевидно, должна быть рассчитана на возможный максимум тока в дуге (до 100 000 А в современных выключателях). И не будет неожиданностью, если при отключении нескольких десятков ампер (выключатели должны отключать и эти токи) ток мощной струей воздуха будет принужденно снижен до нуля в середине полупериода. В этом случае перенапряжения неизбежны.

В этом отношении выключатель со сжатым воздухом подобен импульсному масляному выключателю. В обеих конструкциях мощная струя при отключении малых токов действует на дугу с той же силой, как и при отключении больших токов. В 1940—1941 гг. вопрос о перенапряжениях при отключении импульсным выключателем малых токов был нами исследован теоретически и экспериментально. Позволим себе привести некоторые выдержки из результатов этой работы.

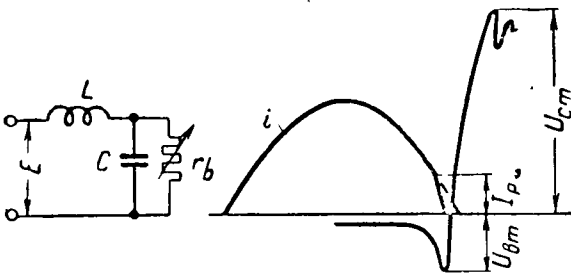


Рис. 1. Эквивалентная схема и процесс ее размыкания.  
 $L$ —индуктивность и емкость отключаемой цепи;  $r_b$ —сопротивление дугового промежутка в процессе отключения.

Было установлено, что причиной перенапряжений при отключении малых токов являются процессы в дуговом промежутке, именно—быстрый рост сопротивления дугового промежутка и связанное с ним принужденное снижение тока к нулю в середине полупериода. Теоретический анализ был произведен для схемы, представленной на рис. 1, слева. На том же рисунке представлен процесс изменения тока и напряжения в дуге.

Сопротивление дугового промежутка быстро растет с некоторого момента времени. В связи с этим ток в некотором интервале, начиная со значения  $I_p$ , изменяется не по синусоиде, а по иной кривой, характер которой обусловлен законом изменения сопротивления дугового промежутка. Закон этот в точности не известен; исследования показали, что он постоянен и зависит от многих факторов. Поэтому теоретический анализ явления был произведен при изменении сопротивления дугового промежутка согласно двум функциям: 1)  $r_b = r_1 t$  и 2)  $r_b = a e_{bt}$ , где  $r_1$ ,  $a$  и  $b$ —некоторые постоянные.

Приближенное<sup>1</sup> решение схемы дало следующие результаты.

Кратность перенапряжений при росте сопротивления дугового промежутка по первому закону:

$$\frac{U_{cm}}{E} = 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{I_p r_1}{E \omega_0}\right)^2},$$

по второму:

$$\frac{U_{cm}}{E} = 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{I_p a b}{E \omega_0}\right)^2},$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Из полученных формул следует, что кратность перенапряжений растет с увеличением тока  $I_p$  и скорости роста сопротивления дугового промежутка и уменьшается с увеличением рабочего напряжения цепи. Экспериментальная проверка подтвердила эти положения. Когда по дуге течет большой ток, промежуток сильно ионизирован, и поэтому следует ожидать, что величина  $I_p$  будет меньше, чем для случая, когда по дуге будет протекать малый ток. Вместе с тем, естественно ожидать, что превраще-

ние дугового промежутка из проводника в диэлектрик при наличии в дуге малого тока происходит быстрее, чем при наличии в дуге большого тока, т. е. при малом токе сопротивление дугового промежутка увеличивается быстрее, чем при большом.

Переходя к выключателю со сжатым воздухом, можно сказать, что чем больше отличаются по величине максимум возможного тока в дуге (на который рассчитана мощность струи сжатого воздуха) и минимум его, тем больше опасность перенапряжений.

Таким образом, с точки зрения надежности работы выключатель со сжатым воздухом при отключении им малых токов представляет аппарат, еще не вполне проверенный. Однако, как будет видно из дальнейшего, не для всех типов выключателей со сжатым воздухом этот вопрос стоит одинаково остро.

В отношении второго требования — *быстродействия*—выключатель со сжатым воздухом не имеет соперников. Некоторые типы масляных выключателей (обеих групп) имеют времена отключения, близкие к значению его для выключателя со сжатым воздухом. Но время для автоматического повторного включения для выключателя со сжатым воздухом может быть доведено до такой малой величины (0,05 sec), которая недостижима для масляного выключателя, так как перед повторным включением его гасительная камера должна освободиться от газа и заполниться маслом, для чего нужно время порядка до секунд.

Третье требование — *безопасность*, решается неудовлетворительно в первой группе выключателей. Для второй группы это требование практически, повидимому, выполнено: пожары и взрывы с современными малообъемными выключателями не наблюдались,—но принципиально они все же возможны. Следовательно, и с этой точки зрения выключатель со сжатым воздухом является наиболее совершенным аппаратом.

*Легкость ревизии* — требование, не осуществимое для первой группы выключателей, выполнимо для второй и наиболее просто удовлетворяется третьей группой выключателей. *Транспортабельность* в равной степени может быть обеспечена в малообъемных масляных и воздушных выключателях, но исключается при первой группе.

Наконец, в изготовлении и в эксплуатации наиболее дорогой является первая группа выключателей. Второе место по стоимости, повидимому, занимают выключатели со сжатым воздухом<sup>2</sup>. Наиболее дешевыми являются малообъемные масляные выключатели.

Разумеется, нельзя все эти требования считать равнозначными и оценивать типы выключателей по числу плюсов и минусов в зависимости от числа выполняемых ими требований.

<sup>2</sup> Применение воздушных выключателей требует наличия пневматического хозяйства.

<sup>1</sup> Существует точное решение.

В отдельных случаях неудовлетворение выключателем одному требованию исключает возможность его применения.

**Конструктивные схемы и идеи, положенные в основу современных выключателей.** Конструкция многообъемных (баковых) масляных выключателей общеизвестна. Отметим лишь, что все современные выключатели этого типа (также и малообъемные) имеют дугогасящие камеры. Конструкции камер очень разнообразны, но рассмотрение их выходит за пределы статьи.

Принцип компановки фазы малообъемного высоковольтного выключателя схематически представлен на рис. 2.

Применение в конструкции колонки с вызвано желанием не иметь уплотнения между валом привода, пронизывающим колонку *a*, и с<sub>2</sub> енками этой колонки, если подвижные части выключателя связать с приводом не вверху, а внизу. Нож разъединителя *d* отключается непосредственно после гашения дуги и его назначение—обеспечить изоляцию между вводом и выводом выключателя в отключенном положении аппарата.

Однако, известны конструкции малообъемных выключателей, в которых нет ни колонки, ни разъединителя. На рис. 3 представлена фотография такого выключателя на 90 kV рабочего напряжения фирмы Alsthom (Франция). Нельзя не отметить исключительную компактность этого выключателя.

Конструкций малообъемных выключателей существует очень много, и более подробно на них мы останавливаться не будем. Следует только упомянуть об импульсном выключателе, который одно время привлекал внимание многих конструкторов, но в последние годы даже фирмы, выпускающие импульсные выключатели, их не рекламируют. Причины этого, повидимому,

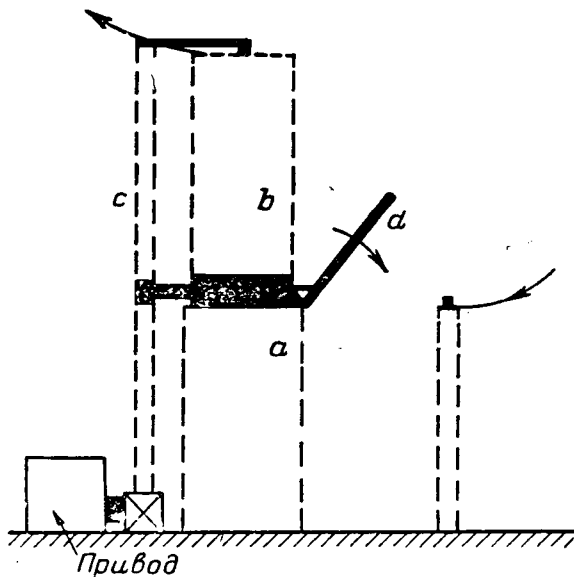


Рис. 2. Схема конструкции малообъемного высоковольтного масляного выключателя.

*a*—изолятор, изолирующий дугогасящую часть от земли; *b*; *c*—фарфоровая склонна, соединяющая привод с подвижными контактами; *d*—разъединитель.

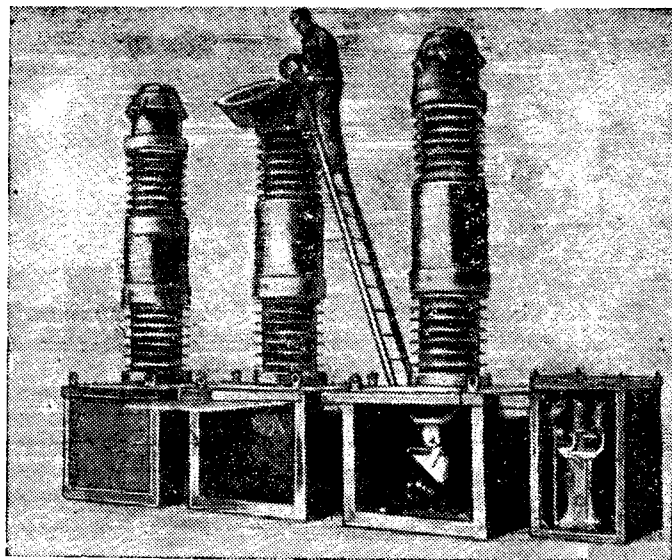


Рис. 3. 90-kV малообъемный масляный выключатель фирмы Alsthom (Франция).

заключаются в сложности конструкции (особенно привода), отсутствии возможности автоматического повторного выключения и, возможно, в тех перенапряжениях, которые получаются при отключении им малых токов.

За последние 6—7 лет появилось особенно много новых конструкций выключателей со сжатым воздухом. Некоторые выключатели этого типа описаны в нашей литературе [Л. 1]. Рассмотрим лишь принципы устройства дугогасящих систем этого типа выключателей.

Прежде всего следует подчеркнуть, что условия деионизации дугового промежутка в выключателях со сжатым воздухом принципиально отличны от условий деионизации дугового промежутка в масляных выключателях. Дело в том, что во время восстановления напряжения на выключателе (после очередного прохождения тока через нуль), когда предопределяется, возникнет ли вновь дуга или нет, в масляных выключателях рост диэлектрической прочности дугового промежутка обуславливается в основном деионизацией дугового столба, его распадом; в выключателе же со сжатым воздухом параллельно этому идет другой процесс—появление между контактами объема свежего газа. Это явление обусловлено теми большими скоростями<sup>3</sup> воздуха, какие имеют место в выключателе со сжатым воздухом и какие практически не достижимы для дугогасящих струй масла в любом масляном выключателе.

В случае воздушного выключателя дуговой столб можно себе представить разорванным на две части. Расстояние между его ионизированными частями должно равняться скорости воздуха, помноженной на время, в течение которого по промежутку ток не течет,—приблизительно на время восстановления напряжения. Если

<sup>3</sup> Скорость движения сжатого воздуха в сопле с учетом высокой температуры может измеряться величинами порядка 1 000 м/сек и даже выше.

это время равно  $100 \cdot 10^{-6}$  sec, то указанное расстояние будет (на один промежуток)  $1000 \cdot 100 \times 10^{-6} = 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см}$ . К моменту полного восстановления напряжения на выключателе диэлектрическая прочность промежутка вполне может быть выше максимума восстанавливающегося напряжения, и нового зажигания дуги не будет. Процесс изменения напряжения на выключателе и рост диэлектрической прочности его промежутка—процессы непрерывные и взаимозависимые, и приведенный расчет есть лишь грубое приближение к действительности. Тем не менее, он указывает на возможность именно механического разрыва столба ионизированного газа и, как результат этого, быстрой деионизации дугового промежутка. Диэлектрическая прочность дугового промежутка через время  $t$  после начала деионизации

$$U_{np} = v t E',$$

где  $v$ —скорость воздуха;  $t$ —время;  $E'$ —пробивная прочность среды.

В начале своего развития выключатели со сжатым воздухом имели расширяющееся сопло (рис. 4 а), в котором скорость воздуха была выше критической и достигала тех больших величин, о которых сказано выше. В этом случае

$$E' < E_0, \text{ но } v > v_{кр.}$$

где  $E_0$ —пробивная прочность воздуха при атмосферном давлении;  $v_{кр}$ —критическая скорость воздуха. В годы войны в Америке были построены выключатели со сжатым воздухом (рис. 4 б), в которых контакты расходились в атмосфере сжатого воздуха, и для них будут иметь место обратные неравенства:

$$E' > E_0, \text{ } v \leq v_{кр.}$$

Таким образом, в этих двух типах выключателей со сжатым воздухом отражены различные идеи: использование высоких скоростей воздуха, с одной стороны, и использование высокой удельной пробивной прочности сжатого воздуха,—с другой.

С целью повышения удельного значения отдельного разрыва в последние годы разработали выключатели с так называемым двойным соплом, в котором струя сжатого воздуха притекает к центру дуги (по длине, рис. 4 с) и уже из центра к концам дуги<sup>4</sup>. В этом случае диэлектрическая прочность между контактами

$$U_{np} = k v t E',$$

где коэффициент  $k$  больше единицы и в пределе равен двум. В этой же конструкции приняты полые контакты, с торцов которых дуга быстро сдувается, что значительно увеличивает срок службы контактов. Повидимому, последняя конструкция имеет преимущества перед первыми двумя.

<sup>4</sup> Этот принцип известен с 1934 г., но тогда он не нашел надлежащего развития.

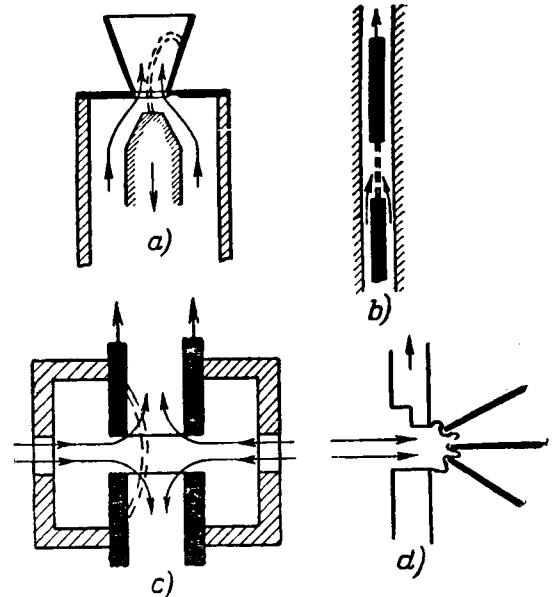


Рис. 4.

а—расширяющееся сопло первых конструкций выключателей со сжатым воздухом; б—осуществление расхождения контактов в атмосфере сжатого воздуха (современная американская конструкция); в—элементы конструкции гасительной камеры с двойным соплом и полыми контактами; д—схема осуществления выдувания дуги на ребра пластин из изоляционного материала.

Следует затем упомянуть о конструкции д (рис. 4), в которой дуга выдувается на ребра пластин из изоляционного материала. В этом случае скорость деионизации промежутка должна возрастать очень быстро. Но с точки зрения перенапряжений при отключении малых токов этот тип выключателя должен вызывать наибольшие опасения.

Большинство современных выключателей со сжатым воздухом сконструировано с расчетом получения наиболее быстрого повторного включения; дугогасящие контакты расходятся в них под действием давления воздуха, и как только давление прекращается, контакты замыкаются вновь. Окончательный же разрыв цепи осуществляет разъединитель, отключающийся после гашения дуги и не приходящий в действие, если выключатель отключился от действия реле автоматического повторного включения.

Мы коснулись лишь некоторых типов выключателей со сжатым воздухом, конструкции которых имеют особо характерные устройства дугогасящих систем. Но этот краткий обзор был бы совершенно не полон, если бы в нем не было уделено должного внимания выключателю с шунтирующим сопротивлением. Этот выключатель, по нашему мнению, заслуживает особого рассмотрения.

**Выключатель со сжатым газом и шунтирующим сопротивлением.** Принцип действия этого типа выключателя (рис. 5) следующий.

Во включенном положении подвижный контакт А прижат к неподвижному В (как это показано пунктиром), при отключении из резервуара (не показанном на рисунке) подается сжатый воздух в направлении стрелок. Контакт А отходит от контакта В и между ними заго-



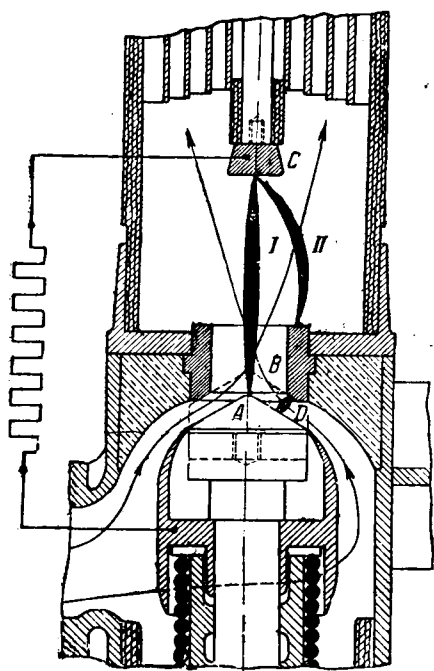


Рис. 5. Схема конструкции выключателя со сжатым воздухом с шунтирующим сопротивлением  $r$ .  
 А—подвижный контакт; В—неподвижный; С—вспомогательный; D—дуга на первой стадии выключения; I и II—дуги, возникающие в последующих стадиях процесса.

рается дуга D. Дуга быстро выбрасывается струей сжатого воздуха вверх, в результате чего образуются две последовательно включенные дуги—I и II, гашением которых физически осуществляется отключение.

Первая дуга шунтирована сопротивлением  $r$ , постоянно включенным между контактами А и С. Благодаря шунту напряжение на этой дуге восстанавливается с малой скоростью, и потому она быстро тухнет. После погасания первой дуги путь тока лежит через сопротивление  $r$ , и поэтому ток во второй дуге будет ограничен сопротивлением  $r$ . Кроме того,  $\cos \varphi$  цепи будет значительно больше, чем при горении первой дуги, так как сопротивление  $r$ —активное. Ограничение тока и увеличение  $\cos \varphi$  сильно облегчает условия гашения второй дуги.

В литературе нет указаний о величине шунтирующего сопротивления. Определим его наиболее выгоднейшее значение.

**Критерии для выбора сопротивления.** Как видно из предыдущего, процесс отключения для данного выключателя разделяется на два этапа: гашение первой дуги, шунтированной сопротивлением, и гашение второй дуги, ток в которой ограничен тем же сопротивлением. С точки зрения рациональности конструкции выключатель должен быть выполнен таким образом, чтобы степень напряженности его работы была одинакова на обоих этапах. Другими словами, при рациональной конструкции условия работы обеих дуговых промежутков должны быть одинаковы. Очевидно, это требование должно быть выполнено именно при предельной мощности выключателя.

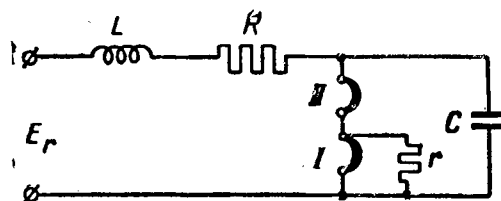


Рис. 6. Схема к анализу процесса отключения выключателя со сжатым воздухом и с шунтирующим сопротивлением.

С, R—постоянные цепи; I, II—дуги.

Усилия, которые приходится преодолевать выключателю, определяются следующими параметрами: 1) током в дуге; 2) скоростью восстановления напряжения на промежутке после прохождения тока через нуль; 3) потолком восстанавливающегося напряжения, которое стремится пробить дуговой промежуток после прохождения тока через нуль.

Определим эти величины для каждого промежутка в отдельности. Считая, что выключатель работает в цепи с сосредоточенными постоянными, расчетную схему можно дать в том виде, в котором она дана на рис. 6, где L, R и C—постоянные цепи; II и I—два дуговых промежутка выключателя;  $r$ —сопротивление, шунтирующее первую дугу.

Эффективное значение тока первой дуги будет определяться предельной отключаемой мощностью выключателя и рабочим напряжением цепи:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U}, \quad (1)$$

где  $P$ —мощность выключателя (3-фазная) в kVA;  $U$ —рабочее напряжение сети в kV.

Перейдем к рассмотрению процесса восстановления напряжения. Будем считать, что после погасания первой дуги вторая дуга горит еще не менее полупериода. Это значит, что при прохождении тока через нуль в первой дуге (после последнего полупериода тока в ней) второй промежуток еще не представляет собой диэлектрика. По промежутку протекает ток или вследствие большой остаточной проводимости или в результате пробоя. Такое предположение тем более вероятно, что фазы тока в первой и второй дугах не могут совпадать с абсолютной точностью (вследствие ряда причин). И за тот короткий промежуток времени, в течение которого происходит процесс восстановления напряжения, достаточно очень небольшой разности фаз, чтобы на время восстановления напряжения на первом промежутке считать второй промежуток закороченным. Полагая также, что  $r \gg R$ , можно считать, что восстанавливающееся напряжение промышленной частоты для первого промежутка равно  $E_r$ —восстанавливаемому напряжению всей цепи.

Как будет видно из дальнейшего, величина шунтирующего сопротивления  $r$  настолько мала, что процесс восстановления напряжения на про-

межутке происходит аperiодически, т. е. согласно уравнению:

$$U_c = E_r + \frac{E_r + U_{bm}}{\alpha_2 - \alpha_1} (\alpha_1 e^{\alpha_2 t} - \alpha_2 e^{\alpha_1 t}), \quad (2)$$

где

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2rC} \pm \sqrt{\frac{1}{4r^2C^2} - \omega_0^2}$$

и  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  — угловая частота собственных колебаний цепи.

Можно показать, что  $\alpha_2 \gg \alpha_1$  и что  $\alpha_2 e^{\alpha_1 t} \gg \alpha_1 e^{\alpha_2 t}$ .

Пренебрегая также величиной пика гашения  $U_{bm}$  по сравнению с величиной  $E_r$ , можно получить

$$U_c = E_1 (1 - e^{\alpha_1 t}). \quad (3)$$

При аperiодическом процессе можно говорить о средней скорости восстановления напряжения только за какой-то промежуток времени, меньший полного времени восстановления напряжения (полное время теоретически равно бесконечности).

Как это обычно принято для подобных процессов, определим среднюю скорость восстановления напряжения за время

$$t = -\frac{1}{\alpha_1}, \text{ когда } e^{\alpha_1 t} = \frac{1}{e} \approx 0,36.$$

В этом случае средняя скорость восстановления напряжения на промежутке

$$\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_1 = -0,64 \alpha_1 E_r \cdot 10^{-6} [\text{V}/\mu\text{sec}]. \quad (4)$$

Обозначим отношение шунтирующего сопротивления к индуктивному одной фазы через

$$k = \frac{r}{x} = \frac{r}{\omega L}.$$

Нетрудно показать, что  $\frac{1}{2rC} = \frac{\omega_0^2}{2k\omega}$ , где  $\omega$  — угловая промышленная частота тока. Поэтому можно написать:

$$\alpha_1 = -\frac{\omega_0^2}{2k\omega} + \sqrt{\frac{\omega_0^4}{4k^2\omega^2} - \omega_0^2}$$

или

$$\alpha_1 = \omega_0 \left[ \sqrt{\frac{n^2}{4k^2} - 1} - \frac{n}{2k} \right], \quad (5)$$

где  $n = \frac{\omega_0}{\omega}$  — отношение собственной частоты колебания цепи к промышленной частоте тока.

Очевидно, ток второй дуги

$$I_2 = \frac{U \cdot 10^3}{\sqrt{3} \sqrt{r^2 + x^2}}. \quad (6)$$

Индуктивное сопротивление ( $\Omega$ ), напряжение (kV) и мощность короткого замыкания (kVA) связаны соотношением  $x = \frac{U^2 \cdot 10^3}{P}$ . Пользуясь им, уравнение (6) можно переписать:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} U \sqrt{1 + k^2}}, \quad (7)$$

где  $P$  — мощность короткого замыкания в kVA при условии  $r = 0$  (при включенном выключателе).

Исходя из схемы рис. 6, легко показать, что после погасания первой дуги величина шунтирующего сопротивления не влияет на характер процесса восстановления напряжения на втором промежутке и этот процесс можно считать периодическим. Для этого промежутка, таким образом, средняя скорость восстановления напряжения может быть определена, как

$$\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_2 = \frac{2}{\pi} \omega_0 E'_r \cdot 10^{-6} [\text{V}/\mu\text{sec}], \quad (8)$$

где  $E'_r$  также представляет собой величину восстанавливающегося напряжения промышленной частоты. Однако,  $E'_r \neq E_r$ . Если для первой дуги угол сдвига фаз был принят равным  $90^\circ$ , то для второй, очевидно,

$$\varphi = \arcsin \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

Поэтому

$$E'_r = E_r \sin \varphi = E_r \frac{1}{\sqrt{1 + k^2}}$$

и

$$\left(\frac{dU_c}{dt}\right)_2 = \frac{2}{\pi} \omega_0 E_r \frac{1}{\sqrt{1 + k^2}} 10^{-6} [\text{V}/\mu\text{sec}]. \quad (9)$$

Таким образом, определены все три величины, влияющие на процесс гашения дуги (ток, скорость восстановления напряжения и величину восстанавливающегося напряжения). Правда, не установлен потолок восстанавливающегося напряжения, а определено лишь восстанавливающегося напряжения промышленной частоты. Но потолок восстанавливающегося напряжения при прочих равных условиях пропорционален  $E_r$  и может быть представлен, как  $d E_r$ , где  $d$  — некоторый коэффициент.

Теперь остается решить вопрос, в какой форме должны войти указанные три величины в выражение, характеризующее напряженность работы выключателя.

При описании [Л. 2] экспериментального исследования выключателя со сжатым воздухом авторами этого исследования была приведена кривая, дающая зависимость величины отключаемого тока от скорости восстановления напряжения. Эта кривая воспроизведена на рис. 7. Анализ кривой в интервале малых скоростей восстановления напряжения (имеющих место для рассматриваемого выключателя) показывает, что эта кривая близка к гиперболе. Таким образом, можно утверждать, что при прочих равных условиях произведение из величины отключаемого тока и скорости восстановления напряжения должно быть постоянной величиной:

$$I \frac{dU_c}{dt} = M = \text{const}.$$

С этой точки зрения напряженность работы выключателя со сжатым воздухом при отключении должна характеризоваться величиной

$$N = b M,$$

где  $b$  — некоторый коэффициент.

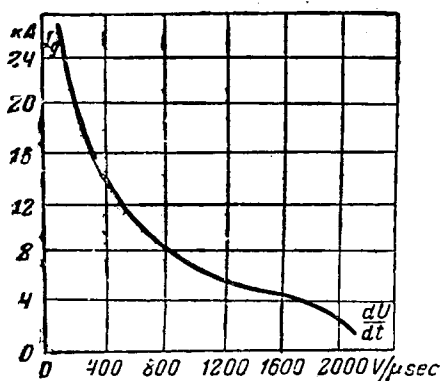


Рис. 7. Выключаемый ток в зависимости от скорости восстановления напряжения (экспериментальная кривая [Л. 2]).

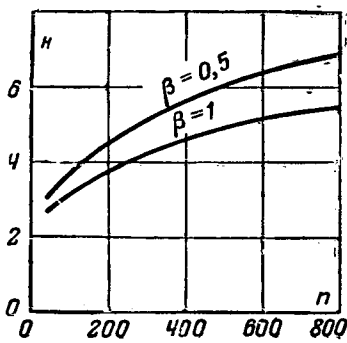


Рис. 8. Зависимость величины  $k$  от  $n = \frac{\omega_0}{\pi}$ .

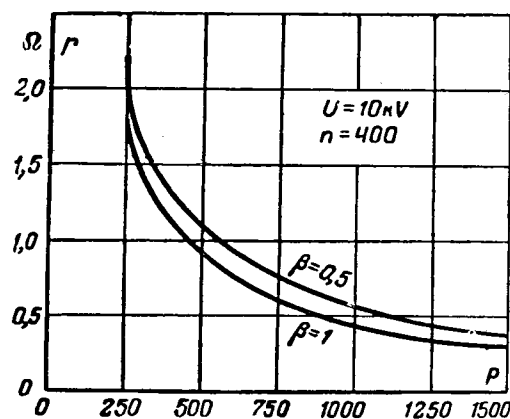


Рис. 9. Величина шунтирующего сопротивления в зависимости от отключаемой мощности.

Что касается влияния потолка восстанавливающегося напряжения, то для него нет таких определенных данных. Однако, здесь можно прибегнуть к следующим рассуждениям: это напряжение стремится вновь зажечь дугу, оно пробивает дуговой промежуток. С увеличением этого напряжения пробивная способность восстанавливающегося напряжения растет, но не прямо пропорционально этой величине, а в какой-то степени  $\beta$ , несколько меньшей единицы. Таким образом, с этой точки зрения напряженность работы выключателя будет характеризоваться величиной

$$(dE_r)^\beta.$$

В результате условие равномерного распределения работы между обоими промежутками должно быть записано в виде:

$$b I_1 \left( \frac{dU}{dt} \right)_1 (dE_r)_1^\beta = b I_2 \left( \frac{dU}{dt} \right)_2 (dE_r)_2^\beta. \quad (10)$$

Или, сокращая на  $b$  и  $d^\beta$  и принимая во внимание предыдущие соотношения, условие рационального выбора величины шунтирующего сопротивления может быть записано в форме:

$$-0,64 \cdot \frac{P}{\sqrt{3} U} \omega_0 \left[ \sqrt{\frac{n^2}{4k^2} - 1} - \frac{n}{2k} \right] F_r \cdot 10^{-6} E_r^\beta = \frac{P}{\sqrt{3} U \sqrt{1+k^2}} \cdot \frac{2}{\pi} \omega_0 E_r \frac{10^{-6}}{\sqrt{1+k^2}} \left( E_r \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} \right)^\beta.$$

После соответствующих сокращений получаем:

$$\frac{n}{2k} - \sqrt{\frac{n^2}{4k^2} - 1} = \frac{1}{(1+k^2)^\gamma}, \quad (11)$$

где  $\gamma = 1 + 0,5\beta$ .

Как будет видно из дальнейшего,  $k^2 \gg 1$ , поэтому можно считать  $1 + k^2 \approx k^2$ . В результате для определения величины  $k$  получается уравнение:

$$k^{4\gamma} - n k^{2\gamma-1} + 1 = 0. \quad (12)$$

Так как  $k^{4\gamma} \gg 1$  и  $n k^{2\gamma-1} \gg 1$ , то решение уравнения (12) можно представить в виде:

$$k = \sqrt[n]{\frac{2\gamma+1}{n}} = \sqrt[n]{\frac{3+\beta}{n}}. \quad (13)$$

**Величина шунтирующего сопротивления.** Как показывает уравнение (13), величина  $k$  является функцией только  $n$ , равной отношению собственной частоты колебаний сети к величине промышленной частоты тока. Показатель  $\beta$  определить трудно, но эта величина, по всей вероятности, заключена между 1 и 0,5.

На рис. 8 дана графическая зависимость величины  $k$  от  $n$ . Как видно из рис. 8,  $k$  медленно возрастает с увеличением  $n$ . Поэтому некоторая ошибка в определении  $k$  принципиального изменения в конечный результат не внесет.

Зная величину  $k$ , легко определить и величину шунтирующего сопротивления:

$$r = k x = k \frac{U^2 \cdot 10^3}{P}. \quad (14)$$

В качестве примера укажем, что при напряжении  $U = 10$  kV и отключаемой мощности  $P = 1\,000\,000$  kVA величина шунтирующего сопротивления получается очень небольшой и сравнительно мало зависит от  $\beta$  (при  $n = 400$  и  $\beta = 1$ ,  $r = 0,46 \Omega$ , для  $\beta = 0,5$ ,  $r = 0,55 \Omega$ ).

Для характеристики величины шунтирующего сопротивления на рис. 9 представлена зависимость  $r$  от отключаемой мощности при напряжении 10 kV и  $n = 400$ , а на рис. 10 приведена та же величина в функции рабочего напряжения сети при  $n = 400$  и мощности  $1\,000 \cdot 10^3$  kVA (в обоих случаях для двух значений  $\beta$ , равных 1 и 0,5).

Интересно проследить, как изменяется величина скорости восстановления напряжения, если шунтирующее сопротивление выбрать вышеуказанным способом.

Для первого промежутка средняя скорость восстановления будет:

$$\left( \frac{dU}{dt} \right)_1 = 0,64 \cdot \omega E_r \cdot 10^{-6} \cdot n [m - \sqrt{m^2 - 1}],$$

где  $m = 0,5n^{0,75}$ .

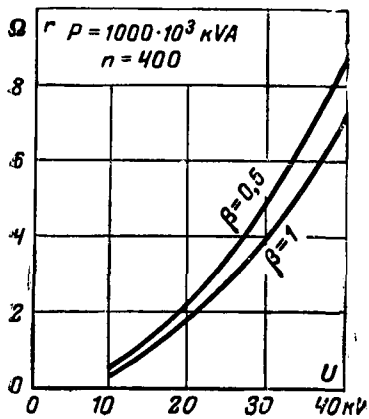


Рис. 10. Величина шунтирующего сопротивления в зависимости от рабочего напряжения.

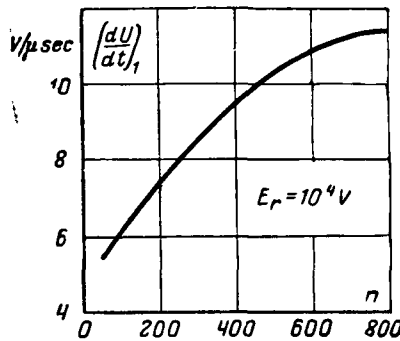


Рис. 11. Скорость восстановления напряжения  $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1$  на первом промежутке в выключателе со сжатым воздухом и с шунтирующим сопротивлением в зависимости от отношения  $n$  — собственной частоты колебания к частоте сети.

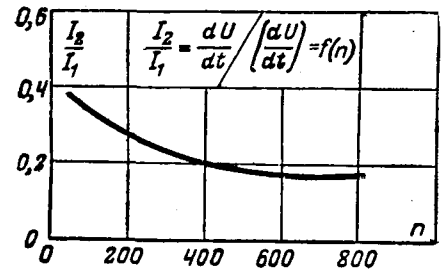


Рис. 12. Отношение тока дуги  $I_2$  к току дуги  $I_1$  в зависимости от  $n$  — отношения собственной частоты цепи к частоте сети при наличии шунтирующего сопротивления в выключателе со сжатым воздухом.

На рис. 11 представлена эта величина в зависимости от  $n$  для  $E_r = 10^4 \text{ V}$ .

Как видно из рис. 11, скорость восстановления напряжения на первом промежутке измеряется единицами вольт в микросекунду и даже при очень больших значениях собственной частоты колебаний оно не на много возрастает. Например, для  $n = 800$ , что соответствует  $f_0 = 40\,000 \text{ Hz}$ ,  $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1 = 11,4 \text{ V}/\mu\text{sec}$ . Если даже  $f_0 = 10^5$  ( $n = 2\,000$ ), то и тогда  $\left(\frac{dU}{dt}\right)_1 = 12 \text{ V}/\mu\text{sec}$ .

Точно так же нетрудно проследить, как меняется ток во второй дуге и скорость восстановления напряжения на втором промежутке, если величина  $r$  имеет указанный выше порядок. Легко показать, что отношение тока второй дуги к току в первой равно отношению скорости восстановления напряжения для второй дуги к скорости восстановления напряжения, вычисленной при условии отсутствия шунтирующего сопротивления:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\frac{dU}{dt}}{\left(\frac{dU}{dt}\right)_2} = \frac{1}{V\sqrt{1+k^2}}$$

где  $\frac{dU}{dt}$  — скорость восстановления напряжения при отсутствии шунтирующего сопротивления.

На рис. 12 представлена эта зависимость в функции от  $n$ . Из кривой рис. 12 следует, что ток во второй промежутке значительно меньше тока в первом, а следовательно, разность между высшим пределом отключаемого тока и его низшим значением сильно уменьшается; таким образом, шунтирующее сопротивление снижает перенапряжения, возможные при отключении малых токов.

**Заключение.** Изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Выключатель со сжатым воздухом должен быть в центре нашего внимания; выключатель

этого типа должен быть в кратчайший срок освоен электропромышленностью и получить широкое применение в электроустановках. Однако для ряда случаев эксплуатации вполне могут быть использованы малообъемные масляные выключатели. Необходимо разрабатывать и эти конструкции.

2. Особое внимание следует уделить выключателю со сжатым воздухом и шунтирующим сопротивлением. Эта конструкция снимает практически вопрос о влиянии скорости восстановления напряжения, облегчает условия испытания и маркировки выключателя (фактор отнюдь не маловажный) и в значительной степени облегчает процесс отключения малых токов. Следует отметить, что за границей пытаются построить подобные воздушные выключатели на весьма высокое напряжение [Л. 3].

3. Учитывая наличие большого количества многообъемных масляных выключателей, находящихся в эксплуатации, работы по их модернизации следует продолжать.

### Литература

1. Е. М. Цейров. Электричество, № 11, 1945.
2. Ю. В. Буткевич. Вестник электропромышленности, № 11—12, 1944, см. также книгу под ред. проф. А. А. Глазунова. Электрические станции и подстанции, 1945.
3. D. C. Prince, J. A. Henley, W. K. Rankin. El. Eng., Trans., № 9, 1940.
4. H. E. Cox and H. W. Wilcox. Journ. of Institut of El. Eng., № 24, 1944.
5. Van Siekle. El. Eng., Trans., № 9, 1941.
6. L. R. Ludwig, B. P. Baker. El. Eng., Trans., № 5, 1941.
7. L. R. Ludwig, H. W. Wilcox, B. P. Baker. El. Eng., Trans., № 5, 1942.
8. Philip Sporn, H. E. Strang. El. Eng., Trans., № 1, 1942.
9. W. K. Rankin, R. M. Bennet. El. Eng., Trans., № 5, 1941.
10. A. W. Hill, W. M. Leeds. El. Eng., Trans., № 3, 1943 и № 6, 1945.
11. H. L. Byrd, E. R. Rietz. El. Eng., Trans., № 4, 1945.
12. H. L. Byrd, Ben S. Beall. El. Eng., Trans., № 5, 1945.
13. L. F. Hunt, E. W. Bohne, H. A. Peterson. El. Eng., № 2, 1943.
14. L. J. Linde, B. W. Wymann. El. Eng., Trans., № 3, 1944.
15. L. R. Ludwig, W. M. Leeds. El. Eng., Trans., № 3, 1943, part II, V. 28, № 1, 1944.
16. A. R. Blandford. Journal of Inst. of El. Eng., V. 28, part II № 18, 1944.
17. A. R. Blandford. El. Power Eng., V. 28, № 1, 1944.



# Гасительная камера воздушного выключателя ВЭИ на 110 кВ

Кандидат техн. наук **Е. М. ЦЕЙРОВ**

*Всесоюзный электротехнический институт*

Гасительная камера воздушного выключателя служит, как показывает ее название, для гашения электрической дуги. Эта операция производится в ней сжатым воздухом. Известно и так или иначе используется на практике несколько различных методов гашения дуги этим путем. Основные из них рассмотрены в статье автора „Принципы гашения электрической дуги сжатым воздухом“ (Электричество, № 11, 1945) и нет необходимости вновь излагать здесь идеи, положенные в основу устройства гасительных камер воздушных выключателей. Требования, предъявляемые к камерам, как к техническим аппаратам, многообразны. Остановимся сейчас лишь на главных.

Гасительная камера должна, прежде всего: а) отключать предельно вероятные значения тока короткого замыкания; б) отключать и через достаточно малые промежутки времени в процессе так называемого „повторного включения“ включать источник тока на имеющемся в цепи короткое замыкание; в) отключать токи холостого хода трансформаторов и линии передач, а также небольшие рабочие токи без опасных для оборудования электрических установок коммутационных перенапряжений. Все эти операции, естественно, должны совершаться безотказно, при любой, имеющей место на практике, скорости восстанавливающегося напряжения.

Первая задача является, как показывает опыт, наиболее трудной и сложной, и решение ее предопределяет в основном устройство гасительной камеры воздушного выключателя.

При конструктивном оформлении камеры руководящей, очевидно, является рабочая гипотеза *о процессе гашения дуги в потоке сжатого воздуха*. Имеется несколько точек зрения по этому вопросу. Автор придерживается того взгляда, что восстановление диэлектрической прочности дугового промежутка в момент, когда ток в дуге проходит через нуль, есть *газо- и термодинамический процесс*, приводящий при определенных условиях к весьма быстрому сни-

*В ВЭИ разработана и построена камера воздушного выключателя на 110 кВ и 2500 тыс. кВА. Излагаются основные требования, которым должно удовлетворять устройство, использующее для гашения электрической дуги сжатый воздух. Рассматриваются результаты экспериментов, положенных в основу конструкции дугогасительной камеры, описывается самая конструкция и приводятся краткие данные испытаний первого советского воздушного выключателя высокого напряжения в мощной энергосистеме.*

жению температуры, а следовательно, и к уменьшению проводимости объема воздуха, заключенного в пространстве между электродами (контактами) и раскаленного существовавшей ранее дугой. Скорость снижения температу-

ры в дуговом промежутке до величины, соответствующей высокой диэлектрической прочности воздуха, и характеризует дугогасящую способность гасительной камеры. Эта точка зрения открывает пути к рациональному устройству гасительного элемента камеры.

Необходимо, во-первых, всемерно стремиться к предельному уменьшению количества раскаленного воздуха, заполняющего дуговой промежуток, к моменту прохождения тока через нуль с тем, чтобы сократить время его эвакуации. Количество раскаленного воздуха зависит от ряда факторов, в частности, от геометрических размеров дуги—диаметра и длины ее. Практически, при данных параметрах электрической цепи и соответствующих параметрах потока воздуха возможно широко изменять лишь величину длины дуги. Следовательно, единственная практически существующая возможность сокращения объема раскаленного воздуха—это уменьшение длины дуги. Этого можно достичь, предельно уменьшая междуэлектродное расстояние (длину дугового промежутка), т. е. выбирать указанное расстояние, исходя только из расчета достаточного запаса электрической прочности промежутка в момент гашения дуги.

Необходимо, во-вторых, добиваться максимального относительного (т. е. расхода, приходющегося на единицу поперечного сечения) расхода воздуха через междуэлектродное расстояние. Это условие наиболее полно соблюдается, когда дуговой промежуток лежит в области, соответствующей так называемому минимальному сечению воздухопровода<sup>1</sup>, и когда давление воздуха в ка-

<sup>1</sup> Очевидно, гасительную камеру воздушного выключателя можно рассматривать как своеобразный воздухопровод.

мере к моменту существования дуги предельно (весьма мало отличается от давления в резервуаре). Последнее условие автоматически выдвигает требование сохранения в дуговом промежутке как можно более высокого давления с целью повышения его диэлектрической прочности.

Выполнение этих коренных требований в той или иной конструкции должно быть увязано еще с двумя на первый взгляд второстепенными условиями.

Необходимо, прежде всего, решительно отказаться от участия всякого рода изоляции в качестве механического элемента, непосредственно направляющего поток раскаленного дугой воздуха, так как изоляция, рано или поздно разрушаясь, приходит в негодность, что влечет за собой выход из строя всего аппарата.

Другое условие связано с работой дугогасительных контактов. В большинстве конструкций выключателей дугогасительные контакты выполняют и роль нормального разъемного контакта, длительно пропускающего номинальные токи. Такое совмещение ролей является весьма простым конструктивным решением и иногда бывает единственно возможным. Известно, что электрическая дуга при тех значениях токов короткого замыкания, которые разрывают современные выключатели высокого напряжения, даже за очень короткое время своего существования (сотые доли секунды) способна достаточно сильно повредить поверхность контактов. Обычно после отключения тяжелых коротких замыканий сети приходится производить осмотр контактов выключателя (в особенности масляного) и их замену. В современном выключателе это недопустимо, и конструкция дугогасящего устройства должна обеспечить вполне нормальную работу выключателя после неоднократных случаев отключения предельных токов короткого замыкания без необходимости осмотра, не говоря уже о замене контактов.

Резюмируя сказанное, приходим к выводу, что гасительный элемент камеры должен обладать по крайней мере следующими качествами:

1. Иметь минимальную, определяемую условиями электрической прочности, длину дугового промежутка.

2. Расход раскаленного дугой воздуха должен быть максимальным при данном сечении выпускных отверстий камеры.

3. Давление воздуха в камере к моменту начала расхождения контактов должно приближаться к предельно возможному.

4. Любая изоляция, используемая как направляющая для раскаленного воздуха, должна быть устранена.

5. Рабочая контактная поверхность должна возможно меньше времени подвергаться разрушающему действию электрической дуги.

Наиболее полно этим основным условиям удовлетворяет гасительное устройство (если гово-

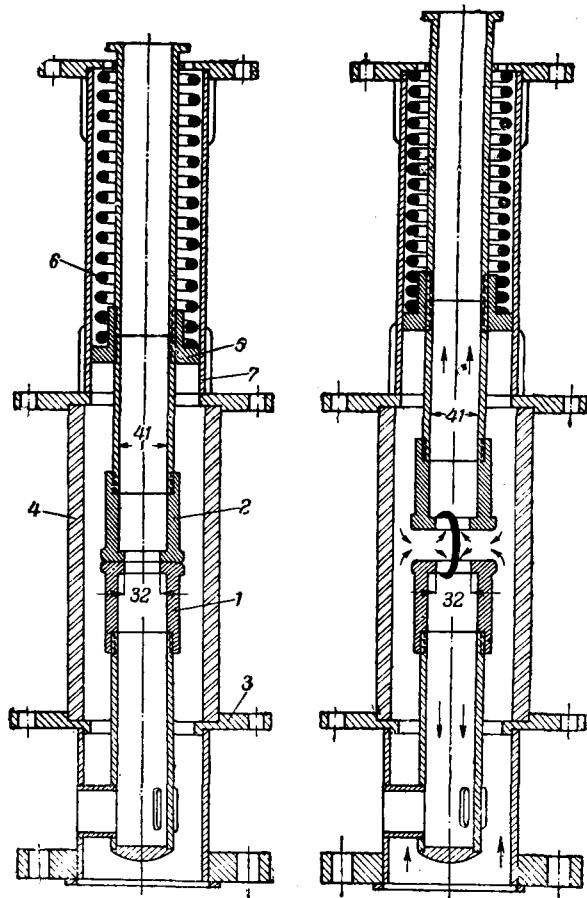


Рис. 1. Разрез дугогасящего элемента камеры.

1—неподвижный контакт; 2—подвижный контакт; 3—металлический фланец, соединяющий камеру с резервуаром сжатого воздуха; 4—цилиндр из бакелизированной бумаги; 5—поршень, механически связанный с подвижным контактом; 6—спиральная пружина; 7—цилиндр поршня.

рить об использовании так называемого „продольного дутья“) с одним или двумя полыми контактами<sup>2</sup>.

Эксперименты с различными типами гасительных устройств подтвердили в основном изложенные соображения. В частности, эксперименты показали, что наилучшим дугогасительным устройством является именно камера с двумя полыми контактами. Модель такого устройства, подвергавшаяся экспериментальному исследованию, показана на рис. 1. Слева на рисунке показано положение контактов, соответствующее включенному состоянию, справа—момент, соответствующий гашению дуги (положение „отключено“).

Работа данного устройства происходит обычным образом. В момент отключения сжатый воздух через фланец 3 подается в цилиндр 4. Давление воздуха стремится поднять вверх поршень 5 и тем самым разомкнуть контакты 1 и 2. Однако, пружина 6 некоторое время препятствует этому. Когда давление воздуха в цилиндре 4 достигает определенной величины, поршень, сжимая пружину, поднимается вверх и увлекает за собой контакт 2. Металлическая связь между контактами нарушается и возникает электрическая дуга.

<sup>2</sup> См. указанную выше статью.

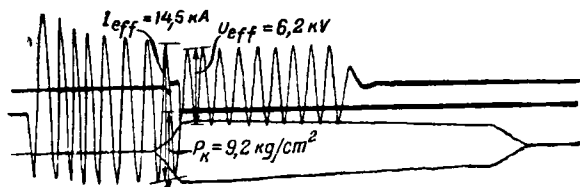


Рис. 2. Осциллограмма процесса разрыва тока короткого замыкания при помощи камеры, схематически показанной на рис. 1.

В образовавшуюся между торцами контактов щель устремляется поток воздуха, смещающий дугу в положение, показанное на рисунке. Смещение дуги обеспечивает сохранение хорошего состояния рабочей контактной поверхности. После того как контакты разошлись на требуемое по условиям электрической прочности расстояние и в момент очередного прохождения тока через нуль дуговой промежуток освобождается от раскаленного воздуха, диэлектрическая прочность его возрастает, дуговой разряд прекращается; как говорят, происходит гашение дуги. Легко видеть, что буквально все условия, поставленные выше, полностью соблюдаются в описанной модели.

Основные результаты эксперимента в лабораторных условиях с моделью рис. 1. таковы: отключались токи до 15 000 А при напряжении в 6 кВ (скорость восстанавливающегося напряжения достигала 1500 В/μsec) и в 2500 А при 35 кВ (2000 В/μsec). Значения отключаемых токов и напряжений были ограничены не возможностями модели, а иными техническими причинами. Давление воздуха в камере не превышало 8—9 ат. Длительность горения дуги составляла в подавляющем большинстве опытов один полупериод (0,01 sec) и; лишь в отдельных случаях она достигала 0,015 sec. Длина дугового промежутка во всех опытах не превышала 2 см. Одна из осциллограмм работы модели представлена на рис. 2.

На рис. 3 дана фотография подвижного контакта после произведенных им отключений в порядке возрастающих значений токов короткого замыкания, от 1 000 до 13 000 А. Контакт находится в хорошем состоянии; он имеет незначительные следы дуги в одном месте рабочей поверхности и годен в дальнейшей эксплуатации без всякой зачистки.

Выясним, в состоянии ли данное устройство обеспечить другие, указанные выше, требования—ограничивать коммутационные перенапряжения и работать при достаточно больших скоростях восстанавливающегося напряжения.

Коммутационные перенапряжения при отключении холостых линий передачи или небольших индуктивных токов могут достигать очень больших значений, крайне опасных для состояния изоляции электрических установок. Перенапряжения возникают в результате весьма энергичного действия гасящего устройства, обрывающего ток до момента его прохождения через нуль.

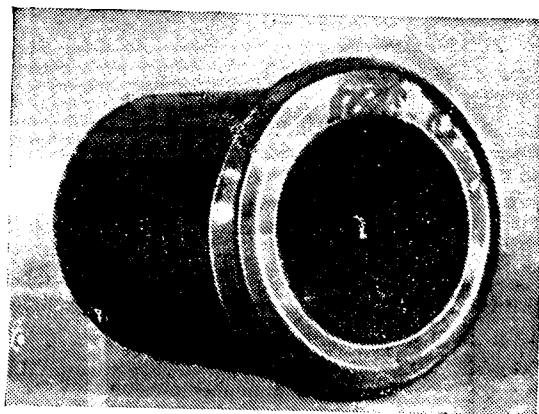


Рис. 3. Фото подвижного контакта после отключения камерой 16 коротких замыканий от 1000 до 13000 А (в порядке возрастающих значений токов).

С другой стороны, способность аппарата работать в условиях больших скоростей восстанавливающегося напряжения и при больших токах требует такой конструкции, при которой вынос продуктов горения дуги из зоны дугового промежутка совершался бы наиболее интенсивно, что неизбежно приводит к форсированному гашению дуги при малых токах. Конструктивно последнее требование разрешается тем, что увеличивается расход воздуха через дуговой промежуток, т. е. либо увеличивают сечение выхлопных отверстий, либо повышают давление воздуха. Два указанных требования вступают, следовательно, в воздушном выключателе в определенное противоречие. В масляных выключателях оно так резко не проявляется, ибо там гасящая способность камеры является функцией отключаемого тока. Единственной мерой, способной просто разрешить это противоречие, без внесения в аппарат разрядников и иных приспособлений, является такое ослабление диэлектрической прочности дугового промежутка в целом для фазы, при котором не могут возникнуть опасные для системы перенапряжения.

Для выполнения данного требования необходимо величину дугового промежутка брать минимальной, исходя только из электрических, но отнюдь не из газодинамических или иных соображений. Как видим, последнее условие находится в полной гармонии с прежними условиями ограничения длины дуги до минимальных размеров. Нельзя умолчать, что это является также весьма положительной особенностью данного принципа гашения дуги.

Исследуем, можно ли привести в согласие с конструктивной точки зрения два высказанных выше требования: а) предельно уменьшать величину дугового промежутка для заданной величины напряжения и б) вне связи с п. „а“ обеспечить достаточный расход воздуха через дуговой промежуток при заданном сечении выхлопных отверстий.

На рис. 4 а схематически представлен дуговой промежуток при полном раздвижении контактов. Расход воздуха через промежуток определяют—цилиндрическая поверхность, перпендикулярная



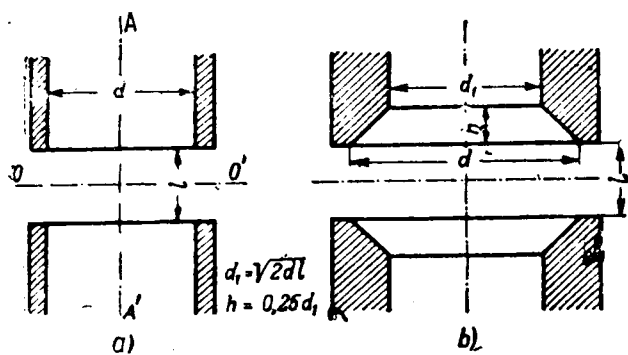


Рис. 4.

плоскости  $OO'$ , площадь которой равна  $\pi dl$ , и площадь круга, параллельного плоскости  $OO'$ , равная  $\frac{\pi d^2}{4}$ .

Для обеспечения отключения предельных токов и быстрого восстановления диэлектрической прочности нужно стремиться к равенству площадей:

$$\pi d \frac{l}{2} = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Если длина  $l$  дугового промежутка находится в таком соотношении с диаметрами выхлопных отверстий, что цилиндрическая поверхность  $\pi d \frac{l}{2} > \frac{\pi d^2}{4}$  (например, в случае высокого на-

пряжения и малого отключаемого тока), то, поскольку обеспечено гашение дуги, отклонение от указанного равенства вполне законно. Возрастание предельного отключаемого тока будет сопровождаться увеличением диаметров выхлопных отверстий и при неизменном  $l$  для некоторого значения тока будет в точности соблюдено сочетание  $l = \frac{d}{2}$ . Дальнейшее увеличение тока

и соответственное увеличение выхлопных отверстий при неизменном  $l$  приведет к соотношению  $l < \frac{d}{2}$ , в результате чего давление в области

дугового промежутка понизится, так как площадь цилиндрической поверхности возрастает пропорционально первой степени, а площадь выхлопного отверстия — пропорционально второй степени диаметра. В этом случае можно ожидать, что эвакуация раскаленного воздуха станет вялой и камера потеряет свои гасительные свойства.

Последнего можно избежать, ограничив тем или иным способом площадь сечения выхлопных отверстий, например, так, как показано на рис. 4, б, сохраняя в то же время неизменной площадь цилиндрического сечения. Таким образом, имеются практические возможности создания в данном гасительном устройстве оптимальных условий. Опыт показывает, что для воздушных выключателей высокого напряжения (110—220 кВ) соотношения между длиной дугового промежутка, определяемой условиями диэлектрической проч-

ности, и диаметрами выхлопных отверстий, обусловленных мощностью (предельным током) и предельной скоростью восстанавливающегося напряжения, таковы, что позволяют соблюдать равенство  $l = \frac{d}{2}$  при мощностях коротких замыканий, превышающих по крайней мере 4 000—5 000 тыс. кВа, не прибегая к специальным мерам. Считаем при этом, что давление воздуха будет лежать в пределах 15—20 ат.

Бесспорно также и то, что отклонение в определенных пределах от условия  $l = \frac{d}{2}$  не

скажется существенно на работе выключателя. Таким образом, описанное выше устройство может, безусловно, удовлетворять всем требованиям, которые предъявляются к гасительным камерам воздушных выключателей.

**Пневматический механизм контактов.** Следующим важным элементом гасительной камеры воздушного выключателя является ее механизм. Он обычно выполняется в виде простого поршневого устройства, раздвигающего контакты, и о нем не стоило бы говорить, если бы перед ним не ставились дополнительно две серьезнейшие задачи.

Во-первых, исходя из необходимости иметь к моменту гашения дуги давление воздуха в камере как можно более высоким, механизм не должен позволять контактам расходиться ранее определенного момента времени, соответствующего необходимой величине давления. Во-вторых, тот же механизм, после того как начали размыкаться контакты, должен развести их до предельного расстояния весьма быстро, чтобы не затягивать излишне время горения дуги. Опыт показывает, что каждый полупериод горения дуги весьма сильно сказывается на разрушении контактов.

Эти два простые требования в сущности также весьма взаимопротиворечивы, как это видно из следующего.

Теоретический анализ показывает, что давление воздуха в камере при ее наполнении из резервуара растет по некоторой кривой, ход которой зависит от нескольких величин — начального давления объема камеры, размеров трубопровода и т. д. В современных 110 кВ выключателях процесс наполнения длится около 0,04 sec.

На рис. 5 представлена кривая подъема давления воздуха в камере, полученная теоретическим путем. Легко видеть, что она может быть приближенно представлена в виде прямой, имеющей некоторый угол наклона к оси абсцисс. При этом допущении, достаточно точно отображающем физический процесс, рост избыточного давления воздуха в камере может быть выражен так:

$$p = \alpha t, \quad (1)$$

где  $p$  — давление в  $\text{kg/cm}^2$ ;  $\alpha$  — скорость подъема давления в  $\text{kg/cm}^2\text{sec}$ ;  $t$  — время в sec.



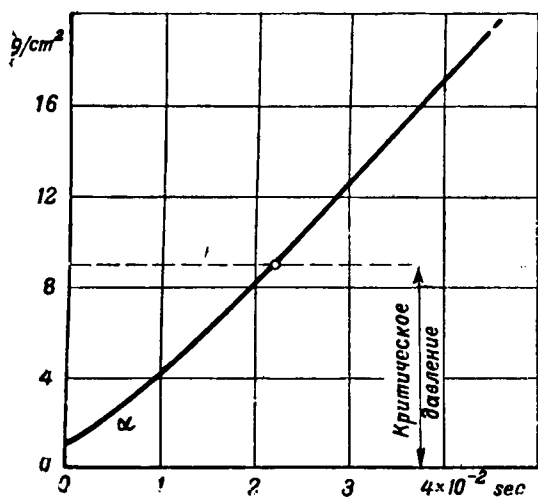


Рис. 5. Теоретическая кривая изменения давления воздуха в камере при ее наполнении.

Уравнение движения простого поршневого механизма, подобного изображенному на рис. 1, если пренебречь определенным увеличением силы пружины при ее сжатии, будет:

$$m \frac{d^2S}{dt^2} = pF - f, \quad (2)$$

где  $m$ —масса движущихся частей механизма, включая контакты;  $S$ —путь поршня;  $t$ —время;  $F$ —площадь поршня;  $f$ —сила нажатия пружины.

Очевидно, что механизм придет в движение тогда, когда  $pF > f$ . Давление воздуха, при котором возникнет движение, назовем давлением трогания механизма. Первая задача решается просто—необходимо так подобрать площадь поршня и силу противодействующей пружины, чтобы давление трогания имело бы требуемое высокое значение.

Перепишем уравнение (2) в таком виде:

$$m \frac{d^2S}{dt^2} = (p_{mp} + p_{изб})F - f = p_{изб} \cdot F, \quad (3)$$

где  $p_{mp}$ —давление трогания;  $p_{изб}$ —давление, представляющее разность между  $p$  и  $p_{mp}$ .

Подставив (1) в (3), что можно сделать, отнеся нулевой момент времени к моменту трогания и выполнив интегрирование, получим:

$$S = \frac{\alpha F}{6 \cdot m} \cdot t^3 \quad (4)$$

или

$$t = \sqrt[3]{\frac{6 S m}{\alpha F}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что при заданной величине расхождения контактов  $S$ , при определенной величине массы подвижных частей и скорости наполнения камеры  $\alpha$  единственным практически возможным средством добиться данной величины времени  $t$  расхождения контактов является то или иное изменение величины пло-

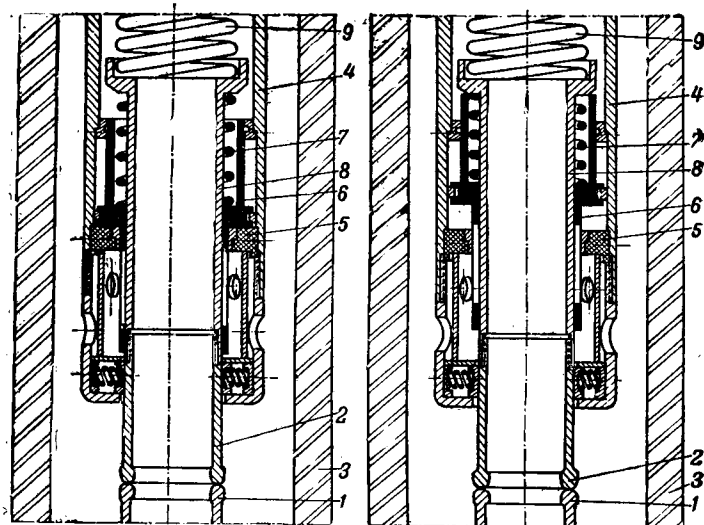


Рис. 6. Механизм камеры конструкции автора.

1—неподвижный контакт; 2—подвижный контакт; 3—цилиндр из бакелитизированной бумаги; 4—металлический цилиндр; 5—диск; 6—поршень; 7—запирающая пружина; 8—контактная трубка; 9—пружина.

щади поршня  $F$ , причем, как показывает (5), даже значительное увеличение размеров поршня относительно мало сказывается на времени  $t$ . Кроме того, увеличение площади поршня требует соответственного увеличения силы противодействующей пружины для того, чтобы сохранить требуемую величину давления трогания.

Простой расчет для реальной конструкции выключателя показал, что если бы мы пожелали раздвинуть контакты всего на 2 см в течение 0,01 сек (один полупериод), то для этого понадобился бы поршень диаметром в 16 см; если к тому же давление воздуха к моменту трогания взять равным, например, 13 kg/cm<sup>2</sup> (с тем, чтобы к моменту гашения давления в камере было 17 ат), то сила давления пружины должна быть 2400 kg. Приходим к совершенно несообразной величине. До сих пор, чтобы обойти трудности, мирились с относительно медленным раздвижением контактов и затягиванием вследствие этого горения дуги.

Практически время расхождения контактов в заграничных образцах лежит в пределах двух периодов (0,04 sec), а в лучших образцах оно равно 0,02—0,03 sec. В этих же пределах лежит и длительность горения дуги.

Механизм камеры, предложенный автором, устраняет эти трудности. На рис. 6 схематически показано два состояния этого устройства: состояние покоя и рабочий момент.

В конструкции рис. 6 подвижный контакт 2 сильной пружиной 9 прижимается к неподвижному контакту 1, создавая хорошую проводимость. Рабочий ток по цилиндру 4 через комплект скользящих контактов передается к подвижному, а затем и неподвижному контактам. В момент, когда производится отключение, сжатый воздух наполняет цилиндр 3 и давит на торцевую поверхность подвижного контакта, стремясь поднять его, но пружина 9 запрещает это движение. На контактную трубку 8, несущую подвижный контакт, надет собственно поршень 6

механизма, который имеет своеобразную форму. Основная площадь поршня заключена в цилиндр, дно которого составляет диск 5. Отверстие в этом диске совместно с трубкой 8 образует кольцевую щель, через которую воздух может проникать под поршень.

В нормальных условиях эта щель закрыта трубчатый отростком, составляющим одно целое с поршнем 6 (рис. 6, слева). Поршень удерживается в своем положении запирающей пружиной 7. После того как давление воздуха на трубчатый отросток поршня станет достаточным для преодоления силы запирающей пружины 7, поршень придет в движение. По истечении некоторого промежутка времени поршень настолько поднимется вверх, что откроет доступ воздуху в цилиндр через впускные окна, прорезанные в трубчатом отростке, и соответственно через кольцевую щель. При дальнейшем ходе поршня впускные окна открываются полностью и объем цилиндра под поршнем заполняется сжатым воздухом, этот момент показан справа на рис. 6. После этого поршень приходит в соприкосновение с тарелкой контактной трубки 8 и увлекает ее с контактом вверх, сжимая главную пружину.

Во время предварительного хода поршня — до начала расхождения контактов — происходит подъем давления в камере до необходимой, достаточно высокой величины, контактная же трубка, как указывалось, удерживается от движений главной пружиной. Сила нажатия этой пружины мала сравнительно с величиной полного давления воздуха на всю площадь поршня. Поэтому в момент, когда поршень приходит в соприкосновение с контактной трубкой, у него имеется достаточный запас силы для сообщения ей значительного ускорения. Лишь очень небольшая часть этой силы расходуется на сжатие пружины. Опыты с этим устройством показали, что при диаметре поршня в 10 см (нормальный размер для современных камер) и силе предварительного нажатия пружины около 200 кг полное время замыкания контактов достигает всего лишь 0,004 сек при ходе контактов в 35 мм. Давление же воздуха к моменту расхождения контактов равно 15 ат.

Совокупность всех изложенных выше соображений и проведенные эксперименты были положены в основу при разработке гасительной камеры для опытного образца воздушного выключателя ВЭИ на 110 кВ и 2 500 тыс. кВА отключаемой мощности.

**Устройство гасительной камеры.** К дугогасительной камере, как аппарату, пригодному для длительной эксплуатации, предъявляется ряд дополнительных конструктивных требований.

1. Камера должна обладать хорошей изоляцией, соответствующей ее номинальному напряжению и условиям работы на открытом воздухе.

2. Ее механическая прочность должна соответствовать разрывающему усилию сжатого воздуха, наполняющего камеру в процессе отключения.

3. Токопроводящая часть камеры должна по самой идее дугогасительного устройства обла-

дать разъемными и скользящими (или гибкими) контактами, способными длительно пропускать номинальные токи и надежно работать в аварийных условиях короткого замыкания.

4. Общая конструкция камеры должна обеспечивать легкий доступ к дугогасительным контактам, которые неизбежно постепенно разрушаются и требуют периодического осмотра и замены.

Наиболее сложными являются первые две задачи. Они обычно разрешаются путем комбинированного применения органической изоляции, обладающей высокой механической прочностью, с фарфоровой изоляцией, способной надежно работать на открытом воздухе, при неблагоприятных атмосферных условиях.

На рис. 7 показан разрез камеры опытного воздушного выключателя ВЭИ, представляющей более или менее обычное решение указанных задач. Она состоит из двух гасительных разрывов — верхнего и нижнего, помещенных в общий цилиндр 1 из бакелизированной бумаги. В стенки этого цилиндра встроены конденсаторы 2, служащие для выравнивания напряжения на разрывах. Верхние и нижние торцы бакелитового цилиндра снабжены фланцами 3 для прикрепления к ним металлических цилиндров 4. Эти цилиндры играют роль токопроводящих связей между линейными выводами и неподвижными контактами и, кроме того, содержат механизмы, приводящие в движение подвижные контакты 5.

В средней части бакелитового цилиндра встроена металлическая втулка 6, к которой крепятся неподвижные контакты 7, она же имеет продольные каналы для пропуска свежего воздуха в верхнюю часть камеры и три поперечных канала 8 для пропуска раскаленного воздуха из камеры наружу. Трубка 9 объединяет неподвижные контакты в один узел, что позволяет очень легко вынимать их для осмотра из камеры. Кроме выброса раскаленного воздуха в центре камеры предусмотрена возможность выхода его через полости подвижных контактов вверх и вниз камеры. Свежий воздух поступает в камеру через патрубок 10.

Применением бакелитового цилиндра решается вопрос о механической прочности камеры с сохранением необходимой для нее высокой электрической прочности. С целью же защиты бакелитового цилиндра от атмосферных влияний (главным образом, от сырости, которая вредно сказывается на изолирующих качествах подобных материалов), а также ввиду необходимости обеспечить для камеры в целом мокроразрядные характеристики, соответствующие данному классу напряжения, цилиндр помещен в кожух, составленный из двух фарфоровых изоляторов 11.

Контактная часть камеры состоит помимо обычных токопроводящих связей из двух разъемных контактов 5 и 7, нижнего и верхнего, представляющих так называемый торцевой контакт, и двух скользящих контактов 12, также верхнего и нижнего. Скользящие контакты устанавливают токопроводящую связь между металлическими цилиндрами 4 и подвижными контактами 5.

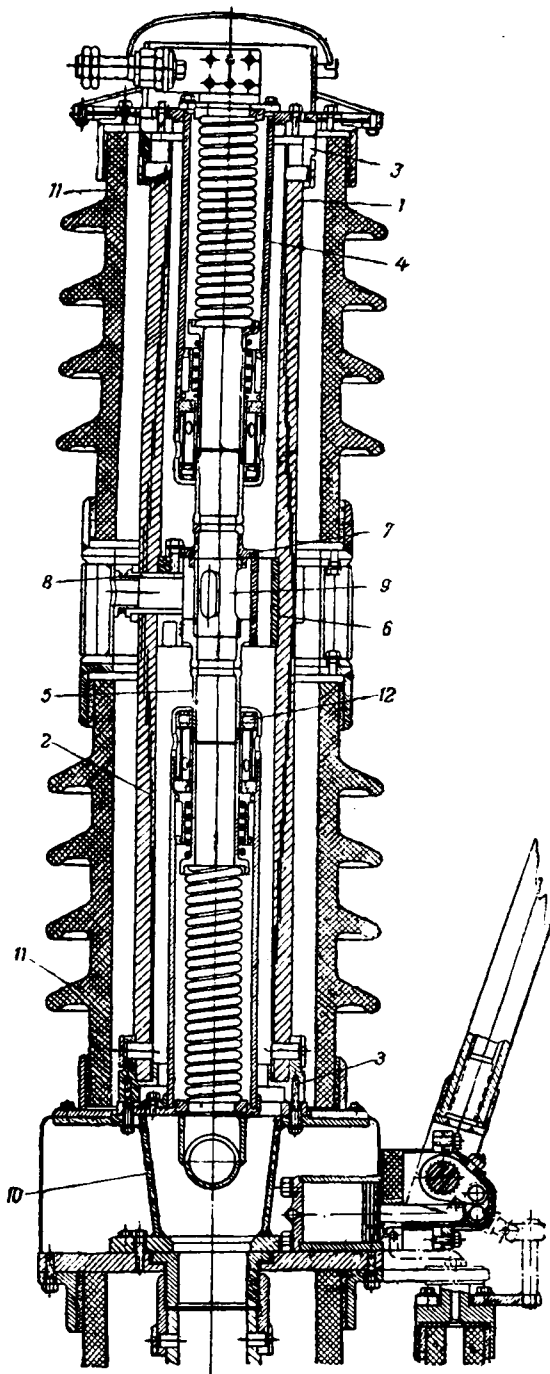


Рис. 7. Разрез камеры опытного воздушного выключателя ВЭИ.

1—цилиндр из бакелизированной бумаги; 2—конденсаторы; 3—фланцы; 4—цилиндры; 5—контакты; 6—втулка; 7—контакты; 8—канал; 9—трубка; 10—патрубок; 11—фарфоровый изолятор; 12—скользящие контакты.

Осмотр и замена контактов осуществляются путем последовательного выема из камеры сначала верхнего цилиндра 4 с его подвижным контактом, затем двух средних контактов и, наконец, через отверстие во втулке 6 нижнего подвижного контакта.

Испытания этой камеры проводились как в лабораторных условиях, так и непосредственно в действующей энергосистеме Мосэнерго. Максимальный ток, отключенный камерой при фазовом напряжении (64 kV), приложенном к ее выводам, достигал 12 600 А, а при линейном (110 kV)—12 000 А.

Время горения дуги не превышало 0,015 sec. Опыты показали, что мощность, отключенная камерой, в трехфазном режиме составляет 2 400 тыс. kVA. Характер работы камеры в момент отключения и ее состояние показывают, что эти величины для нее не являются пределом. Осмотр контактов показал их хорошее состояние и полную пригодность к дальнейшей работе.

**Выводы.** 1. Применение полых контактов для гасительных камер воздушных выключателей высокого напряжения себя полностью оправдало.

2. Конструкция гасительных элементов с полыми контактами позволяет обеспечить нормальную работу камеры в условиях больших скоростей восстанавливающегося напряжения.

3. Применение полых контактов позволяет регулировать диэлектрическую прочность дугового промежутка в определенных пределах и тем самым ограничить коммутационные перенапряжения, создаваемые выключателем при гашении малых токов, до пределов, допустимых уровнем изоляции электрической установки.

4. Конструкция контактов в виде полых труб настолько хорошо показала себя в смысле сохранности контактных частей, что исключается необходимость в частой их ревизии, даже после отключения самых тяжелых случаев короткого замыкания.

5. Механизм подвижных контактов, примененный в камере, оправдал себя в смысле сокращения длительности горения дуги до минимальной величины и создания достаточной величины давления в камере к моменту размыкания контактов. Оба эти фактора весьма способствуют обеспечению хорошей работы камеры.

6. Механизм, о котором шла выше речь, позволил избежать в конструкции камеры больших и громоздких пружин, усложняющих устройство.

7. Камера в целом может служить образцом для разработки и выпуска промышленной серии воздушных выключателей высокого напряжения, ибо она по своим качественным показателям удовлетворяет требованиям энергосистем.

Автор считает своим долгом отметить большое внимание, проявленное к данной работе доктором техн. наук проф. Ю. В. Буткевичем, советы и указания которого во многом способствовали успеху работы над созданием высоковольтного воздушного выключателя.



# К итогам испытаний воздушного выключателя на 110 кV в энергосистеме

Инж. И. С. Трухманов

Мосэнерго

В октябре 1945 г. на одной из подстанций системы Мосэнерго происходили при участии автора испытания одной фазы воздушного выключателя конструкции ВЭИ на 110 кV с разрывной мощностью  $2\,500 \cdot 10^3$  кVA. Испытаниям предшествовала длительная тридцатидневная подготовка сетей районов. Были тщательно проверены все элементы схемы испытания. В результате проведенной предварительной работы все 8 опытов короткого замыкания прошли успешно, без каких-либо нарушений нормальной работы сетей.

При испытаниях проверялась отключающая способность гасительной камеры выключателя, включаемого в расщелку фазы одной из линий электропередачи 110 кV. Токи короткого замыкания регулировались реактивными сопротивлениями линий от 1 400 до 12 600 А. В процессе испытания однополюсные короткие замыкания при фазовом напряжении 66 кV чередовались с двухполюсными короткими замыканиями при междупазовом напряжении 115 кV, чем проверялась работа камер в наиболее тяжелых условиях, возможных в сети 110 кV. При семи опытах включения схемы короткого замыкания производилось защитным масляным выключателем, а отключение — испытуемым воздушным. Один опыт был произведен на «включение — отключение»; включение на существующее короткое замыкание и последующее отключение осуществлялись испытуемым воздушным выключателем. При последнем опыте междупазовое напряжение было 110 кV, а ток короткого замыкания 12 400 А.

Во всех восьми случаях испытуемый выключатель справился легко с отключением тока короткого замыкания и показал следующие результаты: 1) максимальный отключаемый ток — 12 600 А (предельный для схемы испытания); 2) собственное время отключения— $0,07 \div 0,08$  sec; 3) длительность горения дуги— $0,01 \div 0,015$  sec; 4) наибольшее восстанавливающееся напряжение 110 кV; 5) наибольшая скорость восстановления напряжения — около  $500$  V/ $\mu$  sec; 6) собственное время включения —  $0,28$  sec (для

*Изложены результаты испытаний в системе Мосэнерго воздушного выключателя высокого напряжения конструкции ВЭИ. Подчеркнуты преимущества воздушных выключателей: большая отключающая способность, быстрдействие, возможность применения сверхбыстрдействующего АПВ для линий, не защищенных тросом, а также простота ухода, снижение эксплуатационных расходов и первоначальных затрат на подстанции.*

быстрдействующих автоматов повторного включения оно может быть снижено до  $0,06$  sec).

Осмотр камеры и контактов выключателя показал, что значение тока (12 500 А) не является пре-

делом отключающей способности камеры. После всей серии опытов короткого замыкания на рабочей поверхности контактов были обнаружены лишь незначительные оплавления. На внутренней поверхности гасительной камеры дуга не оставила следов. Длительность горения дуги составляла  $0,01—0,015$  sec, не проявляя тенденций к увеличению.

Собственное время отключения воздушного выключателя оказалось на  $0,02$  sec больше проектного. Это отклонение можно будет легко устранить путем некоторого усовершенствования отключающих катушек и, таким образом, довести общее время отключения до  $0,05$  sec.

Приведенное краткое изложение результатов испытания показывает, что разработанный воздушный выключатель является именно тем аппаратом, в котором так остро нуждаются сейчас наши мощные энергетические системы, в особенности в связи с новым пятилетним планом восстановления и развития народного хозяйства.

Потребность в таком воздушном выключателе вызвана не только резким сокращением производства выключателей высокого напряжения 110 и 220 кV во время войны, но также серьезными затруднениями эксплуатации мощных энергетических систем, обусловленными дефектами масляных выключателей.

Одно из наиболее узких, трудно устранимых в настоящее время, мест в эксплуатации мощных энергосистем Союза остается существующее несоответствие между отключающей способностью масляных выключателей высокого напряжения и величинами токов короткого замыкания в местах их установки. Это несоответствие, как правило, имеет место в наиболее ответственных узлах наших мощных энергетических систем (например, в системе Мосэнерго) на напряжения 110, 30 и 6 кV. Ограниченная отключающая способность выключателей, с одной стороны, сковывая схему, лимитирует оператив-

ные возможности. С другой стороны (до замены или модернизации масляных выключателей) она влечет за собой необходимость создания искусственных, вынужденных схем — деление 110-kV системы, секционирование шин станции и подстанции на напряжения 30 и 6 kV и применение сложных автоматических делительных устройств, не всегда оправдывающих себя в эксплуатации. Обычно эти мероприятия приходится реализовать на действующих электростанциях и подстанциях, что связано с расходами, значительно превышающими стоимость строительства новых объектов. Ввиду отсутствия возможности прерывать электроснабжение потребителей, эти работы производятся весьма медленно и ко времени их окончания поставленные цели уже не достигаются.

Выключатели серии МКП-160 не проверялись на маркированную разрывную мощность  $2\,500 \cdot 10^3$  kVA, если не считать отключение отдельных коротких замыканий на шинах. И они не могут гарантировать надежной работы в условиях предстоящего большого роста мощностей.

Испытанный воздушный выключатель надежно отключил мощность  $2\,400 \cdot 10^3$  kVA, притом эта величина не является для него предельной. Следовательно, внедрение в эксплуатацию этого выключателя, а вслед за ним еще более мощных выключателей данного типа, поможет преодолеть несоответствие между возможными токами короткого замыкания и отключающей способностью даже в условиях ввода новых мощностей.

Вторым узким местом в работе наших мощных энергетических систем в настоящее время является несоответствие между полным временем отключения короткого замыкания, имеющим место в системах, и временем отключения, требуемым по условиям сохранения системой динамической устойчивости. По данным Мосэнерго за 1940 г. требуемое время отключения короткого замыкания не должно превышать 0,3 sec при коротких замыканиях у шин станций и крупных подстанций. Учитывая же в перспективе развитие и ввод новых мощностей (приближение к пределу передаваемой мощности), нужно ожидать требования некоторого снижения приведенной величины до 0,1 sec для напряжения 220 kV, 0,15—0,2 sec для 110 kV и 0,25—0,3 sec для напряжения 30 kV, что соответствует данным американских систем.

Существующее же положение таково, что даже при современном высоком уровне развития техники релейной защиты для некоторых случаев короткого замыкания, например, на шинах подстанций или (отключение от дифференциальной защиты шин) на линиях электропередачи, защищенных разрядниками, время отключения превышает 0,3 sec. Причиной этому является то, что важнейшие выключатели системы — типа МКП-274, МКП-160 — имеют собственное время отключения 0,15 sec и в сумме с временем действия защиты шин (0,19 sec) или защиты линий с разрядниками (0,18 sec) дают время отключения, превышающее допустимое по

условиям, сохранения динамической устойчивости не только для сетей 220 kV, но и сетей 110 kV. Возможности снижения времени действия защит при существующей релейной аппаратуре весьма ограничены. Единственным радикальным способом обеспечения требований динамической устойчивости систем является поэтому ускорение действия высоковольтных выключателей или широкое внедрение новых быстродействующих выключателей.

Третьим узким местом эксплуатации энергосистем является наличие (при всех напряжениях) элементов с неполноценной противогрозовой защитой в виде линий 110 kV (в последнее время и 220 kV), незащищенных тросом. Защита этих линий с помощью трубчатых разрядников заставляет отстраивать от их действия релейную защиту, за счет чего несколько увеличивается время отключения аварии. В то же время даже при наибольшем насыщении линий разрядниками не устраняется полностью возможность автоматических отключений от гроз, что для межсистемных связей напряжения 220 kV в наиболее неблагоприятных случаях грозит потерей синхронизма между различными частями системы.

Мощным средством повышения надежности работы таких линий с односторонним питанием является автоматическое повторное включение, а для линий с двухсторонним питанием — сверхбыстродействующее автоматическое повторное включение.

В эксплуатацию энергосистем в настоящее время внедряют автоматическое повторное пофазное включение, позволяющее при проходящих повреждениях на линии удержать систему в синхронизме за счет остающихся между станциями связей по двум фазам, даже при условии повторного включения в работу поврежденной фазы через 1 sec.

Это мероприятие, являющееся хорошим средством защиты линий, не защищенных тросом, требует солидных затрат, большой переделки выключателей и, кроме того, оно не совсем благоприятно для генераторов. Так, на существующих выключателях устанавливаются вместо одного три менее мощных привода. Это требует переделки включающего механизма и установки дополнительной поддерживающей конструкции. Схема автоматики для выбора поврежденной фазы и повторного включения ее — сложная и дорогая.

Практика американских систем показывает, что при отключении транзитной линии менее чем в 0,15 sec и при общем времени повторного включения, превышающем 0,35 sec, в подавляющем большинстве случаев удается удержать систему в синхронизме, так что в этих случаях необходимость в пофазном автоматическом повторном включении отпадает<sup>1</sup>. Воздушный выключатель ВЭИ имеет собственные времена отключения 0,07 sec и включения 0,28 sec. В слу-

<sup>1</sup> Это утверждение автора является спорным. Редакция.

чае необходимости повторного включения время может быть значительно снижено за счет блокировки команды на отключение разъединителя и осуществления включения непосредственно контактами гасительной камеры.

Следует еще иметь в виду, что воздушный выключатель ВЭИ имеет пофазное управление и в случае необходимости может работать и по такому принципу управления.

Применение сверхбыстродействующего повторного включения, позволяя довести надежность работы линий любого напряжения, не имеющих защиты от прямых ударов, до уровня надежности линий, защищенных тросом, дает возможность сэкономить большие средства и избавляет от необходимости производства трудоемких работ по подвеске троса на работающих незащищенных линиях. При возникновении во время грозы на линии, не защищенной тросом, переходящих повреждений линия с предельной скоростью (0,1—0,08 sec) будет отключена воздушным выключателем. Одновременно автоматом будет дана команда на включение с выдержкой времени, необходимой для деионизации пространства в месте повреждения ( $t = 0,14 - 0,3$  sec).

Быстрое отключение короткого замыкания ограничивает возможность повреждения изоляции или провода дугой в виду малой вероятности устойчивости дуги. Приведенное в действие устройство автоматического повторного включения по истечении времени, необходимого для деионизации, включает в работу линию, которая остается в работе. Таким образом, внедрение воздушных выключателей со сверхбыстродействующим повторным автоматическим включением в корне изменяет и улучшает способы эксплуатации линий высокого напряжения и их грозозащиту, а также обещает значительное удешевление строительства и эксплуатации линий.

Анализируя опыт эксплуатации отечественных масляных выключателей высокого напряжения серии МКП на 110, 220 kV и сравнивая их с прошедшим испытанием воздушным выключателем ВЭИ, можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Выключатель с большим объемом масла даже при наличии камеры может взорваться при перекрытии изоляции в баке (траверзы или втулки), и тогда пожар неизбежен. Это заставляет производить ряд капитальных работ по устройству аварийных маслопроводов и гравийных подсыпок на территории, где устанавливается выключатель.

В воздушном выключателе, в котором дугогасящей средой является сжатый воздух и в котором совершенно нет опасных в пожарном отношении материалов, этот недостаток устранен.

2. Наличие масла, в особенности больших количеств (выключатели 110 kV — 12 т, 220 kV — 51 т), требует от эксплуатирующего персонала много внимания, как-то: наблюдения за уровнем масла, доливки и отливки два раза в год, очистки и восстановления масла при каждой очередной ревизии или после отключений короткого замы-

кания, когда масло загрязняется углем. Кроме всего прочего наличие масла значительно увеличивает простой оборудования в ремонте. В воздушном выключателе эти недостатки отсутствуют.

3. Герметически закрытые баки исключают возможность осмотра контактов при производстве внешней ревизии масляного выключателя без слива масла. Наиболее ответственные части выключателя — контакты, гасительные камеры, изоляция траверзы и направляющего механизма — недоступны для осмотра без этой операции. Операция по сливу масла не укладывается в регламент времени выключения для внешней ревизии. Воздушный выключатель, конструкция которого значительно проще, позволяет в течение отрезка времени, отводимого на внешнюю ревизию (8h), произвести не только тщательный осмотр всех ответственных элементов, но даже провести полную ревизию с заменой контактов, в случае такой необходимости.

4. Торцевые контакты масляных выключателей для обеспечения надежной работы требуют частых ревизий со вскрытием: в нормальных условиях — один <sup>2</sup> раз в год, в аварийных — после двух коротких замыканий.

Ревизия масляного выключателя типа МКП-160 и МКП-274 представляет собой, как известно, трудоемкий процесс.

Весьма трудной и ответственной операцией является регулирование масляного выключателя, занимающее даже у наиболее квалифицированных монтеров 1—2 бригадо-дня. Весь же процесс ревизии выключателей 110 kV требует 4 ÷ 5 бригадо-дней, а выключателей 220 kV — 9 ÷ 11 бригадо-дней.

Контактная система воздушного выключателя конструкции ВЭИ (торцового типа с сильно развитыми поверхностями) значительно проще и надежнее. Это полностью выявилось при проведенных испытаниях. После отключения восьми коротких замыканий рабочие поверхности контактов были так мало изношены, что при небольшой зачистке оплавлений (и даже без нее) выключатель мог бы работать. Благодаря простоте устройства гасительной камеры воздушного выключателя контактная система легко доступна. Зачистку рабочих поверхностей контактов или замену контактов в выключателе 110 kV можно произвести в течение одного бригадо-дня во всех трех фазах. При этом контакты не требуют регулировки. По простоте обслуживания и производства ревизий воздушный выключатель, таким образом, значительно превосходит масляный, сокращая время ревизии в 6 раз.

5. Высоковольтные выводы масляных выключателей, выполненные в виде простых маслонеполненных или конденсаторных вводов, требуют от эксплуатирующего персонала большого внимания. Наблюдение за ними состоит в систематическом осмотре фарфора, взятии проб масла,

<sup>2</sup> Практика военного времени проведения ревизии один раз в два года себя не оправдала.

ежегодных профилактических испытаниях в виде определения тангенса угла диэлектрических потерь ввода, ревизии уплотнения и замены масла в случае необходимости.

Размеры и вес вводов для масляных выключателей при напряжении 110 и 220 кВ так велики (500—2 500 кг), что замена ввода производится при помощи специальных такелажных приспособлений (стрел, полиспастов, лебедок) многочисленной бригадой (8—10 квалифицированных монтеров).

Воздушный выключатель имеет две фарфоровые рубашки на фазу, защищающие бакелитовые воздухоподвод и гасительную камеру, и колонку из стандартных опорных изоляторов. Узлы воздушного выключателя выполнены съемными и замена их может быть произведена бригадой из 3—4 квалифицированных монтеров с помощью легкого веревочного полиспаста.

6. Конструкции и размещение трансформаторов тока у масляных выключателей типа МКП-160 и МКП-274 таковы, что ремонт или замену трансформатора тока невозможно произвести без выемки маслонаполненных вводов—работы весьма трудоемкой и требующей последующей полной ревизии масляного выключателя. Длительность работы по замене втулок составляет 10—13 бригадо-дней.

Воздушный выключатель нуждается в отдельных маслонаполненных восмерочных трансформаторах тока типа ТФНД, и замена трансформаторов тока требует не более одного бригадо-дня.

7. Наличие в масляном выключателе деталей из органической изоляции (тяги траверсы, направляющие механизмы, экраны) и маслонаполненных вводов заставляет вести тщательный контроль за их состоянием путем профилактических испытаний.

Для воздушного выключателя, если его бакелитовый воздухоподвод заменить стеатитом, необходимость частых профилактических испытаний отпадает, так как основные его элементы доступны повседневному осмотру.

8. Приводы масляных выключателей 110 и 220 кВ (ПС-30 и ПВМ-108) требуют наличия на подстанции мощной аккумуляторной батареи (ток соленоида включения равен 470 А). Большое усилие, развиваемое приводом, и вес масляного выключателя (25—100 т) требуют солидного фундамента и надежного крепления. Воздушный выключатель, работающий от пневматического привода, может включаться при наличии маломощной аккумуляторной батареи. При собственном весе, не превышающем 2 000 кг на фазу, и при отсутствии каких-либо усилий воздушный выключатель может устанавливаться на подожнике обычного разъединителя 110 кВ.

9. Одним из весьма существенных и мало изученных недостатков масляных выключателей серии МКП-160 является возникновение перенапряжений при отключении ими емкостных токов длинных линий, например в системе Мосэнерго.

При отключении холостой линии 110 кВ в процессе гашения дуги емкостного тока имели место перенапряжения, пробивавшие искровые промежутки трубчатых разрядников 110 кВ. Этому сопутствовало короткое замыкание и, как следствие этого, образование больших давлений в камерах, приводивших к аварии самого масляного выключателя.

Испытанный воздушный выключатель имеет время горения дуги не выше 0,015 сек, в течение которого не могут развиваться перенапряжения опасной величины (вызванные гашением дуги емкостного тока). Быстрое гашение дуги предотвращает возможность повторных зажиганий дуги и нарастания напряжения на отключаемой холостой линии.

Что касается возможности возникновения перенапряжений опасной величины при отключении холостых трансформаторов, то это явление должно быть предметом исследования.

Приведенное выше сравнение особенностей существующих масляных выключателей и воздушного выключателя системы ВЭИ позволяет утверждать, что, несмотря на необходимость введения новых элементов в состав подстанционного хозяйства (компрессорной установки, влагопоглотителя, дросселя давлений воздухопроводов), воздушный выключатель является значительно более выгодной конструкцией. При оборудовании подстанций воздушными выключателями отпадает необходимость в мощных батареях с их зарядными устройствами и вентиляцией, снижается сечение кабелей вторичной коммутации, упрощается строительная часть за счет облегчения фундаментов и уменьшения габаритов конструкций, отпадает необходимость в противопожарных устройствах. Все это дает выигрыш в первоначальных капиталовложениях, на много превосходящий стоимость установок сжатого воздуха.

Для экономичной и надежной эксплуатации развивающихся мощных энергосистем Советского Союза сейчас нужны мощные быстродействующие выключатели высокого напряжения. Образцом таких выключателей является предложенный ВЭИ и испытанный в системе Мосэнерго воздушный выключатель на 110 кВ. Наша же отечественная электропромышленность может и должна в ближайшее время удовлетворить потребность энергосистем в таких выключателях.

Нужно форсировать внедрение на наших заводах массового производства воздушных выключателей высокого напряжения системы ВЭИ на 110 кВ.

Желательно, чтобы ВЭИ в ближайшее же время разработал макеты воздушных выключателей на 35 и 220 кВ.

Живая творческая связь между заводами, научно-исследовательским институтом и энергосистемами позволит разрешить задачу обеспечения наших электростанций и сетей в новой пятилетке мощными и технически совершенными выключателями.





# Выключатель с твердым газогенерирующим веществом 6—10 кВ, 200—300 тыс. кВА

Доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич и инж. А. М. Бронштейн

Всесоюзный электротехнический институт

Масляные выключатели для потребительских сетей относительно небольшой разрывной мощности — 100—300 тыс. кВА и на напряжения 6—10 кВ представляют

дешевые и простые аппараты. Имеются все же серьезные тенденции применять в этих установках безмасляные выключатели. Это объясняется желанием повысить надежность и безопасность работы высоковольтных установок, освободиться от масляного хозяйства и некоторыми другими соображениями.

Наиболее совершенным типом безмасляного выключателя следует считать воздушный выключатель с шунтирующими сопотивлениями. Однако, его нельзя рекомендовать как основную конструкцию для потребительских сетей ввиду его высокой стоимости и необходимости применения индивидуальных компрессорных установок, вследствие разбросанности точек установки выключателей.

Высокая стоимость и сложность изготовления также ограничивают широкое применение выключателей с магнитным гашением дуги. Тем не менее, в ряде случаев, где технологический процесс сопровождается частыми коммутационными операциями (несколько десятков раз в сутки, например, в печных установках), выключатель с магнитным гашением дуги ввиду его устойчивости на многократные срабатывания стоит вне конкуренции.

Нам кажется бесспорным, что из безмасляных конструкций наиболее пригодным и рентабельным для массового применения в потребительских сетях может явиться выключатель с твердым газогенерирующим веществом. Наши разработки показали, что можно создать конструкцию этого типа выключателей более устойчивую, чем масляные в отношении допустимой кратности срабатывания без ревизий, как при отключении аварийных, так и рабочих токов. Газогенерирующий выключатель прост в изготовлении, не требует специального наблюдения и не чувствителен к высоким собственным скоростям восстановления напряжения установок.

*Рассматриваются результаты работ ВЭИ в области газогенерирующих выключателей. На основе изучения процессов гашения дуги и испытания выключателей этого типа в лаборатории разрывных мощностей предлагаются рациональные системы дугогасительных камер, а также конструкция выключателя 6—10 кВ на разрывную мощность до 200—300 тыс. кВА.*

На основании исследований, проведенных в ВЭИ еще до войны, было установлено [Л. 1], что полиметилметакрилат, освоенный химической промышленностью под названием

«органическое стекло», является неплохим материалом для осуществления дугогасительных камер. На основе этого материала были разработаны и освоены в нашей электропромышленности такие аппараты, как разъединители мощности [Л. 2] и трубчатые разрядники [Л. 3].

Органическое стекло обладает высокой дугогасящей способностью при небольшом удельном расходе газогенерирующего вещества на 1 кВт/сек энергии дуги, высокой электрической и механической прочностью. К недостаткам органического стекла, как дугогасящего материала, следует отнести низкую его термическую устойчивость и образование большого количества свободного углерода, ухудшающего поверхностную электрическую прочность. Изыскания более совершенных дугогасящих материалов проводятся в настоящее время ВЭИ.

Однако, несмотря на некоторые недостатки органического стекла, на базе этого дугогасящего вещества удалось весьма успешно разрешить задачу построения выключателя на напряжение 6—10 кВ с разрывными мощностями до  $300 \cdot 10^3$  кВА.

**Условия гашения дуги в газогенерирующих отключающих устройствах.** Предварительные исследования условий гашения дуги в газогенерирующих камерах показали, что продольное дутье применительно к условиям отключения больших мощностей следует считать нерациональным способом гашения дуги [Л. 4]. Последующими экспериментами было установлено весьма эффективное действие поперечного дутья газового потока при наличии щелей, стенки которых осуществляются также из газогенерирующего материала.

Наблюдения показали, что существенный эффект при гашении дуги в газогенерирующем выключателе может быть достигнут за счет исполь-



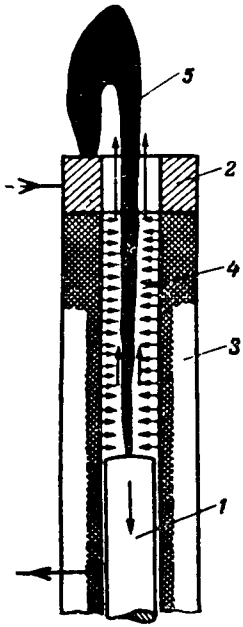


Рис. 1. Трубчатая камера с продольным дутьем.  
1, 2—подвижный и неподвижный контакты; 3—газогенерирующая трубка; 4—элементарный поток газа; 5—дуга.

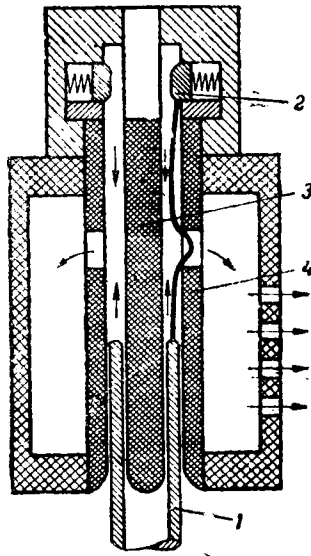


Рис. 2. Камера выключателя АЕГ с кольцевой щелью.  
1, 2—подвижный и неподвижный контакты; 3, 4—газогенерирующие стержень и трубка.

зования элементарных газовых потоков, выбрасываемых стенками камеры в момент прохождения тока через его нулевое значение, и восстановления напряжения на промежутке. Использование этих турбулентных элементарных газовых потоков, очевидно, будет тем интенсивнее, чем в более тесное соприкосновение войдет деионизируемая зона дуги со стенками из газогенерирующего вещества.

Рассмотрим с этой точки зрения простую трубку, где дуга возникает вдоль канала при отходе подвижного контакта вниз, как показано на рис. 1. Допустим, что выброс газов происходит только вверх, т. е. в выхлопное отверстие, а стержень заполняет все сечение канала. За счет нагревания стенок трубки раскаленными газами и излучением дуги происходит бурное выделение газов со всей поверхности трубки. Эти элементарные газовые потоки выбрасываются нормально к поверхности трубки, проникают в зону дугового столба, завихряются и вызывают энергичное перемешивание ионизированных газов с неионизированными, тем самым создавая отбор энергии и деионизацию. Выделению газов стенками трубки сопутствует также повышение давления в ней, что весьма существенно с точки зрения электрической прочности газа. Когда ток подходит к своему нулевому значению, мощность дуги спадает до нуля и газовыделение стенок может продолжаться только за счет их предшествующего нагрева и подогревания остающимися продуктами дуги. В период нулевой паузы тока в трубке может быть лишь незначительное давление. Деионизирующее действие продольного потока газов здесь не может

быть существенным. Это станет понятным, если учесть, что в зоне канала, примыкающей к подвижному контакту, скорость потока вообще близка к нулю. Таким образом, можно допустить, что в дугогасительной системе по рис. 1 основную роль в деионизации дугового промежутка играют радиальные элементарные потоки газа, выбрасываемые стенками трубки в период восстановления напряжения. Действие этих потоков в данном случае может быть существенным при достаточно малом диаметре канала. Малый же канал неосуществим при больших отключаемых токах, во-первых, вследствие очень больших давлений, возникающих при максимуме тока, и, во-вторых, из-за необходимости обеспечить достаточное сечение подвижного контакта.

Была сделана попытка разрешить изложенное противоречие путем применения кольцевой щели. Эта конструктивная идея реализована в газогенерирующем выключателе АЕГ (рис. 2). В данном решении подвижный контакт осуществлен в виде тонкостенной трубки (2—2,5 мм), перемещающейся между газогенерирующей трубкой и стержнем. Таким образом, достигаются условия, при которых обеспечивается более тесное прикосновение дуги со стенками газогенерирующего вещества при достаточно большом сечении подвижного контакта. Конструктивное решение АЕГ для отключения больших мощностей нельзя, однако, признать совершенным: дуга при больших токах затягивается до 6—8 полупериодов, дугогасящий материал быстро выгорает, также быстро изнашивается подвижный контакт вследствие малой толщины стенки металлической трубки.

Заметного улучшения продольного дутья при гашении мощных дуг можно достигнуть при помощи буферных резервуаров, аккумулирующих газ, как это было показано на трубчатых разрядниках инж. М. М. Акодисом [Л. 5].

Не входя в детали этого принципа, заметим, что согласование условий успешного гашения как больших, так и малых токов при продольном дутье весьма затруднено и при наличии буферного объема.

Гипотеза о существенном влиянии на процесс гашения дуги переменного тока элементарных турбулентных потоков газа, выбрасываемых газогенерирующим веществом, подсказывает, что особенно рациональное решение вопроса должно дать поперечное дутье. Этот факт был нами установлен достаточно четко.

Схема поперечного дутья дана на рис. 3. В камере А расходятся контакты и образуется дуга. Возникающие от разложения стенок газы заполняют камеру и устремляются в выхлопную щель В, пересекая на своем пути дуговой столб и увлекая его в щель. Дуговой столб приводится, таким образом, в тесное соприкосновение со стенками щели в области, отмеченной пунктиром. Если поперечный газовый поток окажется достаточным и в период восстановления напряжения на промежутке, то ионизированная зона и это время будет в тесном соприкосновении со стен-

ками, продолжающими выбрасывать газы за счет предварительного их подогрева дугой и нагревания остаточными продуктами. Следовательно, будет обеспечена интенсивная деионизация промежутка. Очевидно, сохранение поперечного дутья на достаточном уровне может быть обеспечено при условии создания в камере надлежащего буферного объема, где могли бы накапливаться газы во время горения дуги.

Весьма существенное влияние на процесс разрыва дуги оказывает поддержание давления в зоне деионируемого промежутка во время восстановления напряжения на нем. Поддержанию давления сильно способствует буферный объем в камере.

На рис. 4 представлены осциллограммы отключения токов короткого замыкания камерами с поперечным дутьем, когда буферный объем в камере был весьма небольшим (а) и когда этот объем был сильно увеличен (б). Можно видеть, что в первом случае (а, рис. 4) давление в камере падает почти одновременно с током, и в момент восстановления напряжения избыточное давление спадает практически до нуля. Во втором случае (б, рис. 4) давление во время восстановления напряжения сохраняется на довольно высоком уровне и спадает относительно медленно.

Еще более наглядную иллюстрацию роли давления в момент восстановления напряжения дают катодные осциллограммы напряжения на промежутке. На рис. 5 приведены две таких типичных осциллограммы в случае периодического и аperiodического процесса для камеры с малым буферным объемом. Осциллограммы наглядно показывают, что повторные зажигания дуги наступают не на подъеме напряжения, а спустя значительный промежуток времени, достигающий сотен микросекунд (300—1 000  $\mu$  sec), т. е. когда переходный процесс заканчивается полностью. Такое положение может быть объяснено только тем, что давление в промежутке понизилось слишком быстро, когда температура газа еще не успела спасть. Гашение дуги могло бы, безусловно, наступить в точке А (рис. 5), так как рост диэлектрической прочности при восстановлении напряжения был в этой точке вполне обеспечен. Однако повторный пробой промежутка был бы исключен только при том условии, если давление в камере поддерживалось бы еще некоторое время (500—1 000  $\mu$  sec) на уровне 3—5 at (избыточных).

На основании проведенных исследований можно утверждать, что наиболее эффективно действующее дугогасящее устройство может быть получено на основе разумного сочетания эффекта элементарных потоков газов, выбрасываемых стенками газогенерирующего вещества, и давления газов в период восстановления напряжения. Такое сочетание наилучшим образом достигается в дугогасительных камерах с поперечным дутьем, когда стенки щелей выполнены из газогенерирующего вещества.

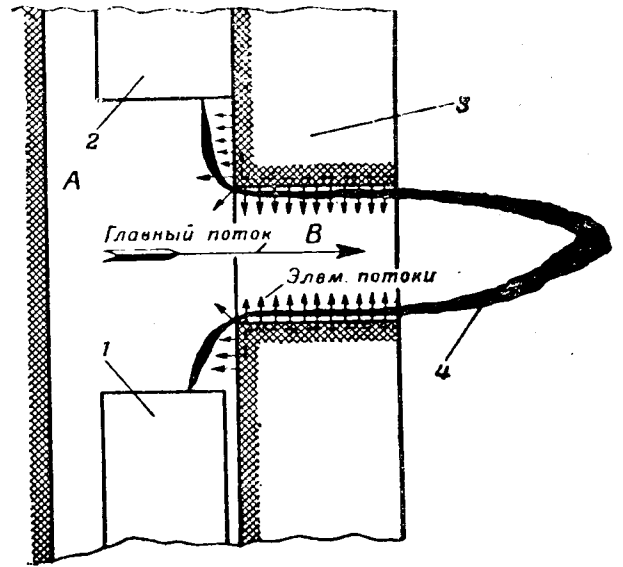


Рис. 3. Схема камеры поперечного дутья.  
1, 2—подвижный и неподвижный контакты; 3—газогенерирующая стенка; 4—дуга; А—камера; В—выхлопная щель.

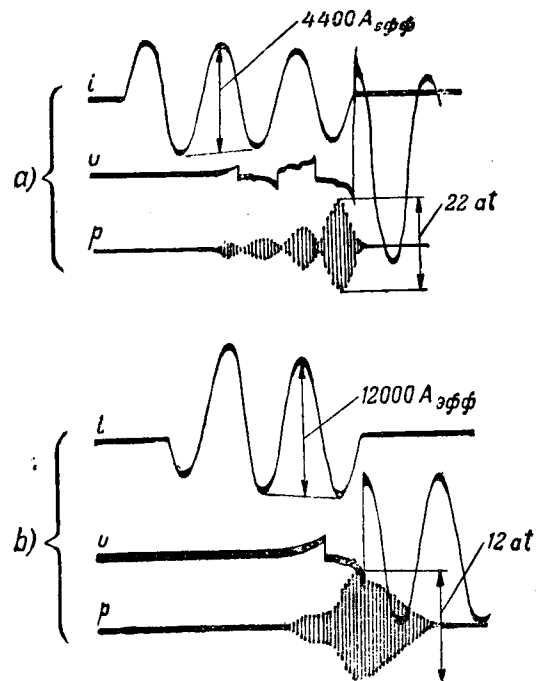


Рис. 4. Осциллограммы отключения токов короткого замыкания камерой с поперечным дутьем.  
а—буферный объем мал; б—буферный объем сильно увеличен (i—ток, u—напряжение на промежутке; p—давление).

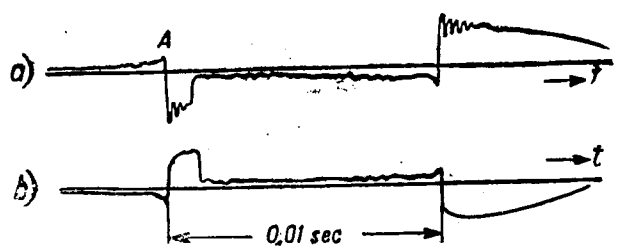


Рис. 5. Катодные осциллограммы восстановления напряжения в камере с малым буферным объемом.

Собственные скорости восстановления напряжения сети и газогенерирующий выключатель. Многочисленные наблюдения, проведенные с катодным осциллографом, показывают, что выключатель ВЭИ с твердым газогенерирующим веществом обладает слабой чувствительностью к собственным частотам восстановления напряжения. Было установлено, что при собственных частотах порядка 30 кГц и отключаемых токах 5 000 А и выше наступало полное демпфирование собственных колебаний, и процесс восстановления напряжения имел чисто аperiodический характер. Более высоким значениям токов короткого замыкания, отключаемых выключателем, соответствуют более высокие собственные частоты в применяемой нами схеме и поэтому здесь аperiodический процесс и подавно всегда обеспечен.

Попытаемся оценить среднюю величину сопротивления дугового промежутка за период первого подъема напряжения. Представим себе, что наша схема (рис. 6) есть простой одночастотный контур (это близко к действительности).  $L$  и  $C$  — сосредоточенные индуктивность и емкость контура;  $R$  — сопротивление, эквивалентное дуговому промежутку во время восстановления напряжения (остаточное сопротивление).

Применительно к ранее названным критическим значениям токов и частот можно установить величины индуктивности и емкости контура. Опыты велись при напряжении генератора  $U = 6$  кВ. Следовательно,

$$L = \frac{1}{\omega} \frac{U}{I} = \frac{1}{3145000} \frac{6000}{0,004} = 0,004 \text{ Н.}$$

Емкость  $C$  может быть найдена из выражения частоты собственных колебаний контура, т. е. когда  $R$  считаем равным бесконечности:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

откуда

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \approx \frac{1}{(2\pi \cdot 30000)^2 \cdot 0,004} \approx 7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Условие аperiodичности, как известно, гласит:

$$R \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{0,004}{7 \cdot 10^{-9}}} \approx 380 \text{ } \Omega.$$

Этот приближенный расчет показывает, что средняя величина „остаточного сопротивления“ дугового промежутка весьма низка. При восстановлении напряжения в начальный момент в про-

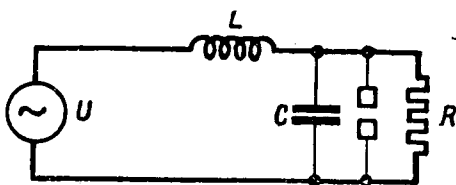


Рис. 6. Эквивалентная схема контура для испытания дугогасительного устройства.

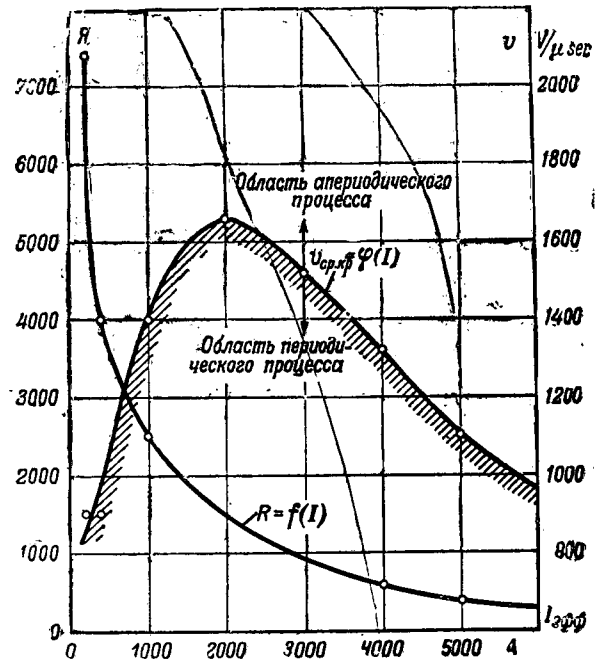


Рис. 7. Остаточное сопротивление  $R$  (среднее значение) за первый подъем напряжения и средняя критическая скорость нарастания напряжения в зависимости от отключаемого тока  $I$ .

межутке должен иметь место значительный ток, достигающий десятков ампер. Судя по величине тока, это — дуговой разряд, но существующий при несоразмерно тонком канале, подверженном активной деионизации.

Будет ли этот ток снижен до нуля или снова разовьется в нормальный дуговой разряд, — это зависит от дальнейшего изменения сопротивления дугового промежутка во время восстановления напряжения на нем. Если сопротивление канала за счет активной деионизации будет продолжать быстро нарастать, то ток этого сопровождающего дугового разряда упадет до нуля и процесс закончится. Если же деионизирующее действие газов окажется недостаточным, то процесс начнет снова быстро развиваться по падающей вольтамперной характеристике, т. е. наступит „пробой“ и установится дуга до следующего прохождения тока через нуль.

Важно отметить, что с уменьшением обрываемого тока остаточное сопротивление довольно быстро увеличивается. При некотором его значении условия аperiodичности уже не соблюдаются. Возникает периодический процесс.

На рис. 7 показана кривая изменения остаточного сопротивления (средняя величина) за первый подъем напряжения, полученная на основании условий аperiodичности или учета затухания амплитуды колебаний (первого пика) в зависимости от величины отключаемого тока [Л. 6]. Можно установить критические значения емкостей, при которых процесс переходит в аperiodический:

$$C_{кр} = \frac{L}{4R^2}.$$

Если расчет проводится для постоянного значения напряжения сети  $U$ , то индуктивность контура есть величина, обратная току:

$$L = \frac{U}{I\omega} \quad (2)$$

и, следовательно,

$$C_{кр} = \frac{U}{4\omega R^2 I} \quad (3)$$

Это выражение дает возможность вычислить критическую емкость контура на основании кривой  $R = f(I)$ . При всех меньших значениях емкостей можно ожидать аperiodического процесса восстановления напряжения.

Интересно также установить критические собственные скорости восстановления напряжения контура, определяемые этими значениями емкостей. Как известно:

$$v_{ср} = 4f_0 \sqrt{2}U,$$

где  $f_0$  определяется из (1).

Подставляя из (1) и (3) в выражение  $f_0$  значение  $C = C_{кр}$  и  $L$ , получим:

$$f_0 = 2f \frac{IR}{U},$$

где  $f$  — частота сети (рабочая).

Для средней критической скорости нарастания напряжения получим:

$$\begin{aligned} v_{ср. кр} &= 4\sqrt{2}U \cdot 2f \frac{IR}{U} \cdot 10^{-6} \approx \\ &\approx 11,3f \cdot IR \cdot 10^{-6} [\text{V}/\mu\text{sec}]. \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 7 показана зависимость  $v_{ср. кр}$  от тока, подсчитанная на основании последнего выражения и данной на той же диаграмме зависимости  $R = f(I)$ . Очевидно, при всех более высоких собственных скоростях восстановления напряжения можно ожидать аperiodического процесса восстановления, т. е. к более высоким скоростям восстановления напряжения газогенерирующий выключатель можно считать нечувствительным. Это является его ценным свойством. Кривая критической скорости восстановления напряжения образует максимум в области  $I = 2000 \text{ A}_{eff}$ .

**Конструкция и рабочие характеристики выключателя ВЭИ.** Устройство дугогасительной камеры, предложенной авторами, показано на рис. 8. Она состоит из двух пластин органического стекла 1, в которых имеется изогнутый прямоугольного сечения паз 5, боковая выхлопная щель 4 и специальные выемки, в которых помещаются сменные вкладыши 2 и заслонки 3, также выполняемые из органического стекла, и неподвижный контакт пальцевого типа.

При сборке камеры обе пластины складываются вместе, накрываются щеками из листового гетинакса и стягиваются плотно железными шпильками. Пазы в обеих пластинах образуют один общий изогнутый по дуге окружности канал, в котором перемещается подвижный контакт

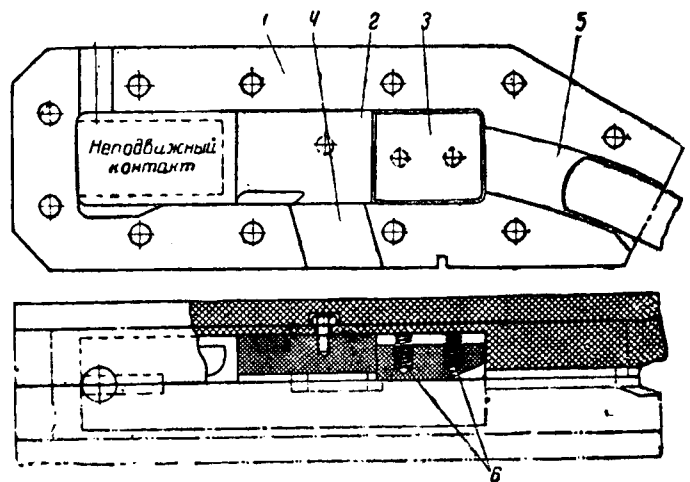


Рис. 8. Дугогасительная камера поперечного дуга выключателя ВЭИ с твердым газогенерирующим веществом.

1 — пластина из органического стекла с боковой выхлопной щелью 4 и с прямоугольным пазом 5; 2 — сменные вкладыши; 3 — заслонка; 6 — пружины.

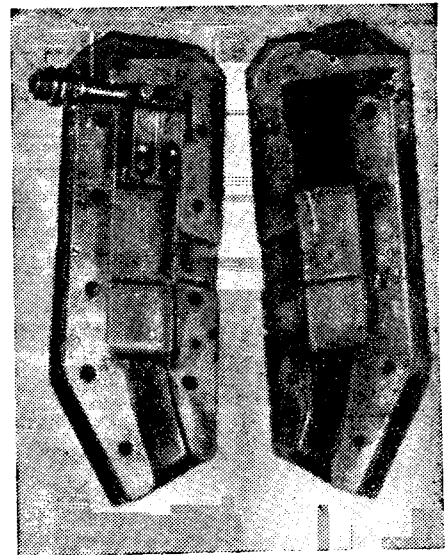


Рис. 9. Фото дугогасительной камеры поперечного дуга выключателя ВЭИ с твердым газогенерирующим веществом.

(нож), представляющий собой отрезок медной шины сечением  $30 \times 6 \text{ мм}^2$ , выгнутой на ребро по соответствующему радиусу. При вытянутом из камеры ноже заслонки 3, под действием пружин 6 прижимаются друг к другу, перекрывая сечение кольцевого паза. Заслонки имеют специальные скосы, они выбраны таким образом, чтобы заслонки легко раздвигались при входе ножа в камеру. Фотография выполненной камеры в разобранном виде показана на рис. 9.

Гашение дуги в камере происходит следующим образом.

При отходе подвижного контакта от неподвижного между ними образуется дуга, температура которой воздействует прежде всего на материал сменных вкладышей, разлагая их на газообразные продукты. Пока конец ножа не достигнет верхнего края боковой выхлопной щели, выход газам из камеры закрыт. Газ собирается в сво-

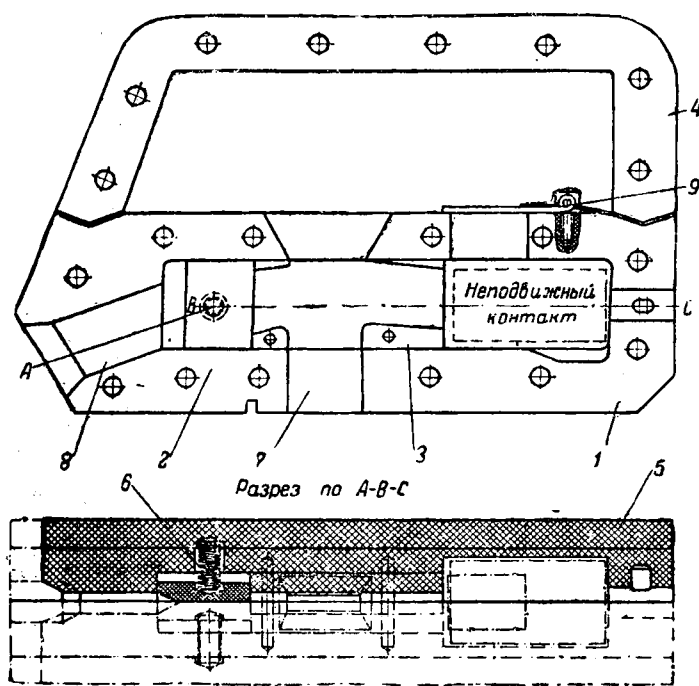


Рис. 10. Конструкция камеры, предложенная инж. А. М. Бронштейном.

1—пластины органического стекла; 2—сменные заслонки; 3—сменные вкладыши; 4—клин; 5—гетинаксовые пластины; 6—пружина заслонки; 7—выхлопная щель; 8—паз; 9—клапан.

бодных объемах камеры и давление в ней растет. Если производится отключение сравнительно большого тока, порядка нескольких тысяч ампер, то до момента открытия выхлопной щели в камере скапливается большое количество газа, давление в ней достигает десяти и больше атмосфер. Как только нож приоткрывает выхлопную щель, в нее устремляются накопившиеся газы, создавая мощный поток, поперечный по отношению к оси дуги. Газовым потоком дуга выносится в выхлопную щель, где она деионизируется и гаснет при ближайшем прохождении тока через нуль.

Скорость ножа и геометрические размеры камеры так согласованы, что открывание выхлопной щели начинается через 0,015 sec после размыкания контактов, что приводит к гашению больших токов (5 000—10 000 А) за время 2—3 полупериодов. Меньшая длительность горения дуги обычно соответствует большим отключаемым токам. При отключении малых токов количество газов до момента открытия выхлопной щели оказывается недостаточным, чтобы создать поперечный поток, могущий погасить дугу. Поэтому дуга вслед за ножом растягивается по длине в канале дугогасительной камеры. При выходе ножа за заслонки они зажимают дугу и гасят ее. Таким образом, в этой дугогасительной камере большие токи гасятся преимущественно поперечным дутьем, а малые путем растяжения дуги до ее критической длины. Наличие заслонок приводит к надежному заземлению дуги в узкой щели и быстрому погасанию ее. Длительность гашения дуги, при малых токах обычно не превышает 6 полупериодов. Из описания принципа действия ясно,

что наибольшему износу будут подвергаться вкладыши и заслонки, которые выполнены сменными.

Камерой такой конструкции удается надежно отключать ток до 10 000 А при напряжении 6—10 kV, т. е. она позволяет строить газогенерирующие выключатели, соответственно на разрывную мощность 100—150 · 10<sup>3</sup> kVA.

На осциллограмме рис. 4,а записан процесс отключения около 5 000 А такой камерой. На этой же осциллограмме имеется запись давления газов в камере. Анализ этой осциллограммы и многих других показал, что давление в камере пульсирует с частотой сети, достигая максимума приблизительно одновременно с током и резко снижается при падении тока до нуля.

Из первого раздела этой статьи ясно, что более эффективное гашение может быть достигнуто лишь тогда, когда к моменту прохождения тока через нуль в камере имеется достаточное избыточное давление.

Инж. А. М. Бронштейн предложил конструкцию камеры с целью лучшего использования выделяющегося газа как в смысле организации газового дутья, так и в смысле сохранения давления в камере к моменту восстановления напряжения. Конструкция этой камеры показана на рис. 10.

Как видно, камера также состоит из двух пластин органического стекла 1 с соответствующими пазами 8 и выемками. Отличие ее от камеры рис. 8 сводится к тому, что наружные гетинаксовые пластины 5 несколько увеличены в ширину и между ними закладывается клин П-образной формы из изоляционного материала — 4. Тем самым создается некоторый дополнительный замкнутый объем, примыкающий к боковой поверхности дугогасительных пластин. Дополнительный буферный объем сообщается с дугогасительным каналом камеры через два отверстия, сделанные в боковых стенках газогенерирующих пластин. Одно отверстие находится в области неподвижного контакта и прикрыто пластинкой — клапаном, позволяющим газам проходить только в одном направлении из дугогасительной полости в дополнительный объем. Второе отверстие сделано против выхлопной щели 7. Отверстие прикрыто боковой поверхностью ножа, и газы из дополнительного объема могут вытекать только тогда, когда конец ножа находится ниже этого отверстия. Подвижной контакт-нож выполнен так же, как и в камере рис. 8, но сечение его увеличено на 20%.

Гашение больших токов происходит следующим образом: при размыкании контактов образуется дуга и начинается газогенерация, давление в камере поднимается. Давление газов открывает клапан 9, и газы получают возможность протекать в буферный объем. Газы собираются в буферном объеме до того момента, пока конец ножа не достигнет верхнего края выхлопной щели. При дальнейшем движении ножа вниз начинает открываться выхлопная щель и одновременно открывается выходное отверстие из дополнительного объема, расположенное напротив выхлопной щели. Накопившиеся в буферном объеме

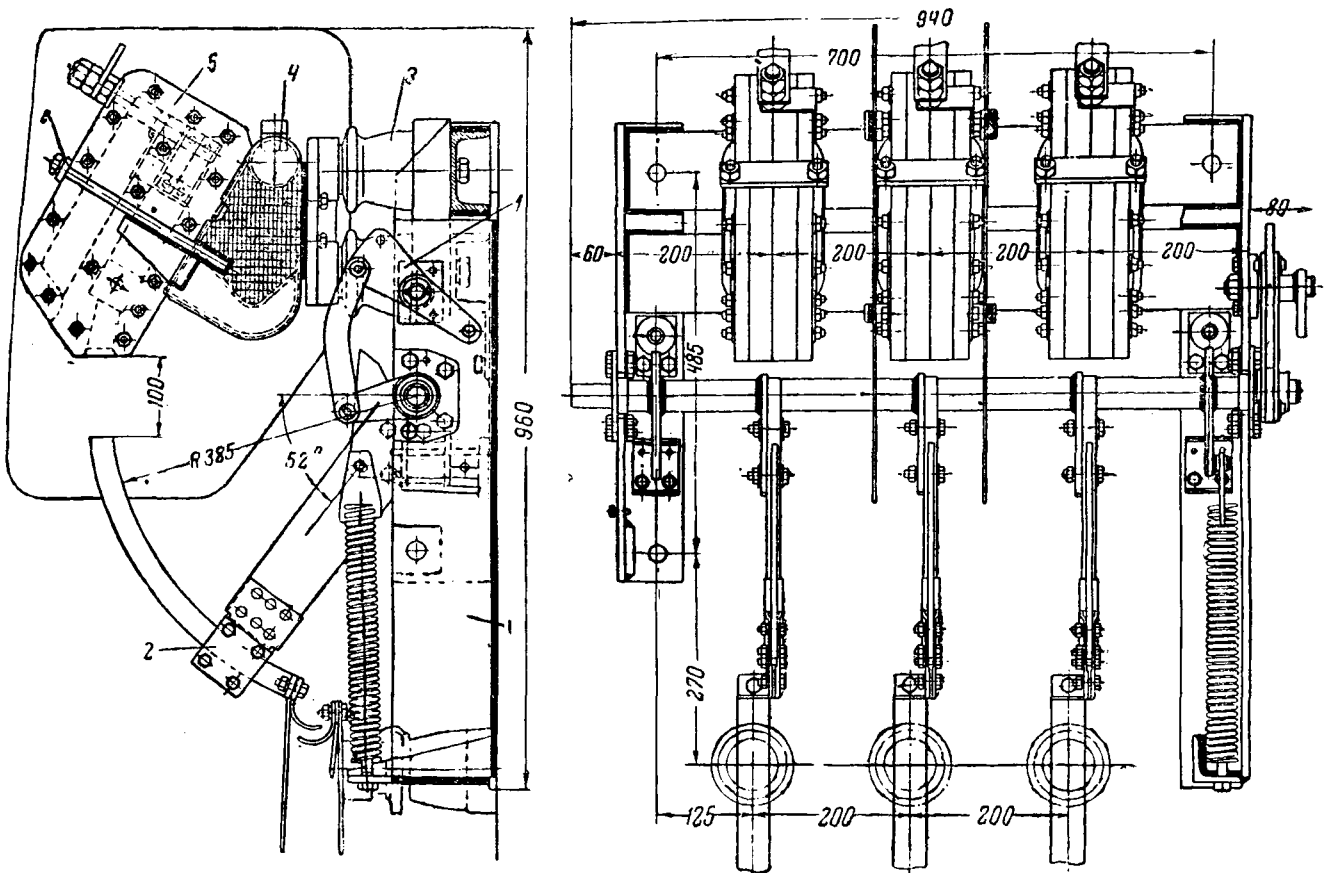


Рис. 11. Общий вид выключателя ВЭИ с твердым газогенерирующим веществом и дугогасящей камерой поперечного дутья.

газы, вытекая, создают мощный поперечный поток.

Денонизирующее действие этого потока столь велико, что, начиная с 5 000 А, длительность дуги не превышает 2,5 полупериодов, снижаясь при больших токах до 1,5—2,0 полупериодов. Осциллограмма процесса отключения этой камерой тока около 12 000 А показана на рис. 4,б.

Общая компоновка выключателя ясна из чертежа рис. 11. Выключатель имеет сварную раму 1 из сортового проката. На раме устанавливаются три комплекта спаренных опорных изоляторов 3, на которых укрепляется газотвод или глушитель 4 с камерой 5<sup>1</sup>.

Роль глушителя состоит в том, чтобы принять раскаленные газы, выбрасываемые из выхлопной щели дугогасительной камеры в момент гашения дуги, и охладить их до безопасной температуры перед выбросом в окружающую атмосферу. Конструктивно глушитель выполняется в виде сварной железной коробки, которая заполняется отрезками медных трубок, служащими для охлаждения выхлопных газов. Дугогасительная камера крепится к глушителю при помощи стяжной планки 6 и двух гаек.

<sup>1</sup> Конструктивное оформление выключателя выполнено инженерами-конструкторами ВЭИ Ф. Ф. Бабурским и Г. С. Пузырьским.

Подвижная система выключателя состоит из вала, укрепленного в подшипниках рамы. На валу укреплены три гетинаксовых рычага, к которым в свою очередь крепятся подвижные контактные ножи 2. При повороте вала ножи двигаются по дуге окружности, а так как они выгнуты по дуге определенного радиуса, им обеспечена возможность свободно перемещаться в дугогасительном канале. Таким образом, отпадает необходимость в преобразующем и выпрямляющем механизмах. Ток к ножам подводится через гибкие связи. На раме выключателя смонтированы буферные устройства, ограничивающие крайние положения вала во включенном и выключенном положениях.

Отключение выключателя производится при помощи отключающей пружины. Рама остается общей для выключателей с предельным отключаемым током 10 и 20 кА, меняется только тип камеры. Включение производится при помощи пружинного привода монтируемого непосредственно на раме выключателя (конструкция инж. Ф. Ф. Бабурского) (на рис. 11 не показан). Завод пружины привода производится трехкратным движением рукоятки. Скорость включения при подходе подвижных контактов к неподвижным составляет около 4 м/сек. Свободное расцепление привода требует небольших усилий и может осуществляться как от первичных токовых реле, так и от отключающих катушек, приводимых в действие от вторичных реле.

**Некоторые данные испытаний.** Опытные образцы выключателей подверглись довольно подробным испытаниям на отключающую способность как при номинальных токах, так и при токах короткого замыкания. Здесь нет возможности привести подробные данные этих испытаний. Остановимся только на некоторых данных, которые характеризуют отключающую способность и устойчивость характеристик выключателя.

В табл. 1 приведены данные испытания одной камеры выключателя, на отключение тока до 10 000 А в режиме двухфазного короткого замыкания, а вслед затем при малых токах. Данные приведены в той последовательности, в какой проводились опыты. Из этих данных видно, что после шести отключений токов короткого замыкания, три из которых соответствовали предельному отключаемому току, выключатель прекрасно справлялся с гашением малых токов.

Таблица 1

**Результаты испытания камеры газогенерирующего выключателя ВЭИ на отключение токов короткого замыкания**

Отключаемый ток (эффективное значение), А	Восстанавливающееся напряжение (эффективное значение), кВ	Собственная частота $f_0$ , Hz	Длительность горения дуги, полуцикла	Расстояние между контактами в момент гашения дуги, мм	Примечание
4 940	5,75	44 500	3,5	130	Выброса газов и пламени нет, небольшое свечение в камере
6 555	5,84	49 000	3,0	103	Выброса почти нет
8 950	5,34	57 000	2,5	102	Выброс вниз. Незначительная оболочка светящихся газов
10 450	5,27	57 000	2,75	89	Небольшой выброс копоти в глушитель
11 200	5,27	5 700	2,0	64	То же
10 600	5,0	5 700	2,0	59	То же
595	6,1	—	4,5	155	Небольшой выброс светящихся газов вниз
51	6,4	—	5,0	181	То же
76	6,45	—	5,5	155	То же
115	6,2	—	4,5	131	То же

Осмотр контактов после этих опытов показал, что они весьма мало износились и после небольшой зачистки могут быть применены для дальнейшей работы.

На рис. 12 построена зависимость расстояния между контактами в момент гашения от разрываемого тока для восстанавливающегося напряжения 6 кВ на фазу. Кривая показывает, что гашение малых токов наступает при расстоянии между контактами около 180 мм, при выбранных конструктивных размерах камер имеется вполне надежный запас хода ножа в камере. Из кривой также следует, что с увеличением отключаемого тока имеет место непрерывное уменьшение рас-

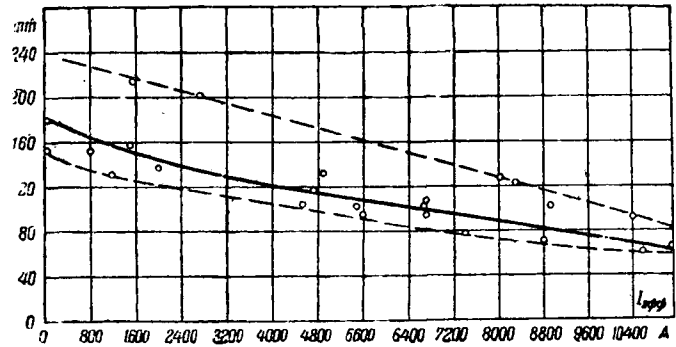


Рис. 12. Расстояние между контактами  $l$  в момент гашения дуги в зависимости от отключаемого тока для восстанавливающегося напряжения 6 кВ на фазу (выключатель ВЭИ).

стояния между контактами к моменту гашения. Это доказывает, что дугогасительная камера в пределах приписанных ей предельных отключаемых токов работает вполне нормально, без закупорки выхлопной щели. По существующим у нас нормам, если время горения дуги уменьшается с величиной отключаемого тока, разрешается в известных пределах производить экстраполяцию отключаемой способности выключателя на более высокие напряжения.

На рис. 13 дана такая же зависимость для восстанавливающегося напряжения 10 кВ на фазу. Сравнение рис. 12 и 13 показывает, что при отключаемом токе 3 000—4 000 А гашение дуги при напряжениях 6 и 10 кВ уже происходит при одинаковом расстоянии между контактами, иначе говоря, при одной и той же длительности горения дуги. Это дает основания считать, что и при 10 кВ предельный отключаемый ток для камеры рис. 8 может быть принят равным 10 000 А.

Для определения устойчивости отключающих характеристик была проведена серия экспериментов при многократных отключениях номинальных токов (400 А) и токов короткого замыкания. При токе в 400 А было сделано 800 отключений. Заметного ухудшения после 800 отключений в гашении предельных номинальных токов (400 А) вследствие износа камеры установить не удалось. Но в гашении малых токов порядка 20—30 А уже начинает наблюдаться увеличение длительности горения дуги, а гашение их происходит с полным использованием всего хода ножа в камере.

Контакты после 800 отключений оказались в превосходном состоянии и вполне пригодными для дальнейшей работы. Вкладыши и заслонки заметно износились и нуждаются в смене. Можно, таким образом, принять, что выключатель допускает минимум 800 отключений тока в 400 А без ревизии и смены деталей.

Для огромного большинства потребителей такое количество отключений никогда не будет иметь места в период между очередными ревизиями<sup>2</sup> и безусловно превосходит количество от-

<sup>2</sup> Точных данных для сравнения нет. Но, можно, например, ориентироваться на данные из статьи М. Я. Смелянского. Вестник электропромышленности, № 9, 1945.



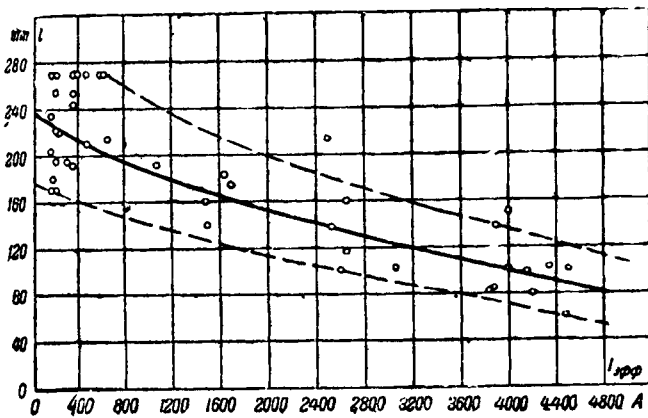


Рис. 13. Расстояние между контактами  $l$  в момент гашения дуги в зависимости от отключаемого тока для восстанавливающегося напряжения 10 кV (выключатель ВЭИ).

ключений, допускаемых для маломасляных горшковых выключателей между сроками ревизии и смены масла. Пожалуй, оно не ниже количества отключений, после которых необходима ревизия и смена масла в многообъемном масляном выключателе<sup>3</sup>.

В литературе нет данных по многократному отключению токов короткого замыкания другими типами выключателей, поэтому трудно провести сравнение вновь разработанного газогенерирующего выключателя с применяемыми в настоящее время. Однако, результаты испытаний (частично приведенные в табл. 1) сами по себе характеризуют газогенерирующей выключатель, как аппарат, весьма устойчивый по отношению к отключению токов короткого замыкания. Для сравнения выключателя ВЭИ с газогенерирующим выключателем АЕГ в табл. 2 приводим сводку результатов по испытанию [Л. 7] выключателя этой фирмы типа СКЛ-202—10/400, проведенных в ВЭИ еще в 1940 г.

Таблица 2

Отключен. ток (эффективное значение), А	Восстанавливающееся напряжение (эффективное значение), кV	Длительное горение дуги, полупериоды	Расстояние между контактами в момент гашения, мм	Примечание
2 760	5,7	4,5	235	Выброс пламени вниз Сильное обгорание подвижного контакта
4 300	9,4	4,0	212	
4 260	8,8	4,9	261	
4 400	8,8	6,0	248	
4 390	8,8	5,8	242	
4 170	8,15	5,8	230	
4 220	8,0	7,4	270	
4 300	8,75	7,9	270	
4 220	8,6	7,6	270	

<sup>3</sup> По существующим правилам ревизия производится один раз в год, если выключатель не имел за это время аварийных отключений.

Как видно из табл. 2, до шестого опыта (отключаемый ток 4 170 А) длительность горения дуги была 5—6 полупериодов — в два раза больше, чем в выключателе ВЭИ. Начиная с седьмого опыта наступило резкое ухудшение в гашении. Длительность горения дуги достигла 7,5—8 полупериодов и для гашения использовался весь ход ножа, так что гашение наступало фактически уже после остановки ножа. После девятого опыта оказалось, что газогенерирующее вещество износилось полностью, подвижной контакт (трубка) обгорел по длине на 30—35 мм и нуждался в полной смене.

Хорошие устойчивые отключающие характеристики показал также выключатель с предельным отключаемым током 20 000 А. Для характеристики приведем только следующие данные, полученные в одной серии опытов. При восстанавливаемомся напряжении 6 кV на фазу было проделано следующее количество отключений: ток 20 000 А—2 раза, 15 000 А—2 раза, 12 000 А—2 раза, 10 000 А—5 раз и 35 отключений различных токов от номинальных до 9 000 А, и лишь после этого количества отключений потребовалась смена вкладышей, заслонки и башмаков неподвижного контакта.

Термическая устойчивость газогенерирующих выключателей оказалась также достаточной и на много превышающей термическую устойчивость выключателя АЕГ. Для выключателя с предельным отключаемым током 10 000 А 4-сек ток в 10 000 А дает перегрев контактных частей в 130°, что вполне приемлемо. Для выключателя с отключаемым током 20 000 А 5-сек ток 20 000 А (ударный ток 50 кА) дает перегрев 265°С, что тоже допустимо по существующим нормам.

**Закключение.** Разработанные в ВЭИ газогенерирующие выключатели на 6—10 кV с номинальным током 400 А и разрывной мощностью соответственно 200—300 тыс. кVA, не обладая недостатками, свойственными масляным выключателям, по своим характеристикам удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним для их применения в распределительных и потребительских сетях.

Литература

1. С. И. Дженчельская и А. Г. Прелкова. Изыскание новых изоляционных материалов с повышенными дугогасящими свойствами. Бюлл. ВЭИ, стр. 30, № 4, 1940.
2. А. М. Бронштейн. Газогенерирующий разъединитель мощности. Электричество, № 7, 1945.
3. Ю. В. Буткевич, Е. С. Гройс, М. Л. Зеликин. Трубочатые разрядники на основе нового газогенерирующего материала. Электричество, № 7, 1945.
4. А. М. Мелькумов. Отчет ВЭИ за 1940 г. Ю. В. Буткевич и А. М. Бронштейн. Газогенерирующий выключатель. Отчет ВЭИ за 1944 г.
5. М. М. Акодис и А. Н. Малахов. Гашение дуги в трубчатых разрядниках. Электрические станции, № 11, 1938 г.
6. Р. М. Кантор. Исследование процесса гашения дуги переменного тока. Отчет ВЭИ за 1944—1945 гг.
7. А. М. Мелькумов. Отчет ВЭИ за 1941 г.





# Стенотрон — ионная генераторная лампа

Кандидат физико-матем. наук Т. А. СУЕТИН

Всесоюзный электротехнический институт

Из всех известных в настоящее время генераторов тока высокой частоты наиболее совершенными являются генераторы с электронными (вакуумными) лампами, отличающиеся полной управляемостью, высокой стабильностью и т. д. Однако, электронная генераторная лампа имеет высокое внутреннее сопротивление, вследствие чего ее питание приходится осуществлять от источников высокого напряжения.

В области выпрямительной техники уже давно наряду с электронными выпрямителями (кенотронами) применяются ионные (газоразрядные) выпрямители (ртутные выпрямители, газотроны). Низкое падение напряжения, характеризующее приборы дугового разряда, дает возможность пропускать через них большие токи с малой потерей мощности.

Аналогичный переход в области высокочастотной техники от электронной генераторной лампы к ионной обеспечил бы получение мощных электрических колебаний при питании генератора от источника тока низкого напряжения.

В газовом разряде имеют место явления, которые могут быть использованы для генерации колебаний высокой частоты.

В настоящей работе описаны опыты по использованию явления самопроизвольного обрыва тока в дуге низкого давления для генерации электрических колебаний. Детальное физическое исследование этого явления показало, что обрыв тока в газоразрядном приборе может происходить периодически, если обеспечены условия для повторного зажигания дуги.

**Методика эксперимента.** В ряде работ, посвященных исследованию причин обрыва тока в дуге низкого давления, указывается, что обрыв тока является следствием образования в наиболее узких местах разрядного промежутка сильного местного разряда газа [Л. 1—6].

Поэтому мы для изучения явления обрыва тока и исследования возможности использования его для генерации электрических колебаний высокой частоты пользовались разрядными трубками с резким сужением разрядного пространства. Во всех случаях сужение разряда осуществлялось перегородкой (диафрагмой) с отверстием диаметром 4—8 мм в центре, че-

*Установлена возможность использования явления обрыва тока в электрической дуге низкого давления для генерации незатухающих высокочастотных колебаний большой мощности. Описана также опытная конструкция ионной генераторной лампы—стенотрона.*

рез которое проходил разрядный ток [Л. 7, 8]. Для предупреждения возможности появления на диафрагме катодного пятна и перехода дуги к каскадной диафрагме изготовлялась из диэлектрика (в большинстве случаев из кварца [Л. 7]).

На рис. 1 дан эскиз одной из экспериментальных разрядных трубок. Кроме обычных деталей — главного анода  $A$ , дежурного анода  $A_d$ , защитного зонта  $S$ , ртутного холодного катода  $K$ , снабженного фиксирующим кольцом  $F$ , и зажигателя  $z$ , трубка имеет диафрагму  $D$  с отверстием в центре. Диафрагма закреплена на конце патрубка  $P$ , впаянного в основной баллон лампы. Патрубок и диафрагма разделяют катодную и анодную части трубки.

Основная дуга, в цепи которой при экспериментах наблюдались обрывы тока, горела между главным анодом  $A$  и катодом. Наличие дежурного разряда между катодом и кольцеобразным анодом  $A_d$  обеспечивало регулярное повторное зажигание главного разряда после его потухания, вызванного обрывом тока. Защитный зонт и фиксация катодного пятна способствовали поддержанию в трубке более определенного давления ртутного пара. Давление ртутного пара в разрядной трубке определялось по температуре водяной бани, в которую целиком погружалась трубка.

В дальнейшем изготовлялись и испытывались и другие опытные разрядные трубки. Различия в их конструкции определялись необходимостью выяснить зависимость амплитуды, частоты и стабильности колебаний не только от условий разряда и параметров внешней цепи, но также и от геометрии самой трубки. Исходя из этих соображений, были изготовлены трубки с холодным ртутным катодом и с накаливаемым оксидным катодом; с водяным и воздушным охлаждением; с различной величиной и формой сужения; с сужением, которое могло перемещаться вдоль разрядного промежутка. Все они работали и позволяли получать значительные колебательные мощности (до 1 kW). Особенности работы отдельных опытных трубок были учтены

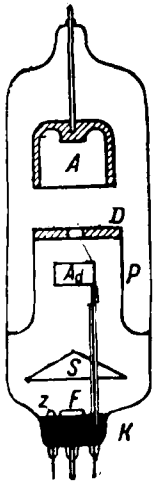


Рис. 1. Эскиз экспериментальной трубки.

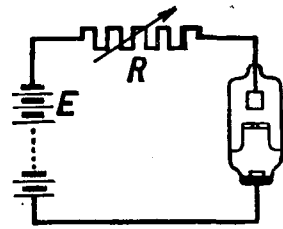


Рис. 2. Экспериментальная схема.

при конструировании ионной генераторной лампы, названной стенотроном<sup>1</sup>.

Экспериментальное исследование явления обрыва тока в таких трубках производилось в различных электрических схемах. Простейшая из них представлена на рис. 2. В этом случае цепь главного анода лампы содержит только безиндукционное омическое сопротивление  $R$  и источник э. д. с.  $E$ . Цепь дежурной дуги на схеме не показана; в случае трубки с оксидным катодом она вообще не обязательна. Простота экспериментальной схемы обусловлена стремлением уменьшить влияние внешней цепи и наблюдать изменение силы тока, вызываемое только процессами в разрядной трубке.

Сила разрядного тока в цепи главного анода и ее изменения определялись с помощью катодного осциллографа, на пластины которого подавалось напряжение с части сопротивления  $R$ .

**Результаты экспериментальных измерений.**

Осциллографическое исследование тока в цепи разрядной трубки показало, что, меняя величину параметров цепи ( $R$ ,  $E$ ) или режим работы трубки, возможно получить три различных результата. При малых силах разрядного тока колебания тока в цепи трубки отсутствуют, т. е. имеет место стационарный разряд. Начиная с некоторого значения силы тока, в цепи появляются колебания, причем сила разрядного тока изменяется от некоторого максимального значения  $I_{\max}$  до минимального  $I_{\min} > 0$  (колебания класса А).

Наконец, при дальнейшем увеличении  $I_{\max}$  возможно получить условия, при которых  $I_{\min}$  обращается в нуль и колебания класса А переходят в колебания класса С,—в цепи происходит периодический обрыв тока. Появление в цепи интенсивных электрических колебаний сопровождается изменением характера свечения разряда и его цветности. Сила разрядного тока ( $I_{xp}$ ), при которой происходит обрыв, пропорциональна произведению  $p \times s$  ( $p$  — давление газа в трубке,  $s$  — площадь отверстия диафрагмы) и совершенно не зависит от состава и величины параметров цепи трубки. Полный периодический обрыв тока в трубках с сужением удалось получить лишь в интервале давления от 0,5  $\mu\text{Hg}$  до 3  $\mu\text{Hg}$ . При более высоких давлениях газа

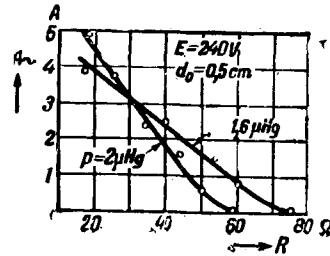


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний тока  $A_{\sim}$  от величины ограничивающего сопротивления  $R$ .

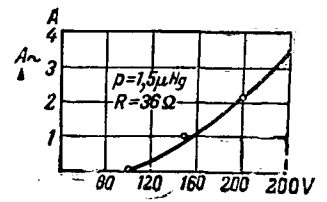


Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний тока  $A_{\sim}$  от э. д. с.  $E$  источника.

края отверстия диафрагмы начинают сильно раскаливаться вследствие чрезвычайно больших плотностей тока в месте сужения, которые достигают величин порядка нескольких десятков  $\text{A}/\text{cm}^2$ . Периодичность обрывов тока при этом нарушается. Степень раскаливания краев отверстия диафрагмы зависит от конструкции сужения. Наиболее рациональным оказалось сужение в виде отверстия в тонкой, толщиной 2—3 мм, шайбе.

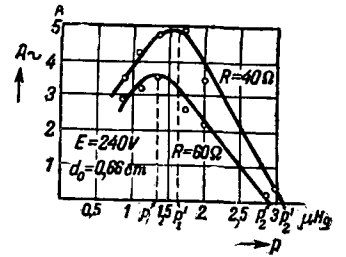


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний тока от давления ртутного пара  $p$ .

Зависимость амплитуды колебаний тока в цепи трубки от величины параметров внешней цепи и условий разряда даны на рис. 3, 4 и 5. На рис. 3 зависимость  $A_{\sim}$  от величины ограничивающего сопротивления  $R$  (схема рис. 2) дана для двух значений давления газа в разрядной трубке при питании ее от источника э. д. с. с  $E=240\text{V}$ ; диаметр отверстия диафрагмы трубки был взят  $d_0=0,5\text{cm}$ . Наибольшие амплитуды колебаний получаются при меньших сопротивлениях. Надо отметить, что в цепи разрядной трубки с сужением ограничивающее сопротивление может быть полностью выведено. При этом получают максимальные амплитуды колебаний. Сравнение кривых  $A_{\sim}=f(R)$  для давления  $p_1=1,6\mu\text{Hg}$  и  $p_2=2\mu\text{Hg}$  показывает, что при более высоких давлениях амплитуда колебаний растет быстрее и что при этом возможно получение больших амплитуд.

Типичная зависимость амплитуды колебаний тока  $A_{\sim}$  от э. д. с.  $E$  источника дана на рис. 4. Из кривой следует, что для получения больших амплитуд колебаний тока (а следовательно, и больших колебательных мощностей) выгодно питать схему от источников с более высокой э. д. с. Однако, опыты показали, что для трубок с кварцевой диафрагмой повышать э. д. с. источника выше 250—300 V нельзя, так как это влечет за собой усиление разогрѣва краев отверстия диафрагмы и уменьшение срока ее службы.

Амплитуда колебаний тока может меняться не только посредством изменения величины параметров внешней цепи, но также и посред-

<sup>1</sup> От греческого στενωτος — сжатый, узкий.

ством изменения давления паров ртути в лампе. Кривые рис. 5 дают зависимость  $A_{\sim}$  от давления ртутного пара в трубке при неизменной величине параметров цепи. При давлениях, меньших  $p_1 = 1,4 \mu \text{ Hg}$  (для кривой, снятой при  $R = 60 \Omega$ ) и  $p'_1 = 1,6 \mu \text{ Hg}$  (для кривой, снятой при  $R = 40 \Omega$ ), имеют место колебания класса С. Увеличение давления здесь вызывает постепенное увеличение амплитуды колебаний.

Давлениям  $p > p_1$  и  $p'_1$  соответствуют колебания класса А. Амплитуда колебаний в этом интервале давлений уменьшается с увеличением давления. Наконец, при  $p_2 = 2,8 \mu \text{ Hg}$  (для  $R = 60 \Omega$ ) и  $p'_2 = 3,2 \mu \text{ Hg}$  (для  $R = 40 \Omega$ ),  $A_{\sim} = 0$  и, следовательно, разряд переходит в стационарную форму. Давление, при котором имеет место переход разряда в стационарную форму, сдвигается в сторону больших значений при меньших значениях ограничивающего сопротивления  $R$ . То же можно сказать и о давлении  $p_1$ , которое соответствует переходу от колебаний класса С к колебаниям класса А.

Для получения больших амплитуд колебаний тока выгодны условия, при которых значение  $I_{kp}$  наибольшее. Так как величина  $I_{kp}$ , как указывалось выше, пропорциональна произведению  $p \times s$ , то увеличение амплитуды колебаний можно осуществить не только путем повышения давления, но и увеличением  $s$  — площади отверстия диафрагмы. Кривые рис. 6 дают зависимость  $A_{\sim} = f(k)$  для двух значений  $s$  (при  $p = 1,5 \mu \text{ Hg}$ ;  $E = 240 \text{ V}$ ), равных  $0,15 \text{ cm}^2$  (кривая 1) и  $0,34 \text{ cm}^2$  (кривая 2).

Опыт показывает, что с точки зрения облегчения условий работы диафрагмы лучше пользоваться диафрагмами с большим отверстием. В этом случае оказывается возможным получить значительные колебательные мощности при сравнительно небольшой плотности тока в сужении, что способствует уменьшению нагрева краев отверстия диафрагмы. Однако, увеличение площади отверстия вызывает уменьшение интервала давлений, в котором можно получать колебания класса С, наиболее интересные с энергетической точки зрения. Кроме того, при размерах диаметра отверстия 1 см получение обрыва тока затрудняется.

Существенное влияние на амплитуду генерируемых колебаний и на условия работы трубки оказывает положение диафрагмы в разряде.

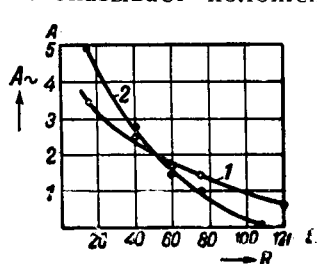


Рис. 6. Зависимость  $A_{\sim}$  от величины ограничивающего сопротивления  $R$  для двух размеров отверстия диафрагмы.

Экспериментально установлено, что наиболее выгодно помещать диафрагму на расстоянии 3—4 см от главного анода. При расположении диафрагмы на расстоянии 0,5—1 см обрыв тока получить не удалось даже при полном выводе ограничивающего сопротивления и давлении  $p = 0,9 \mu \text{ Hg}$ . Это обстоятельство мо-

жет иметь самостоятельное значение в выпрямителестроении для выбора положения сетки, отверстия которой сужают разряд.

Напряжение на электродах трубки при колебании класса С меняется от максимального значения, равного э. д. с. батареи, до минимального, равного падению напряжения на трубке при дуговом разряде (в трубке с сужением оно примерно 30—40 V).

**Частота и форма колебаний.** Как колебания класса А, так и колебания класса С в цепи трубки с сужением настолько устойчивы по частоте и фазе, что могут быть сфотографированы с помощью электронного осциллоскопа. О форме генерируемых колебаний можно судить по осциллограммам. На рис. 7 дана осциллограмма колебаний тока класса С (ход развертки справа налево), на которой отчетливо видны пики тока, соответствующие моменту обрыва, и паузы между пиками, в течение которых ток равен нулю (т. е. когда дуга на главном аноде не горит).

Период колебаний класса С определяется суммой  $T = \tau_1 + \tau_2$ , где  $\tau_1$  — время, в течение которого разрядный ток создает разряжение, и  $\tau_2$  — время заполнения разряженной области молекулами нейтрального газа.

Для частоты колебаний  $\nu$  получаем выражение

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2}.$$

Экспериментальное исследование частоты колебаний производилось с помощью резонансного волномера, а также и осциллографическим методом. Последний, ввиду наглядности, давал возможность судить о том, за счет какого из времен  $\tau_1$  или  $\tau_2$  происходит изменение периода колебаний при изменении параметров цепи или условия разряда.

Измерения показали, что частота колебаний зависит как от параметров внешней цепи, так и от режима работы разрядной трубки.

Результаты экспериментального исследования зависимости частоты от давления паров ртути в трубке даны на рис. 8. Для сравнения на рисунке даны кривые для двух значений э. д. с. батареи  $E$ . Обе кривые сняты при одном и том же сопротивлении  $R = 20 \Omega$ . Увеличение э. д. с. батареи вызывает рост частоты.

Вышеизложенный экспериментальный материал был получен при работе трубки в полностью аperiodической схеме. При такой схеме

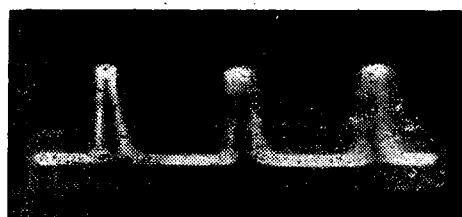


Рис. 7. Осциллограмма колебаний тока класса С.

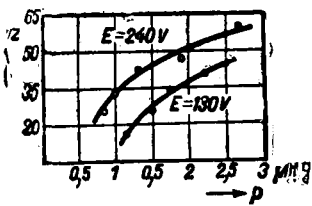


Рис. 8. Зависимость частоты колебаний от давления.

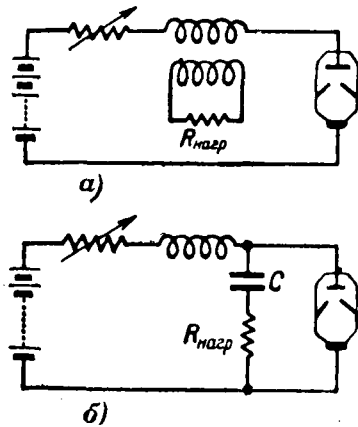


Рис. 9. Схема отбора колебательной мощности.

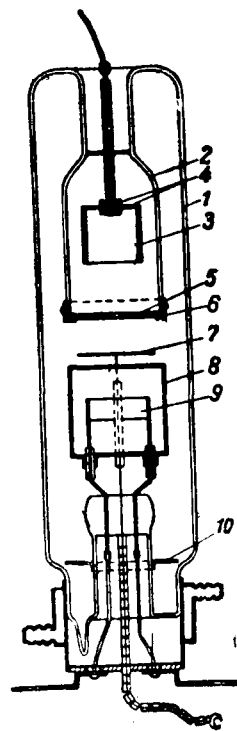


Рис. 10. Эскиз стентрона с накаливаемым оксидным катодом.

оказывается возможным изменять амплитуду, частоту и класс генерируемых колебаний. Форма колебаний тока класса С в этом случае очень несимметрична и не может меняться посредством изменения параметров цепи.

Введение в цепь трубки индуктивности и изменение величины ее дает возможность изменять форму колебаний тока, которая в этом случае имеет гораздо более симметричный характер, чем при апериодической цепи. Однако величина индуктивности оказывает влияние не только на форму колебаний тока, но также на их амплитуду и частоту. Увеличение индуктивности вызывает уменьшение амплитуды и частоты колебаний.

Варьируя параметры цепи ( $R, E, L$ ), режим работы трубки ( $p, I_a$ ) и геометрию трубки, можно при ртутном наполнении лампы получить частоты в диапазоне от  $1,5 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^4$  Hz.

Наполнение трубки более легкими газами позволяет расширить диапазон частот до  $10^5$  Hz.

Отбор колебательной мощности от схемы может быть осуществлен либо посредством индуктивной связи нагрузки со схемой (рис. 9, а), либо посредством присоединения нагрузки через разделительный конденсатор  $C$  (рис. 9, б).

Таким образом, обрыв тока в дуге низкого давления может быть использован для генерации незатухающих электрических колебаний, причем здесь совершенно необязательно наличие в цепи колебательных элементов. Преобразование энергии постоянного тока в энергию тока быстропеременного при использовании для этой цели разрядной трубки с сужением происходит и при апериодической цепи. Отличительной

чертой этого способа генерации колебаний является возможность питания схемы от источника низкого напряжения (вплоть до 80—100 V). При напряжении в 200—250 V можно получить колебательные мощности в несколько сот ватт с к. п. д. генератора в 60—65%, в отличие от электронно-ламповых генераторов, требующих для аналогичных показателей напряжения в несколько тысяч вольт.

**Конструкции стеклянного стентрона.** При разработке конструкции стеклянного стентрона исходили из следующих положений, вытекающих из вышеописанных результатов физического исследования: 1) катодная и анодная области разрядного пространства должны быть тщательно разделены и сообщаться только через отверстия в диафрагме; 2) размеры отверстия в диафрагме должны быть согласованы с рабочим давлением паров в трубке. При  $I_{max}=3$  A произведение площади отверстия на давление паров не должно превышать  $0,3 \text{ cm}^2 \times \mu \text{ Hg}$ , при  $I_{max}=10$  A,  $s \times p < 1 \text{ cm}^2 \cdot \mu \text{ Hg}$ ; 3) постоянство частоты и амплитуды колебаний определяется постоянством давления паров в приборе, а, следовательно, постоянством температуры места конденсации ртути; для обеспечения стабильности работы стентрон должен иметь водяное охлаждение; 4) тип катода принципиально безразличен. В случае конструкции стентрона с оксидным катодом необходима защита последнего от сильного распыления под ударами положительных ионов; 5) расположение диафрагмы в разряде и форма сужения должны соответствовать наиболее легким условиям работы диафрагмы; 6) конструкция не должна быть слишком громоздкой и не должна вызывать большой трудности при освоении ее в производстве.

В зависимости от того, какой электрод экранируется при разделении разрядного пространства диафрагмой, различаются две конструкции — с катодной и анодной экранировкой. Не останавливаясь подробно на деталях, отметим, что стентрон с оксидным катодом и анодной экранировкой оказался более удачным, как с точки зрения устойчивости работы, так и срока службы.

Конструкция стентрона с накаливаемым оксидным катодом и анодной экранировкой изображена на рис. 10.

Баллон стентрона 1 изготовлен из молибденового стекла. Экран, окружающий анод, — стеклянный и составляет одно целое с анодной ножкой 2. Диафрагма 5 с отверстием крепится к нему никелевым пояском 6. Тепловой экран 8 имеет большие отверстия в дне и почти полностью открыт сверху, что обеспечивает свободную циркуляцию ртутного пара. Щиток 7, прикрывающий катод от ионной бомбардировки, расположен над тепловым экраном на расстоянии, достаточном для огибания его главной дугой. Никелевый радиационный экран 10 защищает кагодную горловину от нагревания излучением катодного узла. Графитовый анод 3 стентрона закрепляется на анодном вводе зажимными гайками 4. Катод 9 прямого накала—

типа, применяемого в тиратронах ВЭИ. Наполнение—ртутное. Охлаждение—водяное; цоколь стенотрона снабжен водяной рубашкой.

Основные данные этого стенотрона следующие: размер баллона  $90 \times 300$  мм; ток накала 16—18 А; средний анодный ток 2 А (длительно) и до 4 А (кратковременно); анодное напряжение до 240 В; полезная колебательная мощность 300 W (длительно) и до 500 W (кратковременно); частота колебаний 17—30 kHz; температура вытекающей воды—16—23°С.

Для зажигания разряда на главный анод, щиток 8 стенотрона присоединяется на короткое время через сопротивление к положительному полюсу источника и на него дается импульс тока порядка 1 А. После пуска стенотрона необходимость в этом вспомогательном разряде отпадает, так как полной ионизации газа при обрыве тока не происходит. Стенотроны этой конструкции при испытаниях показали устойчивую работу и удовлетворительный срок службы.

Получение больших мощностей от стенотрона с накаливаемым катодом связано с несомненными неудобствами, так как требует применения большого катода, значительного тока накала и т. д. Задачу получения колебательной мощности порядка 1 кВт легче решить посредством стенотрона с жидким ртутным катодом.

Конструкция анодного узла подобного стенотрона совпадает с описанной выше конструкцией стенотрона с накаливаемым катодом. Катодный же узел был описан ранее в конструкции экспериментальной разрядной трубки.

Этот стенотрон также имеет водяное охлаждение; его водяная рубашка надевается непосред-

ственно на катодную часть трубки, служа одновременно цоколем.

Работы по исследованию возможности использования обрыва тока в дуге низкого давления для генерации электрических колебаний и по конструированию стенотронов проводились под руководством и при участии проф. В. Л. Грановского. За последнее время нами также проведен ряд работ по созданию мощных металлических стенотронов и разработке рациональных схем питания стенотронного генератора.

#### Литература

1. J. Langmuir. Studies of Electric Discharges in Gases at Low Pressures. GER, v. 27, p. 770, 1924.
2. A. Hull. Fundamental Electrical Properties of Mercury Vapor and Monoatomic Gases. El. Eng., v. 53, p. 1442, 1934.
3. A. Hull and F. Elder. The Cause of High Voltage Surges in Rectifier, Journal of Applied Physics, № 6, 1942.
4. L. Tonks. Transactions of the Electrochemical Society, v. 72, 1937.
5. Б. Н. Клярфельд. Градиент потенциала в положительном столбе. Журнал технической физики, т. VIII, стр. 410, 1938.
6. Б. Н. Клярфельд и И. А. Полетаев. Доклады Академии наук, т. 23, стр. 464, 1939.
7. В. Л. Грановский и Т. А. Суетин. Генерация электрических колебаний большой мощности с помощью разряда низкого давления. Доклады Академии наук, № 6, 1945.
8. H. Kleinwechter. Schwingungerscheinungen bei stark eingiegtter Lichtbogensäule und bei anomalem Anodenfale. Archiv für Elektrotechnik, Bd 34, Heft 9, 1940.



# Анализ опыта эксплуатации ртутных выпрямителей на московском метрополитене

Инж. Б. Г. ЖДАНОВ

Московский метрополитен им. Кагановича

На московском метрополитене им. Кагановича основным и единственным типом преобразователя электрической энергии для тяги является ртутный выпрямитель. От качества его работы в значительной степени зависит электроснабжение поездов.

На тяговых подстанциях метрополитена в течение 10 лет (1935—1944 гг.) вводились в эксплуатацию металлические ртутные выпрямители следующих типов: РВ-20/6, РВ-20/16, РВ-40 и РВ-70 изготовления завода «Электросила» им. Кирова в Ленинграде, РВ-20 — завода Уральского электроаппаратного и РМНВ 200×6 выпуска Всесоюзного электротехнического института. Два блока шестицилиндровых одноанодных выпрямителей ВЭИ подвергались эксплуатационному испытанию в течение 1944 г.

**Характеристика ртутно-выпрямительных агрегатов.** Агрегаты типа РВ-20/6 выпуска 1933—1934 гг. с железными анодными головками типа А-18 и А-31; типа РВ-20/16 выпуска 1935—1936 г. с графитовыми головками типа А-22/Ша; типа РВ-40 выпуска 1937—1939 гг. — с графитовыми головками типа А-39; типа РВ-70 выпуска 1937 г. — с графитовыми головками типа А-36; типа РВ-20 выпуска 1943 г. и РМНВ 200×6 выпуска 1944 г. — также с графитовыми головками.

Выпрямители типа РВ-40 и РВ-70 имеют сеточное управление для регулирования напряжения, остальные типы выпрямителей без сеточного управления.

Номинальное напряжение выпрямленного тока агрегатов всех типов составляет 825 В при полной нагрузке. Номинальная мощность выпрямительных агрегатов составляет: РВ-20—1 350—1 430 кВт, РВ-40—2 400 кВт, РВ-70—4 200 кВт, РМНВ 200×6 — 1 000 кВт.

Все типы выпрямителей предназначены для работы в качестве внутренних установок. Отдельные типы эксплуатировавшихся на метрополитене выпрямителей об-

*В статье изложен опыт десятилетней эксплуатации мощных ртутных выпрямителей завода «Электросила» им. Кирова в условиях тяговой нагрузки на московском метрополитене им. Кагановича. Особенное внимание обращено на обобщение случаев обратных зажигания, выявление их причин и мероприятий по борьбе с ними. Отмечены также реконструктивные мероприятия, проведенные в процессе эксплуатации.*

ладают следующими особенностями: длинная легко разрывающаяся при перегрузках дуга в РВ-70 и короткая дуга в РМНВ; крупные тяжелые детали многоанодных

выпрямителей и легкие малогабаритные детали одноанодных; простая вакуумная система многоанодных и сложная — одноанодных; с большим содержанием воды (у РВ-70 1 100 л) и большими сечениями проходов система охлаждения многоанодных и с малым количеством воды (20 л, у РМНВ 200×6), с малыми сечениями проходов — одноанодных; сложная система возбуждения и зажигания одноанодных выпрямителей по сравнению с многоанодными.

Питание всех типов выпрямителей происходит от трансформаторов, имеющих на вторичной стороне схему соединений: две обратные звезды двойные или одиночные с анодными делителями при соединении нулевых точек звезд между собой через разделяющую катушку Кюблера, подмагничиваемую утроителем частоты.

Схема подсоединения 12 анодов выпрямителей всех типов, кроме РВ-20 установки 1944 г., к трансформаторам создает последовательность одновременного горения двух соседних анодов при шестифазном режиме и четырех соседних анодов при трехфазном режиме. У агрегатов типа РВ-20, принятых в эксплуатацию в 1944 г., в целях создания более устойчивой дуги схема подсоединения анодов к трансформатору создает последовательное горение одновременно двух противоположно расположенных анодов. Окончательная характеристика одноанодных ртутных выпрямителей может быть дана путем выявления степени удовлетворения их основным требованиям эксплуатации.

Выпрямители типа РВ-20/6 не обеспечивали должной безаварийной работы до их реконструкции, а выпрямители типа РВ-40 и РВ-70 и сейчас неустойчивы в отношении обратных зажиганий при нагрузках, близких к номинальным и выше.

Все применяемые на метрополитене типы как при параллельной работе выпрямителей одного типа, так и в сочетании двух-трех РВ-20 с одним-двумя РВ-70 или одного РВ-20 с одним и более РВ-40 обеспечивают устойчивую параллельную работу. Однако, параллельная работа одного РВ-20 с двумя-тремя РВ-70 происходит неудовлетворительно.

Наиболее надежной перегрузочной способностью обладают РВ-20/6 (после их реконструкции), РВ-20/16 и одноанодные РМНВ, устойчиво выдерживая перегрузки по току до 100% выше номинального значения при установившемся режиме. Перегрузку до 50% выдерживают выпрямители типа РВ-20 выпуска 1943 г. и неустойчивы к перегрузкам выпрямители типа РВ-40 и РВ-70. Высокие требования, предъявляемые к ртутным выпрямителям в отношении перегрузочной способности, возникают в связи с необходимостью наилучшего использования установленной мощности агрегата при наличии неравномерной, с большими колебаниями, тяговой нагрузки метрополитена. Эта нагрузка характеризуется коэффициентом отношений пиковых пусковых токов к эффективному току нагрузки, равным в среднем 2,5, причем отношение эффективного тока к среднему составляет около 1,2. При пиковых токах в течение 10 сек с интервалами 105 сек (при 34 парах поездов в час) для полного использования установленной мощности необходимо иметь устойчивую перегрузочную способность выпрямителей и их трансформаторов до 250% номинального тока.

Наибольшую простоту и легкость регулирования напряжения обеспечивают выпрямители с сетками типа РВ-40 и РВ-70. Потребность в быстром и простом регулировании напряжения возникает при резких колебаниях напряжения в питающей сети 6 или 10 кВ, а также при необходимости в некоторых случаях эксплуатации искусственно занижать нагрузку выпрямителей при отключении части их.

Можно считать, что требованиям отсутствия мешающего влияния на линии связи удовлетворяют все выпрямители метрополитена, дающие пульсирующее выпрямленное напряжение и ток частоты 300 Hz с коэффициентом пульсаций 1-й гармоничной, равным 0,057.

Одноанодные выпрямители имеют к. п. д. в среднем на 1% выше многоанодных.

**Эксплуатация ртутных выпрямителей.** Работа выпрямителей на метрополитене протекала в следующих условиях, вызванных конструкцией тяговых подстанций, системой охлаждения, температурным и нагрузочным режимами.

Конструкции надземных тяговых подстанций с водяным отоплением и частично электрическим отоплением создают температуру окружающей среды в машинном зале не ниже 15°С и не выше 25°С при нормальной влажности.

Система охлаждения выпрямителей — общая для всех агрегатов данной подстанции — водяная циркуляционная с открытой струей слива из корпуса выпрямителя. Жесткость воды колеблется от 6 до 14 нем. градусов.

Температурный режим выпрямителей поддерживается в следующем состоянии: при подаче напряжения на трассу температура корпуса выпрямителя нормально должна быть не ниже 25°С, а температура входящей в рубашку воды — не ниже 18°С. При работе выпрямителя температура выходящей из рубашки воды поддерживается по термометру, установленному на анодной плите, для РВ-20 в пределах 32—35°С, а для РВ-40 и РВ-70 в пределах 35—38°С. Температура воды, входящей в рубашку выпрямителя, поддерживается в пределах 18—20°С. Суточный график работы выпрямителей определяется графиком движения поездов. Среднее число часов работы выпрямителей составляет около 6 000 h в год. Общая продолжительность эксплуатации отдельных типов выпрямителей представляется в следующем виде:

РВ-20/6 . . . . .	— 11 корпусов	— 878
РВ-20/16 . . . . .	9	— 863
РВ-20 . . . . .	7	— 83
РВ-40 . . . . .	— 20	— 1 267
РВ-70 . . . . .	— 3	— 142
Всего . . . . .		— 50 корпусов — 3 233 выпрямители-месяцев.

За 10 лет эксплуатации всеми указанными агрегатами преобразовано 551 млн. kWh электроэнергии. Средний годовой коэффициент эффективной нагрузки выпрямителей составлял по отдельным годам от 12 до 22%, достигая в часы пик до 32%.

Устойчивость работы выпрямителей определяется характером и количеством имевшихся в процессе эксплуатации нарушений нормального состояния и режима их работы. Всего было 505 нарушений.

Из всех нарушений надо особо отметить случаи течи вакуумных корпусов как выпрямителей, так и ртутных насосов. Совершенно вышли из строя с последующей заменой новыми два корпуса типа РВ-20/6 после 5½—6 лет работы и два корпуса типа РВ-40 в процессе пробной эксплуатации. Кроме общей течи три корпуса РВ-20/6 и пять корпусов РВ-40 по истечении 1—5½ лет эксплуатации имели местные течи в сварных швах: в местах прохода циркуляционных водяных труб через нижний конус корпуса и через крышку конденсационного цилиндра, в швах конденсационного цилиндра и у анодных рукавов. Снижение производительности двухступенчатых ртутных насосов объясняется недостатками вакуумной откачивающей системы. На выпрямителях типа РВ-20/6 и РВ-20/16 вакуумная труба не имеет водяного охлаждения, а также достаточного наклона в сторону конденсационного цилиндра, поэтому за период между годовыми ревизиями в ртутных насосах увеличивается количество ртути до 180% нормы заливаемой ртути.

На выпрямителях типа РВ-40 и РВ-70 вакуумные трубы имеют водяное охлаждение и за полгода количество ртути в большинстве случаев сохраняется почти в пределах нормы, колеблясь в отдельных случаях от 70 до 130% нормы.



Особенно много было случаев нарушения нормальной работы системы возбуждения и зажигания почти у всех типов выпрямителей. Причинами этого являлись: заедание иглы вследствие перекоса; повреждения стеклянной направляющей трубки; снижение до нуля изоляции анодов возбуждения и иглы зажигания по отношению к корпусу, происходящее от недостатков конструкции изоляторов ввода и амальгамирования фарфоровых защитных трубок анодов возбуждения и направляющей втулки иглы; выпадание наконечника иглы из своего места из-за плохого крепления на заводе; непогружение иглы в ртуть катода из-за ослабления магнитного поля солеоида зажигания; дефект изготовления реле зажигания; изгиб от перегрева железных анодов возбуждения (у РВ-40) вследствие дефектов конструкции защитной манжеты.

**Обратные зажигания.** Количество обратных зажиганий на 1 млн. кВт·ч преобразованной электроэнергии составляет 0,49 и на 1 000 ч работы выпрямителей—0,17 или около одного зажигания в год на один ртутный выпрямитель, что можно рассматривать как хороший показатель.

Из общего количества обратных зажиганий 61% падает на РВ-20, 29%—на РВ-40 и 10%—на РВ-70.

Из общего количества находившихся в эксплуатации выпрямителей давали обратные зажигания в первый год эксплуатации 44% агрегатов, на 10-м году эксплуатации—только 16,5%.

Некоторые выпрямители совершенно не имели обратных зажиганий за весь период их эксплуатации, продолжительность которого исчисляется для отдельных агрегатов с графитовыми головками для типа РВ-20 от 26 до 96 мес. и для типа РВ-40—от 24 до 75 мес.

По временам года наибольшее количество обратных зажиганий наблюдалось в январе (15,4%) и в феврале (16,5%), снижаясь в июне и августе до 2,9%. Здесь отразилось влияние температурных резких колебаний окружающего

воздуха на устойчивость работы выпрямителей. При распределении обратных зажиганий по времени суток усматривается их наибольшее количество в часы пик (с 7 до 10 час. и с 16 до 20 час.). В этот период времени произошло 57,4% всех обратных зажиганий. Наименьшее количество обратных зажиганий пришлось на утренние часы (с 6 до 7 час.)—2,3%. Из общего количества обратных зажиганий в 11 случаях (4%) происходило разрушение одного-двух анодных изоляторов и выход выпрямителя из строя на срок более 10 ч, в остальных 96% случаев выпрямители не имели повреждений и через короткий промежуток времени вновь включались в работу. Разрушение изоляторов происходило у РВ-20/6 при анодах типа А-18—1 случай, типа А-22/Ша—2 случая вследствие плотной посадки изолятора на стержень, у РВ-40 при анодах типа А-39—3 случая, типа А-39/IV—5 случаев. Во всех случаях кроме двух, объясненных выше, причиной являлись конструктивные недостатки анодов.

Анализ обратных зажиганий позволил выявить их причину.

Количество обратных зажиганий по типам выпрямителей с систематизацией причин всех случаев представлено в таблице.

Наибольшее количество обратных зажиганий происходило по причине конструктивных дефектов анодов, особенно у РВ-20/6 с железными головками и у РВ-40.

Наиболее частой эксплуатационной причиной обратных зажиганий являлось также нарушение температурного режима, резкое регулирование притока воды вызывало значительные колебания температуры корпуса выпрямителя; длительный недостаточный приток или, наоборот, избыток воды создавал температуру анодной плиты, не соответствующую фактической нагрузке выпрямителя, или даже вызывал его перегрев; низкая температура входящей воды, достигавшая иногда 11°, переохлаждала катод, вызывая обрыв

Причины обратных зажиганий

Тип РВ	Конструктивные дефекты анодов	Нарушение температурного режима	Местное повышение давления газов	Низкое качество графита анодных головок	Перегрузка	Течь влаги или атмосферы в корпусе РВ	Коммутационные нарушения нормального режима	Конструктивные дефекты катода	Неправильный или некачественный ремонт или монтаж	Покрывание анодов продуктами распада после чистки о. з.	Эксплуатационные нарушения условий работы РВ	Всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
РВ-20/6 с железными головками . . . . .	58	6	4	—	2	9	1	8	—	—	—	88
РВ-20/6 с графитовыми головками . . . . .	—	16	4	—	—	2	—	—	—	—	—	12
РВ-20/16 с графитовыми головками . . . . .	—	2	5	—	1	3	2	—	3	—	—	16
РВ-20/16 с железными головками . . . . .	—	2	9	—	—	—	—	—	—	—	—	11
РВ-20 3-й очереди с графитовыми головками . . . . .	—	2	—	16	5	—	—	—	1	4	—	28
РВ-40 . . . . .	45	1	8	—	10	3	7	—	—	—	4	78
РВ 70 . . . . .	18	3	—	3	1	—	1	—	1	—	—	27
Всего: . . . . .	121	32	30	19	19	17	11	8	5	4	4	270
% . . . . .	45,0	11,8	11,0	7,4	7,3	6,2	4,0	2,7	1,8	1,4	1,4	100%



плазмы в вакуумном корпусе и перенапряжение; последнее проявлялось в виде коронирования анодов.

Местное или общее повышение давления посторонних газов, оставшихся в корпусе после закрытия или внезапно выделившихся из головок анодов или корпуса выпрямителя, особенно при плохом качестве материала, вызывало обратные зажигания с незначительным ухудшением вакуума. Этому способствовала также диффузия водорода из охлаждающей воды через стенки корпуса.

Низкое качество графита анодных головок у РВ-20 на подстанциях 3-й очереди создавало большую загрязненность анодов и служило причиной обратных зажиганий. Перегрузка выпрямителей, особенно у РВ-40 и РВ-70, вызывала обратные зажигания.

К коммутационным нарушениям нормального режима работы выпрямителей, вызывавшим обратные зажигания, надо отнести перенапряжения в тягозое сети 825 В, неправильную фазировку сеток и анодов, в частности включение трансформатора собственных нужд и выпрямителей на разные системы шин, а также глубокое (до 10—12%) регулирование выпрямленного напряжения сетками.

К эксплуатационным нарушениям нормальных условий работы выпрямителей отнесены: повреждение вакуумметра Мак-Леода при ревизиях, повреждения датчика электровакуумметра при работе, недостаточно качественная ревизия насосов, снижающая их производительность, низкая температура и сквозняки в машинном зале, недостаточная изоляция сеточных цепей и т. п.

В борьбе с обратными зажиганиями проводился ряд организационно-технических мероприятий: 1. Учет, расследование и анализ обратных зажиганий с составлением актов по специальной форме на каждый случай. Для облегчения выяснения, на каком аноде было обратное зажигание, на анодных кабелях выпрямителей установлены электромагнитные указатели. При каждом внутреннем вскрытии выпрямителя обследуются вакуумные части, что также фиксируется специальным актом. Все получаемые данные служат материалом для анализа обратных зажиганий, протекающих в большинстве случаев в сложной обстановке влияния нескольких факторов.

2. Разработка инструкции по обслуживанию и ремонту выпрямителей, особенно по тепловому режиму их и технологическому процессу ревизий, ремонта и контрольных испытаний.

3. Своевременное и качественное выполнение ревизий, ремонта и контрольных испытаний.

4. Реконструкция анодов, катодов, насосов и других элементов выпрямительных агрегатов.

**Реконструкция ртутно-выпрямительных агрегатов.** Для повышения надежности работы ртутно-выпрямительных агрегатов в эксплуатационных условиях был проведен ряд мероприятий.

В течение 1937—1940 гг. была проведена ре-

конструкция одиннадцати выпрямителей типа РВ-20/6, введенных в эксплуатацию с 15 мая 1935 г. с железными головками и малопроизводительными ртутными насосами. При этом была проведена модернизация: а) аноды типа А-18, А-31 и А-28 с железными головками заменены типом А-22/Ша с графитовыми головками и увеличенным количеством стяжных шпилек (с трех до шести); б) удлинены манжеты 400/500 мм до 480/570 мм; в) одноступенчатые ртутные насосы заменены двухступенчатыми; г) установлены масляные насосы более совершенной конструкции и т. п.

Указанные мероприятия резко снизили число обратных зажиганий на выпрямителях. Основной особенностью улучшенного типа анодов является применение изолятора с хвостом вместо комплекта кольцевого изолятора со стержневой втулкой.

Дефект изготовления катодов у некоторых агрегатов типа РВ-20/6, имевших диаметр фильтрующих отверстий для ртути в промежуточном кольце до 3,6 мм вместо допускаемого 2 мм, создавал устойчивую струю, стекающую из фильтра в донницу ртути, что вызывало перемежающиеся разряды между катодом и корпусом и было причиной обратных зажиганий. Заделкой больших отверстий и рассверловкой их на соответствующий размер была устранена основная причина обратных зажиганий.

У выпрямителя типов РВ-40 и РВ-70 подвеска коронки сетки на анодах переделана заводом: крепление коронки к нижнему фланцу анода осуществлено теперь посредством фарфоровых ребристых втулок и шайб, что несколько повысило устойчивость выпрямителей по отношению к обратным зажиганиям.

С переводом тяговых подстанций на автоматное управление введена автоматика производственного процесса эксплуатации выпрямителей: а) периодический (через каждые 6 h на 15 min) электромеханический запуск и останов форвакуумного масляного насоса; б) периодический (через каждые 15 sec) замер вакуума посредством электроконтактного вакуумметра с подачей электродиспетчеру предупредительного сигнала при вакууме 1 μ и автоматическим отключением агрегата при вакууме 3 μ; в) непрерывный термоэлектрический контроль температуры корпуса выпрямителя с подачей предупредительного сигнала при температуре 30 и 45° и автоматическим отключением агрегата при температуре 50°; г) периодическая термоэлектромеханическая регулировка количества воды, поступающей в корпус выпрямителя, с поддержанием постоянной заданной температуры; д) непрерывный электромеханический контроль поступления воды в охлаждающие рубашки ртутных насосов с автоматическим отключением агрегата при прекращении протока воды; е) непрерывный контроль протекания тока через нагревательные элементы ртутных насосов с автоматическим отключением агрегата при прекращении тока.



# Автоматическое регулирование трехфазных дуговых электропечей

Профессор С. И. ТЕЛЬНЫЙ

Уральский индустриальный институт

В трехфазных дуговых печах сталеплавильного типа ванна расплавленного металла, или расплавляемая металлическая завалка твердого стального скрапа, образует естественную нулевую точку. Вольтовы дуги

образуются между нижними концами треугольных электродов и поверхностью металла. В большинстве случаев дуговые печи для плавки стали устраиваются с непроводящей подиной, не имеют донных электродов и работают без нулевого провода, соединяющего нулевые точки печи и печного трансформатора.

Такой способ сопряжения фаз электрометаллургической установки—соединение фаз подпитателя на звезду без нулевого провода—оказывает большое влияние на работу автоматических регуляторов, управляющих работой механизмов для подъема и опускания электродов.

Каждый электрод снабжается самостоятельным механизмом, управляемым отдельным автоматическим регулятором, но тем не менее говорить о независимом регулировании электрического режима отдельных фаз печи можно только условно. Нарушение нормальных условий горения электрической дуги в одной из фаз печи вызывает изменение тока не только в электроде этой фазы, но и в электродах двух других фаз даже в том случае, если условия горения дуг в последних не претерпевают изменений. При использовании в качестве импульса для работы автоматического регулятора величины тока в электроде нарушение нормального режима горения дуги в одной фазе вызывает перемещение из нормального положения всех трех электродов, хотя для восстановления нормального режима работы печи было бы достаточно изменить соответствующим образом положение электрода только той фазы печи, где возникло нарушение условий горения дуги. Эти неоправданные перемещения электродов влекут за собой искусственное нарушение нормальных условий горения дуг в этих фазах печи.

*Систематическая разработка теории автоматического регулирования дуговых электропечей, а также обоснование рационального выбора и улучшение конструкции регуляторов, являются актуальными задачами в развитии электрометаллургии. Дано графо-аналитическое исследование несимметричных режимов и на базе его рассмотрена работа регуляторов различных типов при изменении режима в одной фазе печи. Особое внимание уделено регулятору типа Regulex.*

Различного характера нарушения режима работы трехфазной печи в отдельных ее фазах проявляют себя неодинаково при регуляторах различных типов. Выяснение под этим углом зрения характеристик регулято-

ров представляет известный интерес при сравнении различных типов этих аппаратов и выявлении условий их работы и позволит наметить путь рационального выбора и улучшения конструкции регуляторов.

**Несимметричное нарушение режима работы.** В основу построения характеристик регулятора необходимо положить рассмотрение зависимости между током и напряжением в отдельных фазах печи при несимметричной ее нагрузке. При этом необходимо учесть особенности вольтовой дуги в качестве проводника электрического тока. Если даже не принимать во внимание несинусоидальный характер кривых мгновенных значений тока и напряжения вольтовой дуги переменного тока и ограничиться рассмотрением их эффективных значений, отвечающих им эквивалентных синусоид, то и тогда эти особенности проявляют себя в достаточной мере ярко.

В условиях дуговой печи можно принять напряжение дуги за величину, не зависящую от тока:

$$E_d = a + b_T l = \text{const при } l = \text{const.} \quad (1)$$

Поэтому электрическое сопротивление дуги определенной длины

$$R_d = \frac{E_d}{I} \quad (2)$$

оказывается величиной, обратно пропорциональной току в электроде.

Это обстоятельство вносит значительное усложнение в решение задачи о несимметричной нагрузке фаз трехфазной дуговой печи. Напротив, используя для определения напряжения

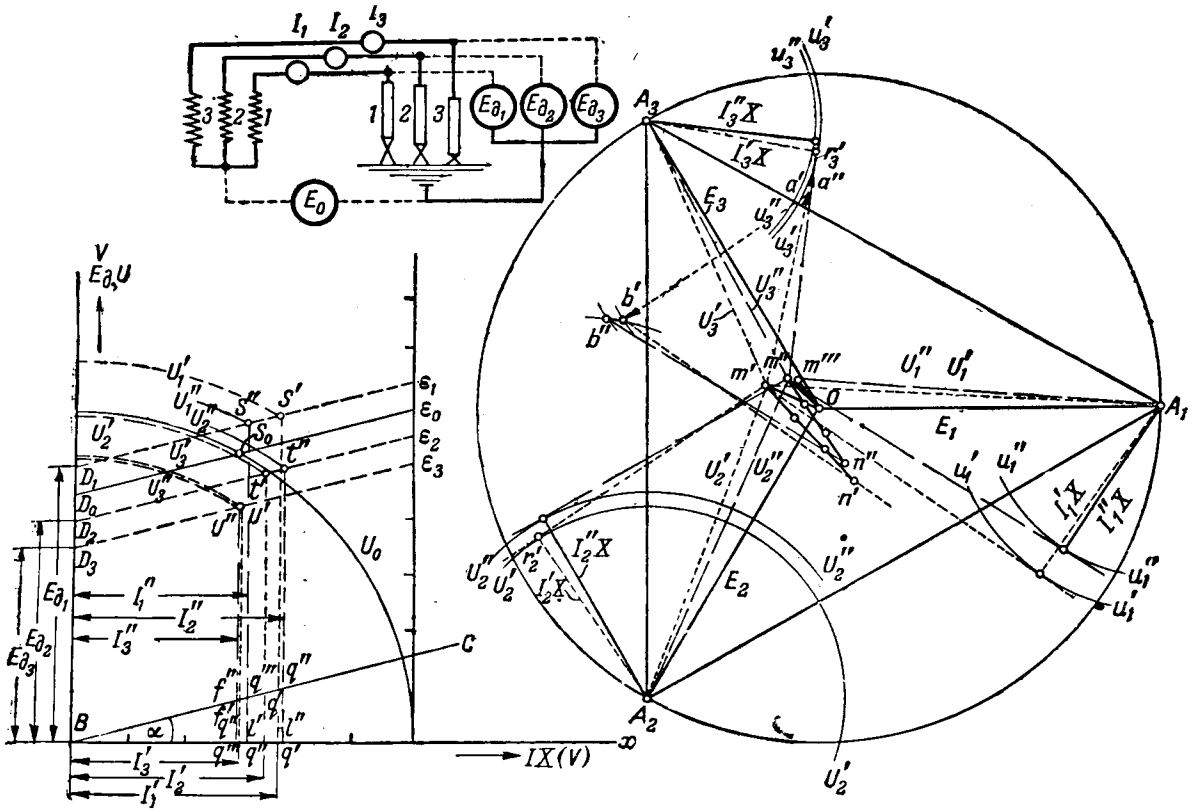


Рис. 1.

между нулевыми точками печи и печного трансформатора формулу:

$$\bar{E}_0 = \frac{\bar{E}_1 \bar{\eta}_1 + \bar{E}_2 \bar{\eta}_2 + \bar{E}_3 \bar{\eta}_3}{\bar{\eta}_1 + \bar{\eta}_2 + \bar{\eta}_3}, \quad (3)$$

необходимо комплексы проводимостей  $\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2, \bar{\eta}_3$  и соответствующих им сопротивлений  $\bar{\zeta}_1, \bar{\zeta}_2, \bar{\zeta}_3$  отдельных фаз изображать в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\eta}_1 &= a_1 + j\beta_1, & \bar{\zeta}_1 &= \left(R_1 + \frac{a_1}{I_1}\right) + jX_1, \\ \bar{\eta}_2 &= a_2 + j\beta_2, & \bar{\zeta}_2 &= \left(R_2 + \frac{a_2}{I_2}\right) + jX_2, \\ \bar{\eta}_3 &= a_3 + j\beta_3, & \bar{\zeta}_3 &= \left(R_3 + \frac{a_3}{I_3}\right) + jX_3, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $R_1, R_2, R_3$  и  $X_1, X_2, X_3$  — соответственно, активные и реактивные сопротивления цепи отдельных фаз печи;  $a_1, a_2$  и  $a_3$  — напряжения дуги и  $I_1, I_2$  и  $I_3$  — токи в различных электродах печи.

Таким образом, в отличие от обычных цепей трехфазного тока, действительные и мнимые части комплексов проводимостей зависят от тока. Это значительно усложняет вычисление величины  $E_0$  и определение трех из величин  $a_1, a_2, a_3, I_1, I_2, I_3$ , если заданы остальные три из них.

Когда  $R_1 = R_2 = R_3 = R$  и  $X_1 = X_2 = X_3 = X$ , задача легко решается графически методом

последовательных приближений. В основе этого, используемого в дальнейшем изложении метода, лежат следующие положения:

1. Из условия, что нулевой провод отсутствует, следует, что сумма токов в электродах трехфазной дуговой печи всегда равна нулю:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0. \quad (5)$$

2. При симметричной звезде ( $E_1 = E_2 = E_3$ ) или треугольнике ( $E_{12} = E_{23} = E_{31}$ ) напряжений печного трансформатора из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_1 &= R\bar{I}_1 + jX\bar{I}_1 + \bar{E}_{\partial 1} + \bar{E}_0, \\ \bar{E}_2 &= R\bar{I}_2 + jX\bar{I}_2 + \bar{E}_{\partial 2} + \bar{E}_0, \\ \bar{E}_3 &= R\bar{I}_3 + jX\bar{I}_3 + \bar{E}_{\partial 3} + \bar{E}_0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

сложив их, можно получить, что геометрическая сумма векторов напряжения трехфазной дуговой печи по величине равна и по направлению обратна утроенному вектору напряжения между нулевыми точками печи и печного трансформатора:

$$\bar{E}_{\partial 1} + \bar{E}_{\partial 2} + \bar{E}_{\partial 3} = -3\bar{E}_0.$$

Для графических построений целесообразно уравнения (6) представить в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{E}_1 - \bar{E}_0 = R\bar{I}_1 + jX\bar{I}_1 + \bar{E}_{\partial 1}, \\ \bar{U}_2 &= \bar{E}_2 - \bar{E}_0 = R\bar{I}_2 + jX\bar{I}_2 + \bar{E}_{\partial 2}, \\ \bar{U}_3 &= \bar{E}_3 - \bar{E}_0 = R\bar{I}_3 + jX\bar{I}_3 + \bar{E}_{\partial 3}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

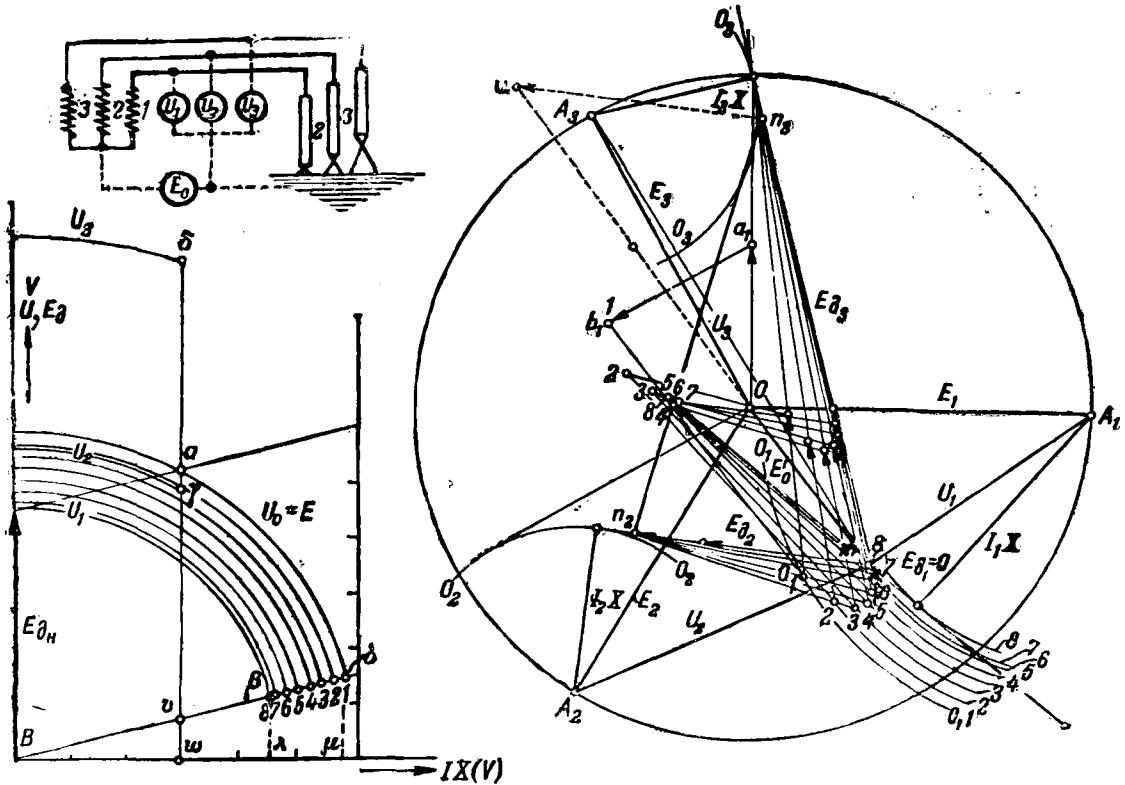


Рис. 2.

использовав для установления соотношений между величинами каждой фазы диаграмму Рикке (Riecke).

Положим, например, что заданы фазовые напряжения трансформатора, представленные на рис. 1 векторами  $\overline{OA_1} = \overline{E_1}$ ,  $\overline{OA_2} = \overline{E_2}$  и  $\overline{OA_3} = \overline{E_3}$ , и одинаковые во всех фазах активные ( $R_1 = R_2 = R_3 = R$ ) и реактивные ( $X_1 = X_2 = X_3 = X$ ) сопротивления цепи электрометаллургической установки.

Строим обычным способом диаграмму Рикке. Откладываем по горизонтальной оси  $Bx$  величину  $IX$  при различных значениях тока  $I$ , проводим прямую  $BC$  под углом  $\alpha = \arctg \frac{R}{X}$  и описываем окружность радиусом  $U_0 = E_1 = E_2 = E_3$ . Пересечение этой окружности с прямой  $D_0E_0$ , параллельной  $BC$  и отвечающей нормальной величине напряжения дуги  $BD_0 = E_{\partial n}$ , определяет ток в электроде при нормальном режиме работы печи (точка  $s_0$ ). Положим теперь, что возникло нарушение нормального режима работы печи и напряжения дуги в различных фазах стали различными ( $\overline{E_{\partial 1}} = \overline{BD_1}$ ,  $\overline{E_{\partial 2}} = \overline{BD_2}$  и  $\overline{E_{\partial 3}} = \overline{BD_3}$ ). Это вызовет возникновение напряжения между нулевыми точками печи и печного трансформатора. Допустим, что это напряжение на диаграмме выразится каким-то вектором  $\overline{E_0} = \overline{Om'}$ . Тогда векторы  $\overline{m'A_1}$ ,  $\overline{m'A_2}$  и  $\overline{m'A_3}$  изобразят соответственно полные падения напряжения ( $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ ) в отдельных фазах до нулевой точки печи. Соответственно их величине на диаграмме Рикке определится (точки  $s'$ ,  $t'$  и  $u'$ )

ток в различных электродах и индуктивные падения напряжения в цепи:

$$\overline{I_1 X} = \overline{Bq'}, \overline{I_2 X} = \overline{Bq''} \text{ и } \overline{I_3 X} = \overline{Bq'''}.$$

У вершин ( $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ ) треугольника напряжений трансформатора описываем окружности  $u'_1 u'_1$ ,  $u'_2 u'_2$  и  $u'_3 u'_3$  радиусами соответственно  $Bq'$ ,  $Bq''$  и  $Bq'''$ . Касательные к этим окружностям из точки  $m'$  определяют направления векторов тока. На них откладываем напряжение дуги  $\overline{E_{\partial 3}} = \overline{BD_3}$ ;  $\overline{E_{\partial 2}} = \overline{BD_2}$  и  $\overline{E_{\partial 1}} = \overline{BD_1}$  и определяем их геометрическую сумму:

$$\overline{m'n'} = \overline{m'a'} + \overline{a'b'} + \overline{b'n'}.$$

Разделив  $m'n'$  на три равные части и построив вектор  $\overline{om''}$  равным, параллельным, но обратным по направлению вектору  $\frac{1}{3} \overline{m'n'}$ , найдем исправленный вектор напряжения между нулевыми точками  $\overline{E_0} = \overline{Om''}$ . Повторяем то же построение, исходя из точки  $m''$ , и продолжаем эту операцию до тех пор, пока два последующих определения дадут совпадающие результаты. Сходимость такого построения обычно хорошая, но в некоторых случаях более удобен другой способ определения смещения нулевой точки.

На рис. 2 показано построение по этому второму способу для случая короткого замыкания между электродом первой фазы и металлической завалкой (однофазное короткое замыкание в печи) при условии, что ток в двух

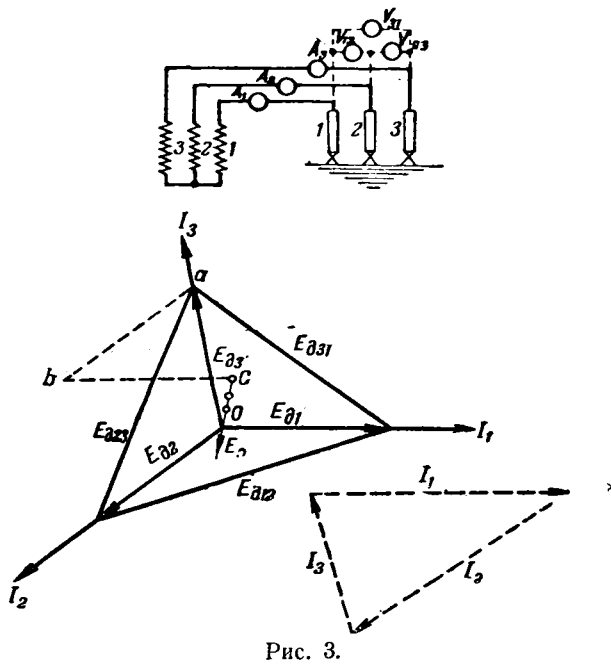


Рис. 3.

других фазах поддерживается нормальным при помощи автоматических регуляторов, соответствующим образом изменяющих положение электродов этих фаз. Примем за исходное заведомо неверное допущение, что при  $E_{01}=0$ ,  $E_{02} \neq 0$  и  $E_{03} \neq 0$  и смещения нулевой точки не происходит, т. е., что  $U'_3$  и  $U'_2$  остаются такими же, как при нормальном режиме. Построив окружности  $o_2o_2$  и  $o_3o_3$  радиуса, отвечающего точке  $a$  диаграммы Рикке, и определив направление  $\vec{I}_3$  и  $\vec{I}_2$ , находим их геометрическую сумму  $\vec{Ob}_1$  и из точки  $b_1$  проводим касательную к окружности  $o_1c_1$ , описанной у точки  $A_1$  радиусом, отвечающим точке  $\sigma$  диаграммы Рикке. По направлению этой касательной откладываем  $\vec{b}_1c_1 = \vec{B}_n = \vec{I}_1 X$  и принимаем точку  $c_1$  за исправленное положение конца вектора  $\vec{E}_0$ . Повторяем построение для исправленных полных падений напряжения  $U''_1 = c_1A_1$ ,  $U''_2 = c_1A_2$  и  $U''_3 = c_1A_3$ , находя по диаграмме Рикке отвечающие им ток в электроде первой фазы (при  $E_{01}=0$ ) и напряжения дуги в двух других фазах (при  $I_2 = I_3 = I_n$ ). Путем таких построений приходим в конце концов к определению вектора  $\vec{Om}$ , представляющего действительное напряжение между нулевыми точками системы при рассматриваемом электрическом режиме работы печи. Точки  $\delta$ ,  $\gamma$  и  $\beta$  на диаграмме Рикке, отвечающие  $\vec{U}_3 = m\vec{A}_3$ ,  $\vec{U}_2 = m\vec{A}_2$  и  $\vec{U}_1 = m\vec{A}_1$  векторной диаграммы, определяют напряжение дуги ( $\vec{E}_{03}$  и  $\vec{E}_{02}$ ) в третьей и второй фазах печи и ток в электроде первой фазы при заданном условии, что

$$E_{01}=0 \text{ и } \vec{I}_3 = \vec{I}_2 = \vec{I}_n.$$

В правильности определения  $\vec{E}_0$  можно убедиться, произведя построение  $(m - n_3 - p - m)$  по

указанному ранее способу. Построение показывает, что условие

$$\vec{E}_{01} + \vec{E}_{02} + \vec{E}_{03} = -3\vec{E}_0$$

оказывается выполненным.

Построение по второму из рассмотренных способов применимо и в том случае, когда

$$R_1 \neq R_2 \neq R_3 \text{ и } X_1 \neq X_2 \neq X_3.$$

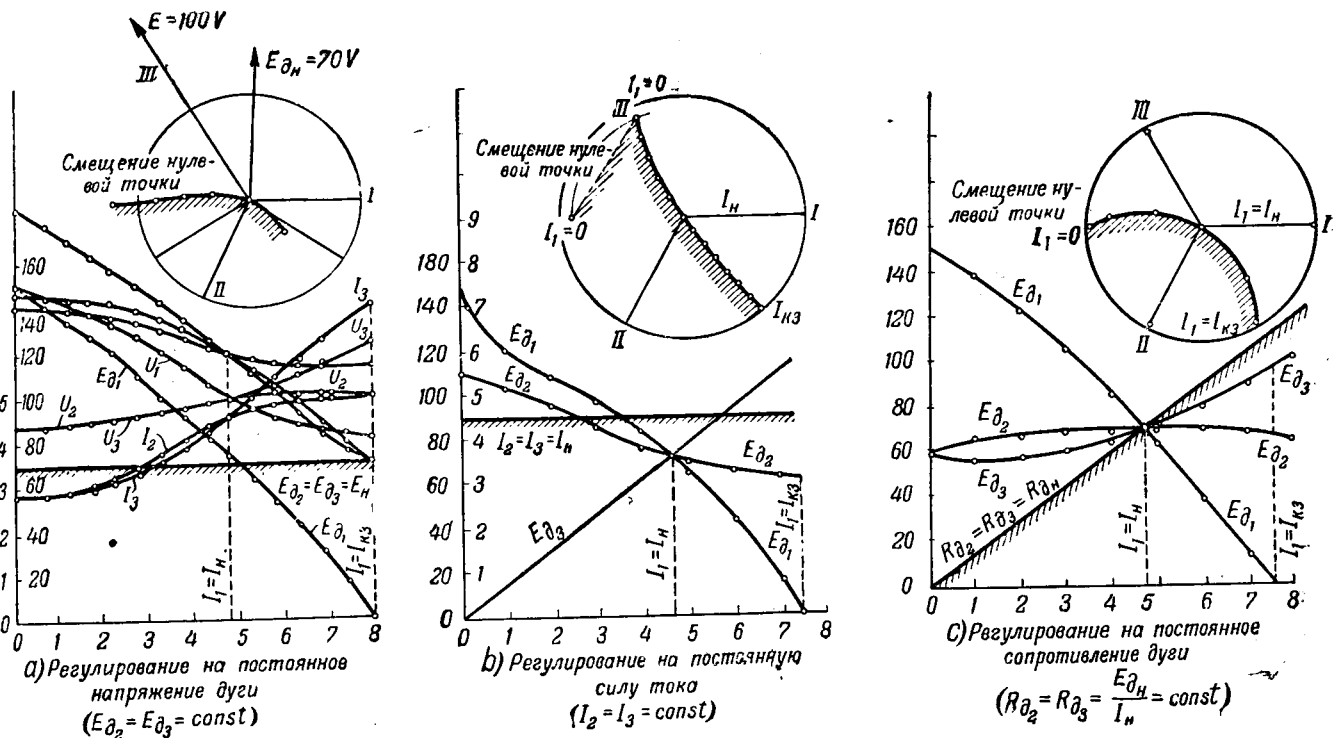
Определение величины и направления вектора  $\vec{E}_0$  при различного характера нарушениях нормального режима работы печи в отдельных ее фазах позволяет выяснить ряд деталей процесса регулирования работы трехфазной дуговой печи и характеристики, представляющие зависимости между изменением фазовых и линейных напряжений печи, током в различных электродах при нарушении нормальных условий горения дуги в одной или нескольких фазах,

Прежде чем перейти к рассмотрению этих характеристик дуговых печей, работающих с регуляторами различных типов, необходимо отметить одно из соотношений между величинами, характеризующими электрический режим работы трехфазной дуговой печи, — соотношение, которое может быть установлено на основании легко доступных непосредственных измерений.

Если измерить линейные напряжения печи  $E_{012}$ ,  $E_{023}$  и  $E_{031}$  и ток в электродах  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$ : при каком угодно режиме работы трехфазной печи, то, построив треугольник напряжений и звезду токов (учитывая, что  $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0$ ) и наложив их друг на друга так, чтобы вершины треугольника расположились на лучах звезды, нетрудно определить (рис. 3) величину и направление векторов напряжения дуги в каждой фазе. Затем — на основании того, что  $\vec{E}_{01} + \vec{E}_{02} + \vec{E}_{03} = -3\vec{E}_0$ , — определится также величина и направление вектора  $\vec{E}_0$ .

Таким образом, изложенный ранее способ теоретического решения задачи о несимметричном электрическом режиме работы трехфазной дуговой печи может быть дополнен решением ее на основании непосредственных замеров, которые осуществляются на работающей печи. Естественно, что замеры величины  $E_{012}$ ,  $E_{023}$ ,  $E_{031}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  должны быть произведены одновременно при более или менее спокойном горении дуг во всех трех фазах печи.

**Изменение электрического режима в одной фазе.** Разнообразие возможных комбинаций нарушения электрического режима работы в отдельных фазах печи заставляет ограничиться рассмотрением случая, когда изменяются условия горения дуги в электроде только одной фазы. При этом предполагается, что автоматические регуляторы остальных фаз печи поддерживают постоянной одну из следующих величин: а) напряжение дуги ( $E_0 = \text{const}$ ); б) ток в электроде ( $I = \text{const}$ ); в)  $mI - nE_0 = 0$  [Л. 1]; г)  $mI - nE_0 + p = 0$ .



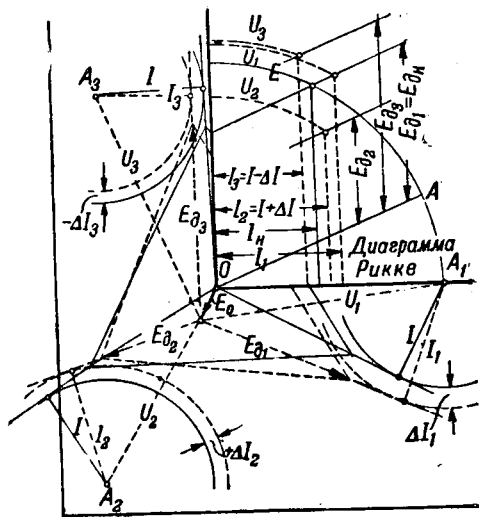
Изменение тока в электроде первой фазы от  $I_1 = 0$  (при прекращении горения дуги в этой фазе) до  $I_1 = I_{кз}$  (при  $E_{d1} = 0$ ) вызывает смещение нулевой точки векторной диаграммы. Это смещение может быть определено рассмотренным выше способом. Оно оказывается различным в зависимости от степени и характера нарушения электрического режима в первой фазе, параметров электрометаллургической установки ( $\beta = \frac{F_d}{E_{mp}}$  и  $\gamma = \frac{X}{R}$ ) и от типа автоматического регулятора, управляющего работой электродных механизмов. Влияние последнего фактора показывают кривые рис. 4.

Зная положение на векторной диаграмме нулевой точки печи, нетрудно определить соответствующие ей полные падения напряжения в каждой фазе и, перенеся их значения на диаграмму Рикке, найти ток и напряжение дуги в каждой фазе печи, линейные напряжения печи и пр.

Рассмотрим подробнее характеристики трехфазной дуговой печи при регулировании их автоматическими регуляторами главнейших типов.

**а) Регулирование на постоянное напряжение.** На рис. 4, а представлена кривая смещения нулевой точки и характеристики печи при условии, что изменение длины дуги, напряжения и тока в дуге первой фазы не изменяет положения электродов в двух других фазах печи. Это имеет место, когда в качестве импульса для работы автоматического регулятора используется напряжение дуги, т. е. когда катушка каждого регулятора присоединена одним своим концом к металлической ванне, а другим — к соответствующему электроду трехфазной печи.

Получаемые для этого случая характеристики имеют значение и при рассмотрении регуляторов всех других типов. Они позволяют оценить те



д) Влияние нарушения режима во 2-й и 3-й фазе в разные стороны

Рис. 4.

мгновенного характера изменения электрического режима работы отдельных фаз трехфазной дуговой печи, которые возникают при внезапных нарушениях условий горения дуги в одной фазе (обрыв дуги, короткое замыкание, выдувание дуги и пр.), когда регуляторы остальных фаз печи еще не успевают произвести перемещения электродов этих фаз.

Естественно, что изменение в ту или другую сторону тока в электроде одной фазы вызывает изменение тока в электродах остальных фаз. Характер этого изменения (увеличение или уменьшение тока) для всех электродов одинаков, однако величина его при наличии индуктивного сопротивления цепи электрометаллургической установки ( $X \neq 0$ ) для различных фаз различна. Это различие проявляется особенно резко

при увеличении силы тока выше его нормального значения ( $I > I_n$ ).

Изменение тока в электродах второй и третьей фаз печи не вызывает изменения напряжения дуги в этих фазах, если, конечно, другие условия ее горения (длина дуги, состояние электродов и пр.) остаются неизменными, но величина отношения

$$\beta' = \frac{E_{\partial}}{U}, \quad (8)$$

определяющего условие непрерывного процесса горения вольтовой дуги переменного тока [Л. 2], изменяется. Для представленного на диаграмме частного случая

$$\gamma = \frac{X}{R} = 2,5 \text{ и } \beta = \frac{E_{\partial n}}{E} = 0,7$$

прекращение горения дуги в первой фазе вызы-

вает увеличение величины  $\beta' = \frac{E_{\partial_2}}{U_2}$  для дуги

второй фазы до 0,82. Условия непрерывного процесса горения дуги в этой фазе резко ухудшаются и дуга может стать мало устойчивой и прекратить горение. Естественно, что при  $I_1 = 0$  и  $I_2 = 0$   $I_3$  должно также стать равным нулю, т. е. должно прекратиться горение дуги во всех трех фазах печи. Из этого можно сделать вывод, что при выборе параметров электрометаллургической установки и нормального режима ее работы, обеспечивающих условия непрерывного процесса горения дуги, необходимо учитывать соотношения между  $\gamma = \frac{X}{R}$  и  $\beta = \frac{E_{\partial}}{E}$  не только при нормальном режиме работы трехфазной печи ( $I_1 = I_2 = I_3$  и  $E_{\partial_1} = E_{\partial_2} = E_{\partial_3}$ ), но и те изменения

величины  $\beta' = \frac{E_{\partial}}{U}$ , которые могут возникнуть

при несимметричных нарушениях режима работы в отдельных фазах печи.

б) *Регулирование на постоянный ток.* Для случая использования в качестве импульса для работы автоматического регулятора величины тока в электроде (регулятор ГЕС) смещение нулевой точки и характеристика печи при нарушении нормальных условий горения дуги в одной фазе печи представлены на рис. 4,б. При рассмотрении этих характеристик, резко отличающихся от представленных на рис. 4,а, необходимо учесть следующее.

При медленно происходящем уменьшении тока в электроде первой фазы, когда автоматические регуляторы двух других фаз печи успевают перемещать электроды таким образом, что ток в них остается постоянным, возникает подъем электрода второй фазы и опускание электрода третьей фазы печи. В момент прекращения горения дуги в первой фазе ( $I_1 = 0$ ) электрод третьей фазы оказывается опущенным до соприкосновения с металлической завалкой ( $E_{\partial_3} = 0$ ). Полное линейное напряжение печного трансформатора  $E_{23}$  оказывается приложенным к дуге второй фазы.

Совершенно другой характер перемещения электродов имеет место при внезапном прекращении горения дуги в первой фазе. При  $I_1 = 0$  печь превращается в однофазного потребителя энергии. Линейное напряжение печного трансформатора  $E_{23}$  оказывается приложенным к двум последовательно включенным дугам, горящим при напряжении  $E_{\partial_2} = E_{\partial_3} = E_{\partial n}$ . Ток в электродах второй и третьей фаз падает до значения  $I_2 = I_3$ , меньшего, чем  $I_n$ . Автоматические регуляторы этих фаз получают импульс на опускание электродов, которое и произойдет, если обрыв дуги в первой фазе будет носить длительный характер. Это опускание электродов будет совершаться до тех пор, пока ток в них не достигнет нормальной величины  $I_2 = I_3 = I_n$ . Однако, регулятор на постоянство тока не может при этом обеспечить равенство напряжений ( $E_{\partial_2} = E_{\partial_3}$ ) и длин дуг в этих фазах. Положительные нулевой точки на прямой части диаграммы при этом режиме ( $I_1 = 0$ ) оказывается неопределенным.

Подобным же образом внезапно возникшее в первой фазе печи короткое замыкание между электродом и металлической завалкой приводит к резкому повышению тока в электроде третьей фазы, носящему характер короткого замыкания в ней, несмотря на нормальное положение электрода этой фазы, нормальные длину и напряжение дуги. При медленном нарастании тока в электроде первой фазы или при длительном коротком замыкании в ней автоматические регуляторы других фаз, поддерживая ток в них постоянным, вызовут сильное удлинение дуги третьей фазы и укорочение дуги второй фазы.

Таким образом, использование регуляторов этого типа для автоматического регулирования электрического режима работы трехфазных дуговых печей приводит к большим и резким перемещениям электродов всех трех фаз даже в том случае, когда нарушения нормальных условий горения дуги имеют место только в одной фазе печи. Для автоматического регулирования трехфазной дуговой печи в период расплавления твердой завалки, когда нарушения нормального режима возникают непрерывно в каждой из фаз печи, регулятор этого типа оказывается мало пригодным. По крайней мере в первый период плавки, до стабилизации горения дуг, приходится переходить на ручное управление электродами.

Рис. 4,д иллюстрирует еще одно свойство регуляторов этого типа, а именно—небольшие отклонения тока от нормального его значения, даже не превышающие чувствительность регулятора  $\Delta I$  [Л. 1]; в том случае, когда они возникают в электродах двух различных фаз печи и имеют различный знак ( $I_2 = I_n + \Delta I$ ,  $I_3 = I_n - \Delta I$ ), могут вызвать в электроде третьей фазы изменение тока ( $\Delta I_1$ ), по величине превышающее чувствительность регулятора. Электрод этой фазы будет выведен из нормального своего положения, хотя условия горения дуги в этой

фазе сохраняются нормальными и нарушения режима в других фазах настолько невелики, что не создают импульса к изменению положения электродов этих фаз.

в) *Регулирование на постоянное сопротивление дуги.* Переходя к рассмотрению характеристик автоматического регулятора третьего типа, необходимо отметить, что условие

$$mI - nE_{\partial} = 0 \quad (9)$$

эквивалентно условию

$$\frac{E_{\partial}}{I} = \frac{m}{n} = R_{\partial} = \text{const.} \quad (10)$$

Таким образом автоматические регуляторы типа Харьковского электромеханического завода (ХЭМЗ), использующие в качестве импульса равновесие между изменением тока в электроде и величиной напряжения дуги (электрические весы), по существу являются регуляторами на постоянное сопротивление дуги.

На рис. 4,с представлены характеристики трехфазной печи, регулируемой автоматическим регулятором этого типа. Характеристики построены по методу, аналогичному тому, какой был использован и раньше. Заметим, что для этого случая оказывается возможным использовать и обычный аналитический метод расчета, так как комплексы полного сопротивления и проводимостей отдельных фаз оказываются при этом величинами, не зависящими от тока в электродах.

Представленные на рис. 4 характеристики позволяют выяснить условия работы автоматических регуляторов и построить графики их работы при восстановлении нормального режима работы трехфазной дуговой печи после нарушений его, возникших в одной или в нескольких фазах.

Положим, например, что в трехфазной печи, снабженной автоматическим регулятором ХЭМЗ, при нормальном положении электродов произошел обрыв горения дуги в первой фазе печи. В момент погасания дуги ( $I_1 = 0$ ) ток в электродах двух других фаз упадет (рис. 4) и начнется опускание всех трех электродов. Электрод первой фазы будет опускаться до тех пор, пока конец его не придет в соприкосновение с металлической завалкой в печи, а электроды остальных фаз, — до установления равновесия  $mI - nE_{\partial} = 0$ . Зная скорость движения механизма подъема и опускания электродов, нетрудно определить время, необходимое на указанные перемещения электродов.

В момент короткого замыкания в первой фазе ( $E_{\partial 1} = 0$ ) ток во всех трех электродах внезапно возрастает до величины, значительно превышающей нормальное ее значение, и электроды всех трех фаз начнут подниматься. Если по какой-либо причине (задержка в реверсировании двигателя, погружение электрода в металл и пр.) электрод первой фазы не сразу оторвется от завалки, то электроды второй и третьей фаз могут подняться выше, чем это соответствует

нормальному их положению. После отрыва электрода первой фазы от металла и образования в этой фазе дуги электроды других фаз должны снова опускаться, чтобы прийти в нормальное свое положение.

Построение таких графиков восстановления нормального режима, хотя и страдает известной схематичностью<sup>1</sup>, все же позволяет выяснить различные стороны работы автоматических регуляторов различных типов. В частности, при этом наглядно выявляются преимущества регуляторов, в которых используется одновременно импульс тока и импульс от напряжения дуги. Вместе с тем становится очевидным, что и регуляторы типа ХЭМЗ не свободны от недостатков, связанных с излишними перемещениями электродов. Для восстановления нормального электрического режима работы трехфазной печи в данном случае, кроме опускания и подъема электрода той фазы, где прервалось горение дуги, происходят опускание, подъем и вторичное опускание электродов остальных фаз. Это создает неблагоприятные условия работы контакторов, при помощи которых регулятор производит переключение двигателей механизмов подъема и опускания электродов.

#### Вращающиеся регуляторы типа Regulex.

Большим преимуществом обладают вращающиеся регуляторы типа Demag, Regulex [Л. 3] и др., в которых изменение направления вращения двигателей электродных механизмов, их пуск и остановка совершаются без каких-либо переключений в цепи, соединяющей якорь двигателя с якорем генератора.

Кроме присущего всем вращающимся регуляторам дуговых печей свойства — автоматически изменять скорость подъема и опускания электродов в зависимости от степени нарушения электрического режима работы печи — регулятор типа Regulex заслуживает большого внимания с точки зрения рассматриваемой теории автоматического регулирования трехфазных дуговых печей.

Основное уравнение регуляторов этого типа (рис. 5), определяющее условия их работы и вытекающее из равновесия потоков возбуждения при нормальном режиме работы печи, имеет вид:

$$mI - nE_{\partial} - p = 0. \quad (11)$$

В этом уравнении:  $mI$  — поток возбуждения, создаваемый обмоткой, включенной через выпрямитель в цепь тока электрода;  $nE_{\partial}$  — поток возбуждения, создаваемый обмоткой, включенной через выпрямитель к электродам дуги и пропорциональный напряжению дуги;  $p$  — поток, создаваемый обмоткой независимого возбуждения, остающийся постоянным при нарушении режима работы печи;  $m$ ,  $n$  и  $p$  представляют параметры

<sup>1</sup> При построении их не учитываются такие факторы, как переходы явления при изменении электрического режима, влияние демпфирующих приспособлений в регуляторе, время разгона, остановки и реверсирования двигателя и пр.



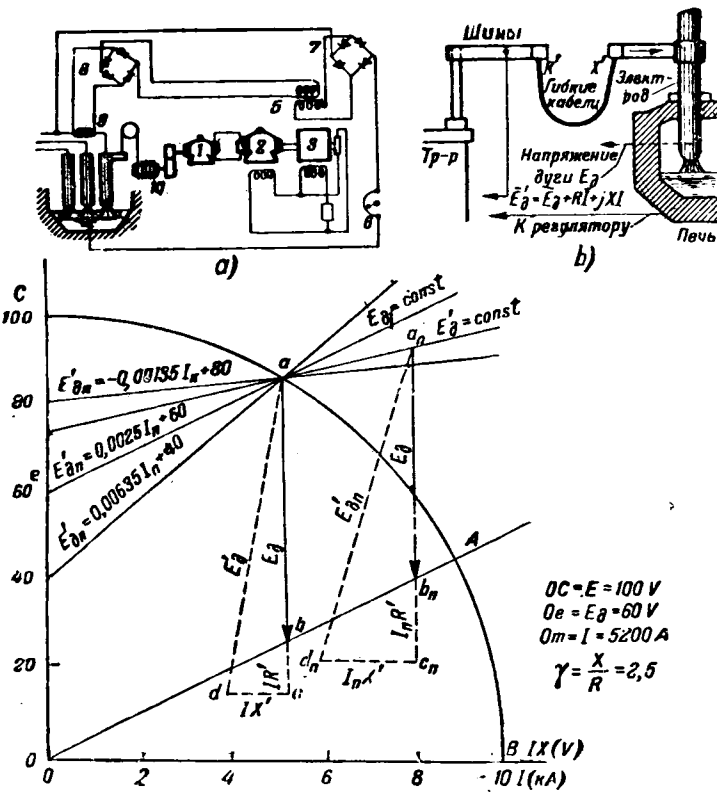


Рис. 5. Работа печи с регулятором Regulex.

*a* — схема включения регулятора; *b* — схема включения катушки напряжения; 1 — мотор подъема; 2 — генератор подъема; 3 — Regulex; 4 — дополнительная токовая обмотка печи; 5 — дополнительная обмотка напряжения; 6 — установочный реостат; 7, 8 — выпрямители; 9 — трансформатор тока; 10 — механизм подъема электрода.

регулятора и зависят от числа витков соответствующих обмоток возбуждения, добавочных сопротивлений в цепи их и пр.

Наличие трех независимых друг от друга параметров в уравнении (11) определяет возможность изменять в очень широких пределах характеристику регуляторов этого типа. Действительно, полагая один из параметров равным нулю, т. е. размыкая одну из цепей возбуждения, можно соответственно получить:

$$E_d = \text{const} \text{ (при } m = 0), I = \text{const} \text{ (при } n = 0),$$

$$ml - nE_d = 0 \text{ (при } p = 0)$$

и, таким образом, воспроизвести характеристику любого из регуляторов рассмотренных ранее типов. При  $m \neq 0, n \neq 0$  и  $p \neq 0$ . Подбирая соответствующим образом эти параметры, можно характеристике регулятора типа Regulex придать вид прямой

$$E_d = AI + B, \tag{12}$$

имеющей какой угодно наклон. Практическое значение этого обстоятельства показывает следующий пример.

Положим, что поставлена задача — создать для трехфазной дуговой печи такой регулятор, чтобы при нарушении нормального режима горения дуги в одной фазе печи установление нормального режима работы печи не сопровождалось перемещением электродов других фаз.

Из рассмотренных ранее типов автоматических регуляторов этим свойством обладает регулятор на постоянное напряжение дуги ( $E_d = \text{const}$ ). Однако практическое использование этого принципа автоматического регулирования дуговой печи встречает затруднение в том, что он требует присоединения катушки напряжения регулятора непосредственно одним концом к металлической завалке в печи, а другим — к нижнему концу раскаленного электрода. В действительности точками присоединения этой катушки в цепь электрода печи являются металлический корпус печи и шины, несущие ток от печного трансформатора к электроду. Катушка регулятора оказывается включенной на напряжение:

$$\bar{E}'_d = \bar{E}_d + R\bar{I} + jX\bar{I}, \tag{13}$$

где  $R'$  и  $X'$  — активное и реактивное сопротивления цепи электрода между точками присоединения катушки. Изменение тока в электроде при  $E_d = \text{const}$ , очевидно, вызовет перемещение электрода.

На рис. 5 точка *a* соответствует нормальному режиму работы печи. На представленной диаграмме

$$ab = E_d, bc = R'I, ad = X'I \text{ и } ad = E'_d.$$

Положим, что ток в электроде изменил свое значение (точка *n*). Активное и реактивное падение напряжения в цепи при токе  $I_n$  будут:  $R'I_n = b_n c_n$  и  $X'I_n = c_n d_n$ . Так как в регуляторе фактически используется импульс напряжения  $E'_d = \text{const}$ , то при токе  $I_n$  положение электрода должно измениться так, чтобы  $a_n d_n = ad$ . Следовательно, напряжение дуги  $E_{dn}$ , отвечающее силе тока  $I_n = On$ , представится отрезком  $a_n b_n$ . Повторяя это построение для других значений тока в электроде, получим характеристику регулятора с учетом влияния падения напряжения в цепи. Естественно, что регулятор с такой характеристикой уже не будет регулятором на постоянное напряжение дуги.

Падение напряжения в цепи оказывает влияние на характеристики автоматических регуляторов всех типов, если в качестве импульса для их работы используется изменение напряжения дуги. В частности, для регулятора типа Regulex уравнение (11) в этом случае должно быть заменено уравнением

$$ml - nE'_d - p = 0 \tag{14}$$

или

$$E'_d = \frac{m}{n} I + \frac{p}{u}. \tag{15}$$

Коэффициенты  $\frac{m}{n}$  и  $\frac{p}{n}$  в этом уравнении должны быть подобраны так, чтобы при нормальном режиме работы печи (для диаграммы рис. 5.  $I = 5200 \text{ A}, E_d = 60 \text{ V}$ ) величина вектора

$$\bar{E}'_d = \bar{E}_d + R\bar{I} + jX\bar{I}$$

соответствовала отрезку *ad* (для рассматриваемого частного случая  $ad = 73 \text{ V}$ ). Таким образом

для подбора числовых значений коэффициентов  $\frac{m}{n}$  и  $\frac{p}{n}$  получаем уравнение:

$$73 = \frac{m}{n} 5200 + \frac{p}{n}. \quad (16)$$

Задавая произвольно  $\frac{p}{n} = 0, 10, 20$ , получим соответственно значения  $\frac{m}{n}$ , равные 0,014; 0,012; 0,01.

На рис. 5 нанесены характеристики, отвечающие:

$$\left. \begin{aligned} E'_d &= 0,00635 I_n + 40, \\ E'_d &= 0,0025 I_n + 60, \\ E'_d &= 0,00135 I_n + 80. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Характеристика, отвечающая значениям коэффициентов

$$\frac{p}{n} = 60 \text{ и } \frac{m}{n} = 0,0025,$$

удовлетворяет условию  $E_d = \text{const}$ . Таким образом поставленная задача—восстановление нормального режима работы трехфазной дуговой печи с минимальными перемещениями электродов и устранение ненужного нарушения нормальных условий горения дуги в тех фазах, где длина дуги остается нормальной,—может быть практически решена путем применения автоматического регулятора типа Regulex, если подобрать соответствующим образом его параметры. Как бы ни изменялся ток  $I_n$  в электроде, если только длина дуги и ее напряжение  $E_d$  не изме-

няются, соотношения между  $I_n$  и  $E'_d$  удовлетворяют условию (14) и перемещения электрода не возникает. Изменение же условий горения дуги ( $E_d \geq E_{dn}$ ) нарушит равновесие потоков возбуждения в регуляторе и приведет к подъему или опусканию электродов.

**Закключение.** Выводы, к которым приводит рассмотрение характеристик автоматических регуляторов, находятся в качественном согласии с результатами наблюдений их работы. Это, конечно, не исключает необходимости более детального теоретического и экспериментального изучения регуляторов с учетом таких факторов, как несинусоидальная форма кривых тока и напряжения дуги, переходные явления в моменты нарушения и восстановления нормального режима, влияние пусковых характеристик привода электродных механизмов и пр. Систематическая разработка теории автоматического регулирования дуговых печей является очень актуальной задачей для развития электроплавки. Приходится констатировать, что, несмотря на огромное количество систем и конструкций автоматических регуляторов для дуговых печей, стандартного типа регулятора, удовлетворяющего условиям работы дуговой печи и обеспечивающего спокойный электрический режим ее работы в течение всей плавки, все еще не существует.

#### Литература

1. С. И. Тельный. Регулирование дуговых печей на основе круговых диаграмм и теории вольтовой дуги. Известия ОГН АН СССР, № 6, 1945.
2. С. И. Тельный и И. Т. Жердев. Непрерывное горение трехфазной вольтовой дуги. Теория и практика металлургии, № 8, 1937.
3. Montgomery. A Method for the Control of Electric Arc Furnaces. Blast Furnaces and Steel Plant, № 4, 1942.



# Совместная работа автоматических регуляторов на трехфазных электросталеплавильных печах

Кандидат техн. наук Ю. Е. ЕФРОЙМОВИЧ

Москва

Современные электросталеплавильные печи строятся трехфазными без вывода на подину печи нулевой точки обмоток трансформатора. В этом случае система токов печи подчиняется первому закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (1)$$

При этом условии изменение тока в одной из фаз автоматически сказывается на изменении регулируемых параметров во всех трех фазах, и в этом смысле работа трех регуляторов, управляющих каждый порознь перемещением одного электрода, совместна.

В связи с этим уместно выяснить поведение регуляторов различных систем при несимметричных возмущениях, возникающих в различных фазах печи. Уместно также выяснить, насколько целесообразно в случае регулирования дуговых печей требование зависимости действия регуляторов, когда на любое отклонение режима в дуговой печи реагирует лишь тот из регуляторов, в контролируемой фазе которого имела место причина нарушения симметрии токов. Эти вопросы имеют большую практическую ценность еще и потому, что *большая часть периода расплавления — это, по существу, несимметричный трехфазный режим.*

Изучить все возможные состояния рассматриваемой системы не представляется возможным. Исследованы следующие частные случаи: а) длина дугового промежутка в двух фазах неизменна, в третьей фазе имеют место любые отклонения режима — от однофазного к. з. электрода на металл до обрыва дуги; б) в одной из фаз электрод опущен в металл, в двух других фазах длины дуг, будучи равными, изменяются в широких пределах; в) в двух фазах электроды опущены в металл, в третьей фазе длина дуги изменяется в широких пределах.

Анализ этих режимов и симметричных трехфазных режимов позволяет ответить на вопрос о состоянии и характеристиках системы при любом однофазном, симметричном двухфазном или трехфазном изменении длины дуговых разрядов.

*Приводятся характеристики, полученные для ряда несимметричных электрических режимов работы трехфазной дуговой электросталеплавильной печи. Рассматриваются вопросы статики совместной работы трех автоматических регуляторов, установленных для регулирования мощности трехфазной электросталеплавильной печи.*

В дальнейшем предполагается, что любому возникшему возмущению предшествовала работа печи при равных длинах дуг во всех трех фазах. Значение тока, соответствующее этому режиму, используется для характеристики длины дугового разряда в фазах, где электроды полагаются неподвижными.

Для получения указанных характеристик было произведено (на модели трехтонной дуговой печи) аналитическое и экспериментальное исследование. Случай „а“ был частично исследован на промышленной трехтонной дуговой печи. Исследуемая печь имеет трансформатор типа ЭПТМ 1300/6 мощностью 1300 кВА, высшая ступень вторичного напряжения 190 В, номинальный вторичный ток — 4000 А. Параметры короткой сети с дросселем:  $X = 12 \cdot 10^{-3} \Omega$ ,  $R = 3,4 \cdot 10^{-3} \Omega$ .

В статье приведены результаты исследований на модели. Модель представляла собой набор активных и реактивных сопротивлений. Дуговая нагрузка имитировалась активным сопротивлением. С помощью приборов контролировались активная, полезная и реактивная мощности в системе, токи и напряжения на дугах. Для возможности изучения характеристик печи на модели были сделаны следующие допущения: 1) напряжение на дуге не зависит от силы тока, определяется материалом электродов и линейно зависит от длины дуги; 2) мощность питающей сети бесконечно велика; 3) изменением реактивного и активного сопротивления установки от изменения длины и положения электродов, а также от влияния железных масс пренебрегаем; 4) в конструктивном отношении печь полагается симметричной; 5) током намагничивания трансформатора пренебрегаем; 6) коэффициенты формы кривых тока и напряжения на дуге приняты равными единице.

На рис. 1 приведены значения токов, полученные исследованием на модели при изменении длины дуги в фазе 2 и исходном значении тока  $I_n = 4000 \text{ А}$ .

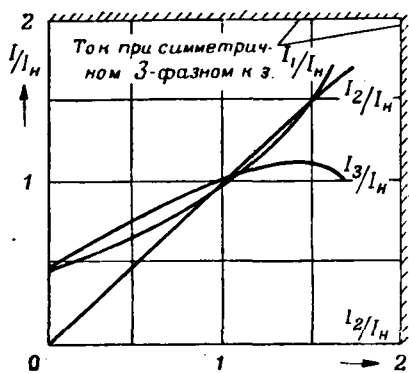


Рис. 1. Токи в фазах в долях исходного значения симметричного режима при изменении длины дуги фазы 2.

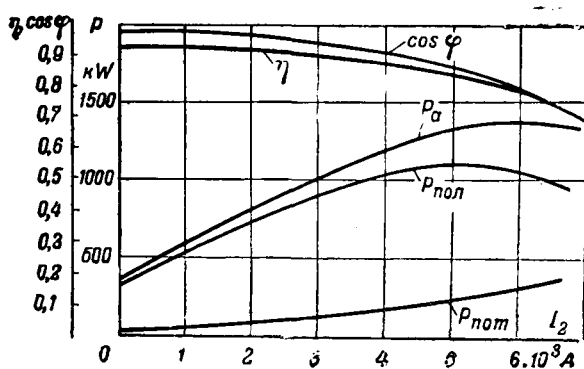


Рис. 2. Активная, полезная мощность и мощность потерь, коэффициенты мощности и полезного действия при изменении длины дуги фазы 2.

На рис. 2 приведены полученные из этого же опыта значения мощностей активной, полезной и потерь, а также коэффициентов мощности и полезного действия.

На рис. 3 и 4 приведены те же характеристики, но для условия, когда электрод фазы 2 касается металла. Длины дуг в фазах 1 и 3 равны, но изменяются в широких пределах.

На рис. 1 — 4 по оси абсцисс отложены значения токов, какие имели бы место при симметричном режиме, который нарушен перемещением электрода фазы 2.

На основании полученных характеристик можно сделать следующие выводы.

1. При однофазном изменении режима токи в фазах с равными длинами дуговых промежутков и равными напряжениями и на дугах значительно отличаются по величине. Причина этого рода несимметрии определяется смещением нулевой точки нагрузки и поясняется векторной диаграммой, приведенной на рис. 5 для случая, когда электрод фазы 2 опущен в металл.

Если длина дуги в одной из фаз уменьшится, то большее значение тока будет в той из двух фаз с равными длинами дуг, которая по направлению вращения векторов будет отстающей. Обратная картина будет иметь место, если в одной из фаз длина дуги увеличится. Соотношение токов в фазах с равными длинами дуг определяется соотношением активного и реактивного сопротивлений и зависит от исходного режима.

2. Токи в фазе, в которой дуга отсутствует, и в фазе, опережающей ее, весьма близки по величине. При всех условиях токи при данном опыте остаются по величине меньше тока трехфазного симметричного к. з.

3. При однофазном обрыве дуги полезная мощность, вводимая в печь, резко падает. Для рассматриваемой установки, где обрыв дуги в одной из фаз производится после нормального режима  $I_n = 4000$  А, приток полезной мощности уменьшается на 67,6%. Чем меньшая величина рабочего тока задана, тем больше будет относительное изменение полезной мощности.

4. При однофазном к. з. в широком диапазоне изменений исходных рабочих токов абсолютная величина полезной мощности остается

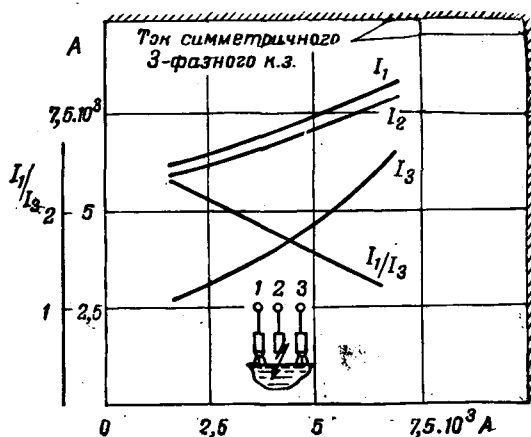


Рис. 3. Токи в фазах в случае касания электрода фазы 2 металла.

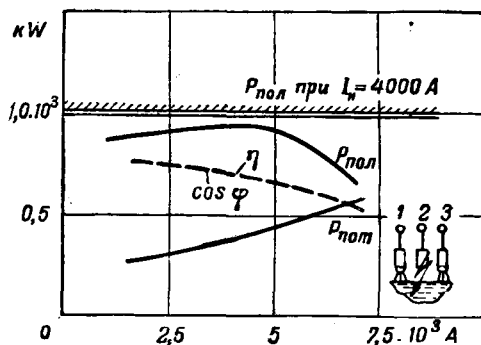


Рис. 4. Активная, полезная мощность и мощность потерь, коэффициенты мощности и полезного действия в случае касания электрода фазы 2 металла.

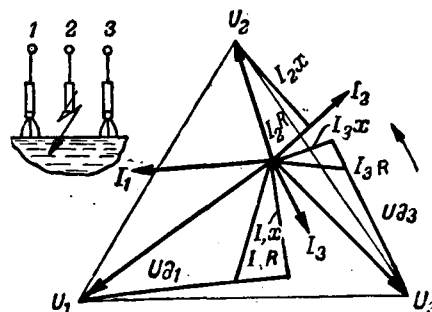


Рис. 5. Векторная диаграмма для случая касания фазы 2 металла.

почти неизменной; относительная при переходе от симметричного режима к рассматриваемому падает с уменьшением исходной длины дуги. При переходе от симметричного тока  $I_n = 4000$  А к замыканию одного из электродов на металл полезная мощность падает всего на 6,5%, электрический к. п. д.—на 17%, коэффициент мощности—на 22%.

5. Если при трехфазном симметричном режиме полезная мощность меньше максимальной предельной, то при однофазном изменении длины дугового промежутка кривые активной и полезной мощностей имеют максимум при токе, больше чем исходный. Величина этого тока зависит как от параметров сети, так и от исходного режима.

На рис. 6 и 7 приведены характеристики печи при двухфазном к. з. и переменной длине дугового промежутка во второй фазе. Векторная диаграмма для этого случая приведена на рис. 8. Токи в фазах, в которых электроды касаются металла, весьма резко различаются. В одной из них—отстающей по направлению вращения фаз от той, где дуговой разряд существует,—величина тока заметно превышает значение трехфазного тока к. з. (в рассматриваемой печи на 9%).

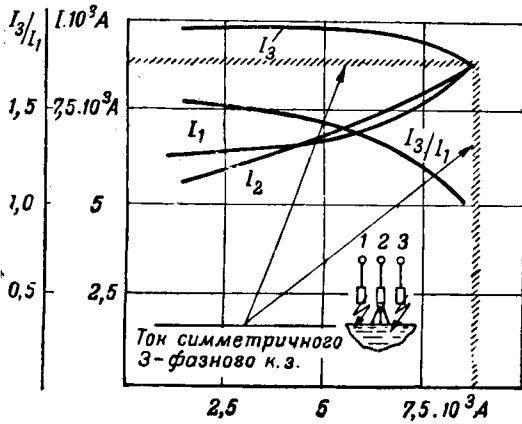


Рис. 6. Токвые характеристики печи при двухфазном к. з.

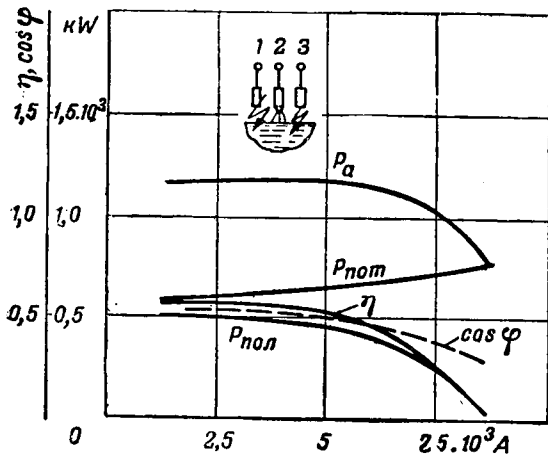


Рис. 7. Активная, полезная мощность и мощность потерь, коэффициенты мощности и полезного действия при двухфазном к. з.

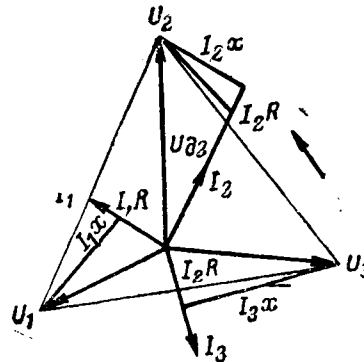


Рис. 8. Векторная диаграмма для случая рис. 7 и 8.

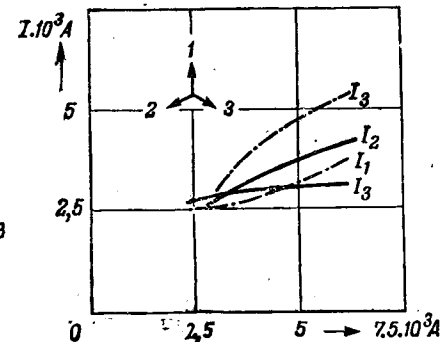


Рис. 9.

Отношение токов в фазах, в которых электроды касаются металла, дается следующим выражением:

$$\frac{I_3}{I_1} = \sqrt{\frac{\rho_2^2 + \rho_2 \cdot (3 \cdot R + \sqrt{3} X) + 3 \cdot Z_k}{\rho_2^2 + \rho_2 \cdot (3 \cdot R - \sqrt{3} X) + 3 Z_k}}, \quad (2)$$

где  $\rho_2$  — сопротивление в омах дугового промежутка во второй фазе;

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Это отношение токов достигает максимума при

$$\rho_2 = \sqrt{3 Z_k}. \quad (3)$$

В значительном диапазоне исходных рабочих токов активная и полезная мощности при двухфазном к. з. мало меняются с изменением величины исходного нормального тока, причем активная мощность примерно равна нормальной, а полезная составляет около 50% соответствующих значений при симметричных токах и  $I_n = 4000$  А. Заметно уменьшаются при этом режиме  $\cos \phi$  и к. п. д.

Изложенные положения, полученные на модели, оказалось довольно трудно проверить на действующей печи как из-за организационных условий производства, так и вследствие того, что лишь в течение небольшой части периода рафинировки уровень ванны малоподвижен. Проверку удалось произвести для двух режимов рафинировки при включении обмоток трансформатора на высокой стороне в звезду и зашунтированным дросселем.

На рис. 9 приведены данные однофазного изменения режима. Общий характер кривых, снятых при двух разных режимах (в первом опыте были неподвижны электроды первый и третий, во втором — второй и третий электроды), совпадает с данными, полученными на макете. Отсутствие дросселя предопределяет меньшее значение отношений токов.

Используя полученные зависимости, рассмотрим условия совместной работы регуляторов различных систем в условиях статики при возникновении несимметричных отклонений режима. Рассмотрению подвергнем автоматические регуляторы, у которых небаланс  $\Delta M$ , возникающий в измерительном органе, пропорционален одной из следующих трех величин:

а) квадратичному значению измеряемого тока (регуляторы, работающие на этом принципе, поддерживают постоянство реактивной мощности и электрических потерь):

$$\Delta M = M_n \left[ \left( \frac{I}{I_n} \right)^2 - 1 \right]; \quad (4)$$

б) разности квадратичных значений тока печи и напряжения на дуге; если это напряжение совпадает или достаточно близко по величине к напряжению горения дуги, то регулятор, работающий на этом принципе, будет поддерживать постоянство  $\cos \varphi$  и к. п. д. печи:

$$\Delta M = M_n \left[ \left( \frac{I}{I_n} \right)^2 - \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \right]; \quad (5)$$

в) разности первых степеней значений тока и напряжения на дуге<sup>1</sup>:

$$\Delta M = M_n \left( \frac{I}{I_n} - \frac{U}{U_n} \right). \quad (6)$$

Для регуляторов, расклассифицированных по регулируемому параметру, в таблице приводятся значения момента небаланса в процентах  $\left( \frac{\Delta M}{M_n} \cdot 100 \right)$ , подсчитанного для однофазного обрыва дуги и случая соприкосновения с металлом электрода во второй фазе, в то время как в двух других фазах имеют место нормальные длины дуг, соответствующие симметричному режиму и току  $I_n = 4000$  А. При составлении таблицы были использованы данные опыта, приведенные на рис. 1. Сопротивление участка короткой сети между концом электрода и точкой, откуда снимается напряжение для измерительного органа, принято равным:

$$\Delta R = 3 \cdot 10^{-3} \text{ и } X = 2,2 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Значения момента небаланса для различных регуляторов при двух несимметричных режимах

Группа регуляторов	Уравнение покая измерительного элемента	$\frac{\Delta M}{M_n} \cdot 100$ по фазам					
		Обрыв дуги			Однофазное к. з.		
		1	2	3	1	2	3
I. Реактивной мощности и мощности потерь . . . . .	$I^2 = \text{const}$	-76,5	-100	-76,5	+225	+180	+2
II. Коэффициента мощности и к. п. д. . . . .	$c_1 I^2 - c_2 U^2 = 0$	-70	-286	-70	+203	+275	0
III. Коэффициента мощности и к. п. д. . . . .	$c_1 I - c_2 U = 0$	-45	-169	-45	+70	+142	0

Как следует из таблицы, все рассмотренные регуляторы не отвечают условию независимости действия. Лучшее всего удовлетворяют этому условию регуляторы, у которых небаланс в измерительном органе пропорционален первой степени измеряемых параметров. Отличие между регуляторами группы I и II в этом отноше-

<sup>1</sup> На этом принципе, в частности, работает индукционное реле с подмагничиванием, разработанное автором в МЭИ и испытанное в 1941 г. на промышленной печи.

нии невелико. Оно зависит от наличия или отсутствия дросселя на высокой стороне и выбора точки короткой сети, с которой снимается напряжение для измерительной обмотки регулятора.

Рассмотрение вопроса о предпочтительности тех или иных требований к трем регуляторам, работающим совместно на трехфазной дуговой печи, было бы не полным, если не упомянуть о влиянии устойчивости работы регуляторов.

Существует большое число действующих регуляторов, вызывающих в процессе плавки незатухающие колебания электродов, а следовательно, колебания величин тока и мощности. На этих установках колебания одного электрода вызывают перемещение другого электрода и т. д. В этих установках, по нашему мнению, необходимо прежде всего позаботиться об увеличении запаса устойчивости регуляторов (Л. З).

Исследования автоматических регуляторов, отличающихся весьма высокой устойчивостью<sup>2</sup>, показывают, что нормально электроды без качаний медленно следуют за уровнем подплавившегося металла. Значительные нарушения режима появляются лишь в период обвалов шихты, вызывающих однофазные, двухфазные и, реже, трехфазные эксплуатационные к. з., которые желательно устранять в наиболее короткий срок.

При этих условиях можно считать, что зависимость в работе регуляторов различных фаз, которая была получена в регуляторах, рассмотренных выше, является, очевидно, выгодной. Вопрос о выборе группы регуляторов может быть решен в результате промышленного исследования регуляторов различных групп, поставленных в одинаковые условия работы.

Литература

1. И. Н. Вознесенский. Сборник „За советское электрооборудование“, 1937.
2. Ю. Е. Ефремович. Теория, расчет и исследование индукционных автоматических регуляторов для дуговых печей (отчет). МЭИ, 1941.
3. Ю. Е. Ефремович. Некоторые положения теории регулирования дуговых электросталеплавильных печей. Электричество, № 12, 1945.

<sup>2</sup> Регуляторы с обратной связью и регулированием, увязываемым с технологическим процессом, установлены автором на печах Кузнецкого металлургического комбината.



# К теории сложных несимметричных режимов электрических систем

Доктор техн. наук, проф. Н. Н. ЩЕДРИН

Ленинградский политехнический институт и.м. Калинина

Изучение несимметричных режимов имеет значение, главным образом, для техники релейной защиты и защиты линий связи от влияния линий передачи энергии. До последнего времени несимметричные режимы грязялись и изучались как чисто аварийные режимы — простые и двоянные несимметричные короткие замыкания. В военные годы в связи с применением автоматического пофазного повторного включения стала прививаться практика длительной работы отдельных линий с выключенной фазой<sup>1</sup>, — то, что можно назвать „неполнофазным режимом“ электрической системы. В таком режиме не исключена возможность новых нарушений в виде несимметричных коротких замыканий. Тогда должен иметь место сложный несимметричный режим — комбинация разрыва фазы с несимметричным коротким замыканием. В общем случае под сложным несимметричным режимом можно понимать совокупность нескольких несимметричных разрывов (выключений) фаз или несимметричных коротких замыканий или, наконец, комбинацию тех и других.

Анализ несимметричных разрывов на основе метода симметричных составляющих можно вести так же, как и несимметричных коротких замыканий. Обратное, любое несимметричное короткое замыкание обычного типа можно трактовать как несимметричный разрыв в трехфазной симметричной цепи. Например, однополюсный, несимметричный, разрыв и двухполюсное короткое замыкание на землю характеризуются одной и той же по форме совокупностью граничных условий (рис. 1):

$$\begin{aligned} \dot{U}_b &= 0, \\ \dot{U}_c &= 0, \\ \dot{I}_a &= 0. \end{aligned}$$

*Дано обобщение понятия несимметричного нарушения нормального режима электрических систем; показана возможность применения теории четырехполюсника к двойным нарушениям; сведено к минимуму число формул для параметров прямой последовательности; указаны условия и способы построения точных и приближенных эквивалентных схем и дан новый метод расчета с использованием столов постоянного тока.*

Напряжения несимметричного разрыва прямой, обратной и нулевой последовательности, получающиеся в результате разложения несимметричной системы  $S(\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)$ , действуют

вдоль провода; напряжения несимметричного короткого замыкания — от нейтрали к проводу. Первые назовем „последовательными“, вторые — „параллельными“<sup>2</sup>.

Сопротивления и проводимости несимметричных разрывов, определяющие зависимость между токами и напряжениями прямой, обратной и нулевой последовательности, имеют иное значение и смысл, чем те же величины для несимметричных коротких замыканий: токи, вызываемые последовательными напряжениями, могут замыкаться не только через концевые звенья системы, но и через ее внутренние контуры. Например, токи нулевой последовательности могут при несимметричных разрывах циркулировать по сети даже при отсутствии заземления нейтрали и соединения проводов с землей.

Чтобы уравнения несимметричных разрывов и коротких замыканий имели одинаковый вид, необходимо установить определенные условия относительно направлений токов и напряжений, принимаемых за положительные. В расчетах токов короткого замыкания обычно по-

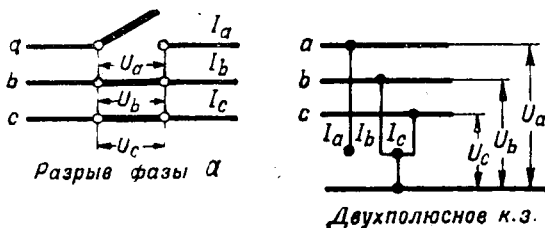


Рис. 1.

<sup>1</sup> Первый опыт такого режима осуществлен бригадой ТЭП под руководством Б. И. Розенберга на линии 110 kV Кемерово—Юрга в 1943 г.

<sup>2</sup> Можно было бы назвать их соответственно „продольными“ и „поперечными“. Однако, эти термины уже используются в другом смысле в расчетах нормальных симметричных режимов.

ложительным считается внутри сети направление тока к аварийной точке, тогда как положительное фазное напряжение считается действующим от нейтрали к проводу. Это приводит при равенстве нулю всех генераторных э. д. с. к зависимости между напряжениями прямой, обратной и нулевой последовательности аварийных точек  $K, L, M$  и соответствующими токами в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_K &= -Z_K \dot{I}_K - Z_{KL} \dot{I}_L - Z_{KM} \dot{I}_M, \\ \dot{U}_L &= -Z_{LK} \dot{I}_K - Z_L \dot{I}_L - Z_{LM} \dot{I}_M, \\ \dot{U}_M &= -Z_{MK} \dot{I}_K - Z_{ML} \dot{I}_L - Z_M \dot{I}_M. \end{aligned} \right\} (1)$$

В дальнейшем придерживаемся указанных условий. Положительное направление токов для всех внутрисетевых участков системы, на которых нет коротких замыканий, можно выбрать произвольно. Тогда положительное направление напряжений выбирается противоположным.

Уравнения (1), связывающие токи и напряжения одноименной последовательности при генераторных э. д. с., равных нулю, назовем „собственными“ — для прямой, обратной и нулевой последовательности. Очевидно, их можно написать через проводимости:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_K &= -Y_K \dot{U}_K + Y_K \dot{U}_L + Y_{KM} \dot{U}_M, \\ \dot{I}_L &= +Y_{LK} \dot{U}_K - Y_L \dot{U}_L + Y_{LM} \dot{U}_M, \\ \dot{I}_M &= +Y_{MK} \dot{U}_K + Y_{ML} \dot{U}_L - Y_M \dot{U}_M. \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь знаки соответствуют принятым выше условиям. Систему (1) именуем формой  $Z$ , систему (2) — формой  $Y$ . Если определители систем не равны нулю, то они взаимнообратимы. Соотношения между их коэффициентами определяются формулами Крамера. Например, для случая нарушения нормального режима в двух точках системы формулы перехода от формы  $Z$  к форме  $Y$  будут:

$$\left. \begin{aligned} Y_K &= \frac{Z_L}{\Delta_Z}; \quad Y_L = \frac{Z_b}{\Delta_Z}, \\ Y_{KL} &= \frac{Z_{KL}}{\Delta_Z}; \quad Y_{LK} = \frac{Z_{LK}}{\Delta_Z}, \\ \Delta_Z &= Z_K Z_L - Z_{KL} Z_{LK}. \end{aligned} \right\} (3)$$

Переход от формы  $Y$  к форме  $Z$  выражается аналогично.

Эти формы не вполне равноценны практически. Форма  $Z$  оказывается неприменимой непосредственно к анализу двойных и более сложных замыканий на землю и их комбинаций с разрывами фаз в системах с незаземленной нейтралью: в таких случаях коэффициенты формы  $Z$  для системы токов нулевой последовательности обращаются в  $\infty$ . Форма  $Y$  приводит к аналогичному неудобству при сближении двух точек короткого замыкания до их полного совпадения. Эти обстоятельства не столь существенны для комбинаций одного разрыва с одним коротким замыканием, так как в подобных случаях идет речь о системах с за-

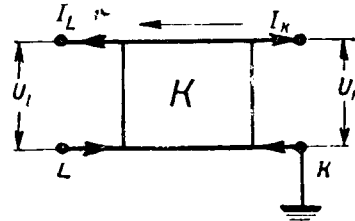


Рис. 2.

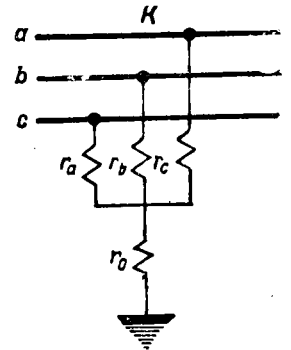


Рис. 3.

земленной нейтралью, а сближение места разрыва с аварийной точкой не приводит, за редким исключением, к обращению проводимостей в  $\infty$ . Следует еще заметить, что формы  $Z$  и  $Y$  приводят в различных случаях к неодинаково сложным конечным формулам.

К случаю двух одновременных нарушений нормального режима применима еще третья форма уравнений четырехполюсника (рис. 2) — форма  $K$ . При сохранении тех же условий относительно положительных направлений токов и напряжений эта форма имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_L &= A \dot{U}_K + B \dot{I}_K, \\ \dot{I}_L &= -C \dot{U}_K - D \dot{I}_K. \end{aligned} \right\} (4)$$

Константы формы  $K$  связаны с константами формы  $Z$  и  $Y$  определенными соотношениями. Например:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{Z_L}{Z_{KL}}, \\ B &= \frac{\Delta_Z}{Z_{KL}}, \\ C &= \frac{1}{Z_{KL}}, \\ D &= \frac{Z_K}{Z_{KL}}; \end{aligned} \right\} (5) \quad \left. \begin{aligned} Z_L &= \frac{A}{C}, \\ Z_K &= \frac{D}{C}, \\ Z_{KL} &= \frac{1}{C}, \\ Z_{K_L} &= \frac{\Delta_K}{C}, \\ \Delta_K &= AD - BC = \frac{Z_{LK}}{Z_{KL}}. \end{aligned} \right\} (6)$$

Случаи незаземленной нейтрали и сближения аварийных точек не являются для формы  $K$  особыми. Однако ее константы обращаются в бесконечность при  $Y_{KL} = Z_{KL} = 0$ .

В анализе коротких замыканий иногда учитывают сопротивление вольтовой дуги, полагая его с достаточным основанием чисто активным. В самом общем случае можно было бы предположить, что картина замыкания соответствует рис. 3. Вести анализ на основе такого допущения едва ли было бы разумно, так как ничего определенного нельзя установить относительно величины сопротивлений  $r_a, r_b, r_c, r_d$ .

Обычно, следуя Вагнеру и Эвансу, придерживаются схем рис. 4. Исходя из граничных условий для указанных на этом рисунке случаев замыкания, легко установить, что вид собствен-



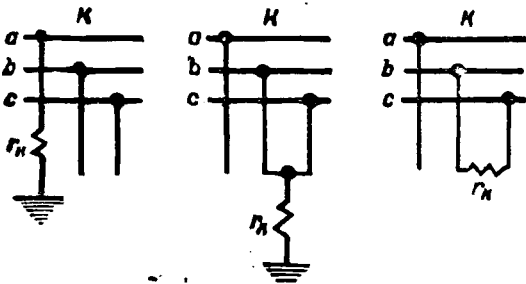


Рис. 4.

ных уравнений не меняется, но необходимо в них полное сопротивление нулевой последовательности  $Z_{0K}$  заменить (для однополюсного и двухполюсного замыканий на землю) суммой  $(Z_{0K} + 3r_k)$ , а сопротивление обратной последовательности (для двухполюсного замыкания без земли) — суммой  $(Z_{2K} + r_k)$ . Одновременно напряжения  $U_{0K}$  и  $U_{2K}$  следует заменить соответственно величинами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_{0K} &= \dot{U}_{0K} - 3r_k i_{0K}, \\ \dot{U}'_{2K} &= \dot{U}_{2K} - r_k i_{2K}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

После такой подстановки как собственные уравнения обратной и нулевой последовательности, так и граничные условия будут иметь совершенно такой же вид, как если бы сопротивление дуги замыкания было равно нулю. Можно поэтому более не касаться вопроса об учете указанного сопротивления, условившись не вносить в обозначения напряжений и полных сопротивлений каких-либо добавочных индексов, указывающих на влияние дуги.

**Двойные несимметричные нарушения нормального режима.** Сюда относятся: два одновременных несимметричных коротких замыкания; разрыв одной или двух фаз в комбинации с несимметричным коротким замыканием; два одновременных разрыва фаз (в разных местах сети).

Короткое замыкание и разрыв объединим в одном слове „коммутация“. Назовем „расчетной“ ту фазу, к которой отнесены все выкладки (обычно это фаза  $a$ ), „особенной“ — ту фазу, которая поставлена в условия, отличные от условий двух других фаз (при однополюсном коротком замыкании это будет поврежденная, а при двухполюсном — здоровая фаза).

Коммутации являются однотипными, если их граничные условия в символах особенной фазы одинаковы. Основными типами коммутаций являются: 1) однополюсное замыкание — двухполюсный разрыв; 2) двухполюсное замыкание — однополюсный разрыв. Некоторые особенности имеет двухполюсное короткое замыкание без соединения с землей. В приводимых ниже формулах приняты следующие обозначения несимметричных коммутаций:  $L\hat{b}$  — однополюсное замыкание или разрыв двух фаз в точке  $L$ , особенная фаза —  $b$ ;  $L\check{b}$  — двухполюсное замыкание

или разрыв одной фазы в точке  $L$ , особенная фаза —  $b$ ;  $L\check{b}_1$  — двухполюсное замыкание между фазами  $a$  и  $c$  в точке  $L$ , особенная фаза —  $b$ .

Любая фаза может оказаться в том или ином случае особенной, — она и отмечается символически.

Граничные условия для коммутации  $L\hat{b}$  и  $L\check{b}$  выражаются соответственно равенствами:

$$\left. \begin{aligned} i_{b_1L} &= i_{b_2L} = i_{b_0L}, \\ \dot{U}_{b_1L} + \dot{U}_{b_2L} + \dot{U}_{b_0L} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

и

$$\left. \begin{aligned} i_{b_1L} + i_{b_2L} + i_{b_0L} &= 0, \\ \dot{U}_{b_1L} = \dot{U}_{b_2L} = \dot{U}_{b_0L}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Если расчетной фазой является не  $b$ , а другая, допустим  $a$ , то граничным условиям можно придать ту же форму в новых координатах (токах и напряжениях) обратного и нулевого следования:  $i'_{a_1L}$ ,  $i'_{a_2L}$ ,  $i'_{a_0L}$ ,  $\dot{U}'_{a_0L}$ . Например, для коммутации  $L\hat{b}$ :

$$\left. \begin{aligned} i'_{a_1L} &= i'_{a_2L} = i'_{a_0L}, \\ \dot{U}'_{a_1L} + \dot{U}'_{a_2L} + \dot{U}'_{a_0L} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Соответствующие преобразования можно представить в виде четырехполюсников.

Для перехода от  $b$  к  $a$  имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_{a_2L} &= a^2 \dot{U}_{a_2L} + 0 \dot{U}_{a_0L}, \\ i'_{a_2L} &= 0 \cdot \dot{U}_{a_2L} + a^2 i_{a_2L}, \\ \dot{U}'_{a_0L} &= a \dot{U}_{a_0L} + 0 \cdot \dot{U}_{a_0L}, \\ i'_{a_0L} &= 0 \cdot \dot{U}_{a_0L} + a i_{a_0L}, \\ a &= \varepsilon^{j^{2/3}\pi} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Выражения для перехода (в граничных условиях) от фазы  $c$  к фазе  $a$  получаются из (10) перестановкой индексов 2 и 0.

Таким образом, система обратной последовательности преобразуется так же, как вектор обратной последовательности особенной фазы преобразуется в вектор той же последовательности расчетной фазы. Система нулевой последовательности преобразуется сопряженно с обратной ( $a = a^2$ ;  $a^2 = a$ ).

Матрицы указанных фазных преобразований можно представить в сокращенной записи:

$$\left[ \begin{array}{c} \overleftarrow{a^2 0} \\ 0 \overleftarrow{a^2} \end{array} \right] = \left[ \overleftarrow{a^2} \right],$$

$$\left[ \begin{array}{c} \overleftarrow{a 0} \\ 0 \overleftarrow{a} \end{array} \right] = \left[ \overleftarrow{a} \right].$$

Стрелки означают, что имеет место выражение новых координат через старые.

Если принять, что точка  $K$  является всегда конечной, приемной, в записанных по форме четырехполюсника собственных уравнения прямой, обратной и нулевой последовательности (4) и что ее особенная фаза является расчетной, то для этой точки граничные условия всегда будут выражаться в нормальной форме (8) или (9) без добавочного фазного преобразования. Оно потребуется только для точки  $L$ , если ее особенная фаза не совпадает с расчетной.

Фазные преобразования обратной и нулевой последовательности точки  $L$  можно объединить с записанными в форме  $K$  собственными уравнениями тех же последовательностей. Это соответствует каскадному соединению четырехполюсников фазного преобразования с четырехполюсниками собственных уравнений обратной и нулевой последовательности, которые уместно

обозначить символами  $[S_2^{\leftarrow}]$  и  $[S_0^{\leftarrow}]$ .

Это показано на рис. 5 для случаев, когда в точке  $L$  особенной является фаза  $b$  или  $c$ , а в точке  $K$  она совпадает с расчетной  $a$ .

Заменив каскады рис. 5 эквивалентными четырёхполюсниками  $[S_2^{\leftarrow}]$  и  $[S_0^{\leftarrow}]$ , получим:

для комбинации фаз  $b/a$ :

$$[S_2^{\leftarrow}] = \begin{bmatrix} A'_2 & B'_2 \\ C'_2 & D'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 A_2 & a^2 B_2 \\ a^2 C_2 & a^2 D_2 \end{bmatrix}$$

$$[S_0^{\leftarrow}] = \begin{bmatrix} A'_0 & B'_0 \\ C'_0 & D'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aA_0 & aB_0 \\ aC_0 & aD_0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

для комбинации фаз  $c/a$ :

$$[S_2^{\leftarrow}] = \begin{bmatrix} aA_2 & aB_2 \\ aC_2 & aD_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$[S_0^{\leftarrow}] = \begin{bmatrix} a^2 A_0 & a^2 B_0 \\ a^2 C_0 & a^2 D_0 \end{bmatrix}.$$

Граничные условия требуют, чтобы четырехполюсники  $[S_2^{\leftarrow}]$  и  $[S_0^{\leftarrow}]$  находились в определенном соединении. Для коммутаций типа  $\hat{b}$  соответствующие зажимы их необходимо соединить последовательно, а для коммутаций типа  $\check{b}$  и  $\check{b}_1$  — параллельно. Таким путем получают схемы, указанные на рис. 6.

В свою очередь эти соединения можно заменить эквивалентными четырехполюсниками  $[S'_1]$ , которыми напряжение и ток прямой последовательности точки  $L$  свяжутся с напряжением и током той же последовательности точки  $K$ . Четырёхполюсники  $[S'_1]$  соответствуют „несобственным“ уравнениям прямой последовательности. Параметры их указаны в табл. 1 и являются функциями параметров четырехполюсников  $[S_2^{\leftarrow}]$  и  $[S_0^{\leftarrow}]$  и не зависят вовсе от параметров прямой последовательности.

Если представить себе четырехполюсник  $[S'_1]$  замещенным эквивалентной схемой, то она будет внешней по отношению к схеме прямой последовательности данной электрической

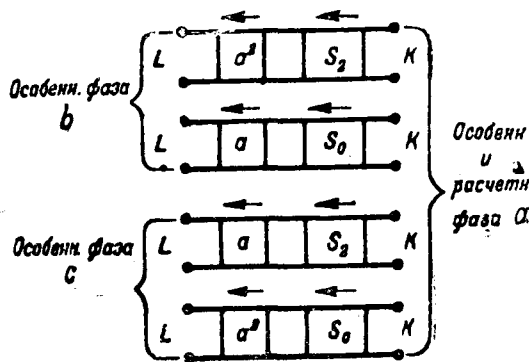


Рис. 5.

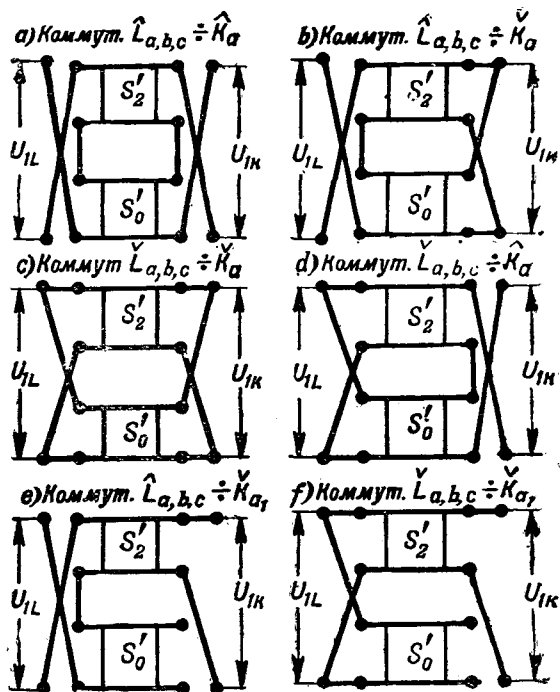


Рис. 6.

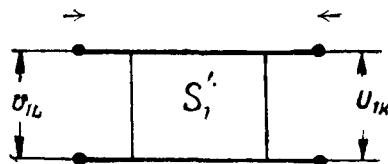


Рис. 7.

системы. Поэтому положительные направления токов следует принять в четырехполюснике  $[S'_1]$  от его зажимов внутрь (рис. 7), а не наружу, как в „собственном“ четырехполюснике  $[S_1]$ .

Соответственные уравнения  $[S_1]$  пишутся в виде:

форма  $K$  
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1L} &= A\dot{U}_{1K} - B\dot{I}_{1K}, \\ \dot{I}_{1L} &= C\dot{U}_{1K} - D\dot{I}_{1K}; \end{aligned} \right\} \text{ (13)}$$

форма  $Z$  
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1K} &= Z_K \dot{I}_{1K} + Z_{KL} \dot{I}_{1L}, \\ \dot{U}_{1L} &= Z_{LK} \dot{I}_{1K} + Z^L \dot{I}_{1L}; \end{aligned} \right\} \text{ (14)}$$

Таблица 1

## Константы несобственного четырехполюсника прямой последовательности

Вид коммутации		A	B	C	D
в точке K	в точке L				
$\forall$ $a$	$\wedge$ $x$	$C \left( \frac{B'_2}{D'_2} + \frac{B'_0}{D'_0} \right) + \frac{\Delta'_2}{D'_2} + \frac{\Delta'_0}{D'_0}$	$D \left( \frac{B'_2}{D'_2} + \frac{B'_0}{D'_0} \right)$	$\frac{C'_2 D'_0 + C'_0 D'_2}{D'_2 + D'_0}$	$\frac{D'_2 \cdot D'_0}{D'_2 + D'_0}$
$\forall$ $a_1$	$\forall$ $x$	$\frac{A'_2 B'_0 + A'_0 B'_2}{B'_2 + B'_0}$	$\frac{B'_2 \cdot B'_0}{B'_2 + B'_0}$	$C'_2 + C'_0 + \frac{(A'_0 - A'_2)(D'_2 - D'_0)}{B'_2 + B'_0}$	$\frac{B'_0 D'_2 + D'_0 B'_2}{B'_2 + B'_0}$
$\forall$ $a_1$	$\forall$ $x$	$A'_2$	$B'_2$	$C'_2 + A'_2 \cdot \frac{C'_0}{A'_0}$	$D'_2 + B'_2 \cdot \frac{C'_0}{A'_0}$
$\wedge$ $a$	$\wedge$ $x$	$\frac{A'_2 C'_0 + A'_0 C'_2}{C'_2 + C'_0}$	$\frac{B'_2 + B'_0 + (A'_0 - A'_2)(D'_2 - D'_0)}{C'_2 - C'_0}$	$\frac{C'_2 \cdot C'_0}{C'_2 + C'_0}$	$\frac{D'_2 C'_0 + D'_0 C'_2}{C'_2 + C'_0}$
$\wedge$ $a$	$\wedge$ $x$	$\frac{A'_2 \cdot A'_0}{A'_2 + A'_0}$	$\frac{B'_2 A'_0 + B'_0 A'_2}{A'_2 + A'_0}$	$A \left( \frac{C'_2}{A'_2} + \frac{C'_0}{A'_0} \right)$	$B \left( \frac{C'_2}{A'_2} + \frac{C'_0}{A'_0} \right) + \frac{\Delta'_2}{A'_2} + \frac{\Delta'_0}{A'_0}$
$\wedge$ $a_1$	$\wedge$ $x$	$A'_2 + C'_2 \frac{A'_0}{C'_0}$	$B'_2 + D'_2 \frac{A'_0}{C'_0}$	$C'_2$	$D'_2$

- и в: 1. Параметры  $A'_2, B'_2, \dots, A'_0, B'_0, \dots$  — см. формулы (11) и (12).  
 2. Символ  $x$  означает любую из фаз  $a, b, c$ .  
 3. Символ  $\forall$  — размыкание особой фазы, символ  $\wedge$  — замыкание ее.  
 4. При  $x=a, b, c$  Вообщем  
 $\Delta'_2 = 1 \ a \ a^*$   $\Delta'_2 = A'_2 D'_2 - B'_2 C'_2$   
 $\Delta'_0 = 1 \ a^* \ a$   $\Delta'_0 = A'_0 D'_0 - B'_0 C'_0$

$$\text{форма } Y \quad \left. \begin{aligned} \dot{I}_{1K} &= Y_K U_{1K} - Y_{KL} \dot{U}_{1L}, \\ \dot{I}_{1L} &= -Y_{LK} \dot{U}_{1K} + Y_L \dot{U}_{1L}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для коммутаций типа  $L\hat{b} \rightarrow K\hat{a}$  наиболее удобна форма  $Z$ ; для коммутаций типа  $L\hat{b} \rightarrow K\hat{a}$  — форма  $Y$ . Выражения параметров форм  $Z$  и  $Y$  для соответствующих типов коммутаций взаимнообратимы — путем замены токов напряжениями и сопротивлений проводимостями, и наоборот. Поэтому число формул для параметров форм  $Z$  и  $Y$  можно свести к минимуму, условившись под одним символом, скажем  $H$ , разуметь и  $Z$  и  $Y$ , так что, например,  $H'_{2KL}$  означает либо  $Z'_{2KL}$ , либо  $Y'_{2KL}$ . Так составлена табл. 2 пара-

метров форм  $Z$  и  $Y$  несобственных уравнений прямой последовательности (14) и (15). Входящие в таблицу параметры  $H'_2, H'_0$  четырехполюсников  $[S'_2]$  и  $[S'_0]$  получаются из параметров  $H_2, H_0$  фазным преобразованием по правилу:

$$H'_{SRS} = a^{(R-S)} H_{SRS} \quad \text{и} \quad H'_{ORS} = a^{(S-R)} H_{ORS},$$

где  $R$  и  $S$  — обозначение каких-либо двух точек коммутации и соответствующих степеней  $a$  в формулах (11), (12). Параметры  $H_R, H_S, \dots$  следует представить в виде:  $H_{RR}, H_{SS}$ .

Для определения токов и напряжений прямой последовательности теперь достаточно к несобственным уравнениям присоединить собственные уравнения этой последовательности, учитывая действие э. д. с. системы. Действие

э. д. с. можно синтезировать введением некоторых токов и напряжений, определяемых расчетом симметричного режима. Так, обозначив через  $I_{3K}$  и  $I_{3L}$  соответственно ток трехполюсного короткого замыкания в точке  $K$  и ток, одновременно циркулирующий на участке  $L$  при отсутствии разрыва (для случая комбинации несимметричного короткого замыкания с несимметричным разрывом в точке  $L$ ), имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1K} &= \dot{I}_{3K} - Y_{1K} \dot{U}_{1K} + Y_{1KL} \dot{U}_{1L}, \\ \dot{I}_{1L} &= \dot{I}_{3L} + Y_{1LK} \dot{U}_{1K} - Y_{1L} \dot{U}_{1L}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Эти уравнения совместно с (15) дают:

$$\left. \begin{aligned} (Y_{1K} + Y_K) \dot{U}_{1K} - (Y_{1KL} + Y_{KL}) \dot{U}_{1L} &= \dot{I}_{3K}, \\ -(Y_{1LK} + Y_{LK}) \dot{U}_{1K} + (Y_{1L} + Y_L) \dot{U}_{1L} &= \dot{I}_{3L} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

«форма  $Y$ ».

Аналогично, обозначив через  $\dot{U}_K$  и  $\dot{U}_L$  соответственно напряжение в точке  $K$  и напряжение между границами полного трехполюсного разрыва в точке  $L$  при отсутствии в точке  $K$  каких-либо замыканий, получим:

$$\left. \begin{aligned} (Z_{1K} + Z_K) \dot{I}_{1K} + (Z_{1KL} + Z_{KL}) \dot{I}_{1L} &= U_K, \\ (Z_{1LK} + Z_{LK}) \dot{I}_{1K} + (Z_{1L} + Z_L) \dot{I}_{1L} &= U_L \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

«форма  $Z$ ».

В форме  $K$  конечные уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} (A - A_1) \dot{U}_{1K} - (B + B_1) \dot{I}_{1K} &= U_K - A_1 \dot{U}_K = \\ &= -B_1 \dot{I}_{3K}, \\ (C + C_1) \dot{U}_{1K} - (D - D_1) \dot{I}_{1K} &= C_1 \dot{U}_K = \\ &= D_1 \dot{I}_{3K} + \dot{I}_{3L}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Здесь  $A_1, B_1, C_1, D_1$  — константы собственного  $[S_1]$  и  $A, B, C, D$  — несобственного  $[S'_1]$  четырехполюсников прямой последовательности.

Величины  $I_{3K}, I_{3L}, U_K, U_L$  — функции э. д. с. и параметров прямой последовательности системы. Между ними имеется связь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{3K} &= Y_{1K} \dot{U}_K - Y_{1KL} \dot{U}_L, \\ \dot{I}_{3L} &= -Y_{1KL} \dot{U}_K + Y_{1L} \dot{U}_L. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

**Эквивалентные схемы прямой последовательности и применение расчетных столов.** При несимметричных коммутациях в электрических системах, которые сами по себе симметричны, можно независимо рассматривать циркуляцию токов прямой, обратной и нулевой последовательности, представляя ее соответствующими схемами, отображающими собственные уравнения. Однако, эти схемы не дают возможности законченного определения токов и напряжений. Такая возможность для токов и напряжений прямой последовательности получается, если удастся составить схемы, соответствующие несобственным уравнениям, и объединить их со

схемами собственных уравнений этой последовательности.

Подобные эквивалентные схемы полезны при анализе релейной защиты, устойчивости параллельной работы и влияния линий передачи энергии на линии связи с помощью расчетных столов переменного и постоянного тока. Для этой цели эквивалентная схема должна быть однофазной, а при пользовании столом постоянного тока не должна содержать емкостных сопротивлений и проводимостей. Однако, для сложных несимметричных коммутаций точные однофазные схемы, составленные из постоянных сопротивлений, без применения специальных устройств, возможны только в частных случаях, в общем случае возможны только приближенные схемы. Причина заключается в том, что несобственные уравнения прямой последовательности в общем случае не удовлетворяют максвелловскому условию взаимности:

$$\text{и} \quad \left. \begin{aligned} Z_{K_1} &= Z_{LK} \\ Y_{KL} &= Y_{LK} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Между тем, этому условию удовлетворяет любая однофазная схема с постоянными параметрами.

Указанное свойство несобственных уравнений прямой последовательности объясняется введением одной общей расчетной фазы, вследствие чего входящие в уравнения токи и напряжения не находятся в соответствии, требуемом принципом взаимности. В схемах рис. 5 четырехполюсники  $[S'_2]$  и  $[S'_0]$  можно представить точными однофазными схемами, так как их уравнения удовлетворяют условиям (21). Но этим условиям не удовлетворяют фазные четырехполюсники  $[a]$  и  $[a^2]$ , находящиеся в каскадном соединении с указанными. В результате, условиям (21) не удовлетворяют четырехполюсники  $[S'_2]$  и  $[S'_a]$  рис. 6, а вместе с ними, вообще говоря, и несобственный четырехполюсник прямого следования  $[S'_1]$ . Это заключение не распространяется, очевидно, на случай, когда для всех точек коммутации ( $L, K, M$ ) особенные фазы одноименны, т. е. когда отсутствует фазное преобразование токов и напряжений (а стало быть и параметров). При наличии последнего четырехполюсник  $[S'_1]$  может удовлетворять условиям (21) только при соблюдении известных определенных соотношений между параметрами обратного и нулевого следования.

Так, для двойной коммутации  $Lb \leftrightarrow Ka$  должно быть соблюдено равенство

$$Y_{2KL} = Y_{0KL}.$$

Отметим, что несобственным уравнениям прямой последовательности можно всегда подыскать точный симметричный трехфазный эквивалент. Простейшим примером может служить

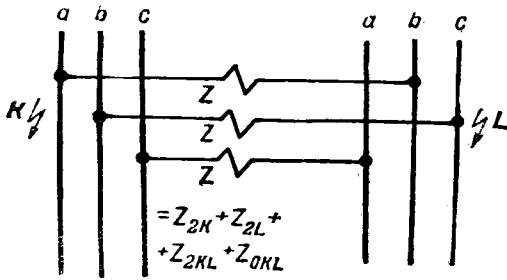


Рис. 8.

случай двойного замыкания на землю в системах с незаземленной нейтралью (рис. 8).

Приближенные схемы для двойных коммутаций, когда не соблюдены условия (21), основаны на замене действительных параметров несобственных уравнений прямой последовательности другими, с тем чтобы указанные условия всегда удовлетворялись для данного вида сложной коммутации, при достаточной точности результатов применения схемы. Задача о подыскании подходящих параметров может, очевидно, допускать различные решения, вообще говоря, неравноценные по точности. Например, эти параметры можно поставить в зависимость не только от параметров обратной и нулевой последовательности, но также и прямой последовательности. Такие схемы были бы практически удобны только в том случае, если бы они не зависели от параметров генераторов, так как в противном случае элементы схем нельзя считать постоянными.

Ограничимся рассмотрением схем, зависящих только от параметров обратной и нулевого следования.

В уравнения четырехполюсника формы  $Z$  или  $Y$  входят четыре константы:  $H_K$ ,  $H_L$ ,  $H_{KL}$  и  $H_{LK}$ . Для удовлетворения условий (21) было бы достаточно две последние заменить одной, некоторой средней. Однако, для повышения точности схемы в границах определенной области расчетов может оказаться иногда целесообразным изменение и первых двух.

Константы  $H_{KL}$  и  $H_{LK}$ , как легко установить по табл. 2 можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} H_{KL} &= aM + a^3 N \text{ или } a^2 M + aN \\ H_{LK} &= a^3 M + aN \text{ или } aM + a^2 N, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

а также в другой форме:

$$\left. \begin{aligned} H_{KL} &= -\frac{1}{2}(M+N) \pm \frac{1}{2}(a-a^3)(M-N), \\ H_{LK} &= -\frac{1}{2}(M+N) \mp \frac{1}{2}(a-a^3)(M-N), \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где  $M$  и  $N$  являются функциями исходных параметров обратной и нулевой последовательности. Они — чисто мнимые величины, если активные сопротивления системы не учитываются. При

этом вторые слагаемые правых частей (23) оказываются вещественными. Пренебрежение ими равносильно пренебрежению активными сопротивлениями и замене констант  $H_{KL}$  и  $H_{LK}$  их средней арифметической:

$$H_m = \frac{1}{2}(H_{KL} + H_{LK}).$$

Это можно считать допустимым, если

$$\frac{|(a-a^3)(M-N)|}{|M+N|} \ll 1$$

или

$$\left| \frac{M-N}{M+N} \right| \ll \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Это условие не всегда соблюдается. Например, для коммутации  $Ka_1 \div Lb$  (табл. 2):

$$\begin{aligned} H_{KL} &= a H_{2KL}, \\ H_{LK} &= a^3 H_{2KL}, \\ N &= 0, \end{aligned}$$

$$\left| \frac{M-N}{M+N} \right| = 1 \gg \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Если константы  $A, B, C, D$  четырехполюсника  $[S'_1]$  заменить соответственно на  $A/\sqrt{\Delta_K}$ ,  $B/\sqrt{\Delta_K}$ ,  $C/\sqrt{\Delta_K}$ ,  $D/\sqrt{\Delta_K}$ , где  $\Delta_K$  — его определитель, то он может быть представлен однофазной эквивалентной схемой, так как условие (21) будет удовлетворяться.

Это равносильно замене констант  $H_{KL}$  и  $H_{LK}$  их среднегеометрической величиной:

$$H'_m = \sqrt{H_{KL} H_{LK}},$$

и, как видно из дальнейшего, должно давать несколько худшие по точности результаты.

При построении эквивалентных схем для комбинаций разрывов с короткими замыканиями можно основываться на некоторой особенности таких коммутаций, на том именно, что ток прямой последовательности цепи разрыва  $\dot{I}_{1L}$  обычно меньше тока короткого замыкания  $\dot{I}_{1K}$ , так что отношение  $\left| \frac{I_{1L}}{I_{1K}} \right| = |\xi| = \xi_0$  лежит в пределах  $0 \div 1$ .

Относительную точность эквивалентных схем можно оценивать величиной погрешностей напряжений  $\dot{U}_{1K}$  и  $\dot{U}_{1L}$  при изменении отношения токов в указанных пределах, связывая эти погрешности с допущенными погрешностями пара-

Таблица 2'

Параметры форм Z и Y несобственных уравнений прямой последовательности

Вид комму- тации	В точке K	$\wedge$ a	$\vee$ a	$\wedge$ a	$\vee$ a	$\vee$ a <sub>1</sub>	$\vee$ a <sub>1</sub>
	В точке L	$\wedge$ x	$\vee$ x	$\vee$ x	$\wedge$ x	$\wedge$ x	$\vee$ x
Форма	Z	Y	Z	Y	Z	Y	
$H_K =$	$H'_{2K} + H'_{0K}$		$H'_{2K} + H'_{0K} - \frac{1}{H_\Sigma} (H'_{0KL} \cdot H'_{0LK} + H'_{2KL} \cdot H'_{2LK} -$ $- H'_{2KL} H'_{0LK} - H'_{2LK} H'_{0KL})$			$H'_{2K}$	
$H_{KL} =$	$H'_{2KL} + H'_{CKL}$		$-\frac{1}{H_\Sigma} (H'_{2KL} H'_{0L} + H'_{0KL} H'_{2L})$			$\mp H'_{2KL}$	
$H_{LK} =$	$H'_{2LK} + H'_{OLK}$		$-\frac{1}{H_\Sigma} (H'_{2LK} H'_{0L} + H'_{0LK} H'_{2L})$			$\mp H'_{2LK}$	
$H_L =$	$H'_{2L} + H'_{0L}$		$\frac{1}{H_\Sigma} \cdot H'_{2L} \cdot H'_{0L}$  $H_\Sigma = H'_{2L} + H'_{0L}$			$H'_{2L} + H'_{0L}$	

Примечание: Верхний знак соответствует форме Z, нижний - Y.

метров схемы. Это дает возможность подойти к выбору последних на основе метода наименьших квадратов. Например, предположив, что в несобственных уравнениях прямой последовательности формы Z для удовлетворения принципа взаимности параметры  $Z_{KL}$  и  $Z_{LK}$  заменены параметром  $Z_m$ , а прочие оставлены без изменения, имеем следующее выражение суммы квадратов погрешностей  $\dot{U}_{1K}$  и  $\dot{U}_{1L}$ :

$$p_u = \Delta \dot{U}_{1K}^2 + \Delta \dot{U}_{1L}^2 = (Z_{KL} - Z_m)(\hat{Z}_{KL} - \hat{Z}_m) \dot{I}_{1L}^2 + (Z_{LK} - Z_m)(\hat{Z}_{KL} - \hat{Z}_m) \dot{I}_{1K}^2 = g I_{1L}^2 + h I_{1K}^2,$$

где  $\hat{Z}_{KL}$ ,  $\hat{Z}_{LK}$ ,  $\hat{Z}_m$  — комплексы, сопряженные соответственно с  $Z_{KL}$ ,  $Z_{LK}$ ,  $Z_m$ ;

$$\left. \begin{aligned} g &= Z_{KL}^2 + Z_m^2 - \hat{Z}_{KL} Z_m - Z_{KL} \hat{Z}_m, \\ h &= Z_{LK}^2 + Z_m^2 - \hat{Z}_{LK} Z_m - Z_{LK} \hat{Z}_m. \end{aligned} \right\} (a)$$

Приняв  $I_{IK} = \text{const}$  и варьируя отношение

$$\left| \frac{I_{1L}}{I_{1K}} \right|^2 = \eta, \text{ имеем:}$$

$$\int_0^{\eta_0} p_u d\eta = F = I_{IK}^2 \left( \frac{1}{2} g \eta_0^2 + h \right).$$

Положив:

$$\left. \begin{aligned} Z_{KL} &= z_{KL} \cdot \varepsilon^{j\varphi_{KL}}, \\ Z_{LK} &= z_{LK} \cdot \varepsilon^{j\varphi_{LK}}, \\ Z_m &= z_m \cdot \varepsilon^{j\varphi_m}. \end{aligned} \right\} (b)$$

из условий

$$\frac{\partial F}{\partial Z_m} = 0, \frac{\partial F}{\partial \varphi_m} = 0,$$

при  $\eta_0 = 1$  найдем:

$$\left. \begin{aligned} z_{KL} \cos(\varphi_m - \varphi_{KL}) + 2 \cdot z_{LK} \cos(\varphi_m - \varphi_{LK}) &= 3z_m, \\ z_{KL} \sin(\varphi_m - \varphi_{KL}) + 2 \cdot z_{LK} \sin(\varphi_m - \varphi_{LK}) &= 0. \end{aligned} \right\} (r)$$

Отсюда можно вывести следующее простое выражение для комплекса  $Z_m$ :

$$Z_m = Z_{IK} + \frac{1}{3} (Z_{KL} - Z_{LK}). \quad (24)$$

Этот результат несколько больше отличается от среднегеометрического  $\sqrt{Z_{KL} \cdot Z_{LK}}$ , чем от среднеарифметического  $\frac{1}{2} (Z_{KL} + Z_{LK})$ . Если

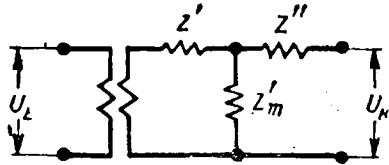


Рис. 9.

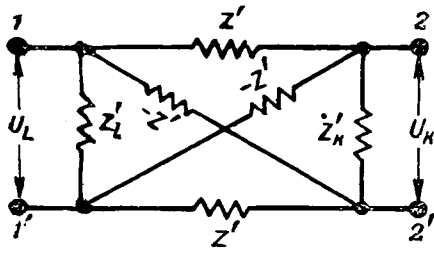


Рис. 10.

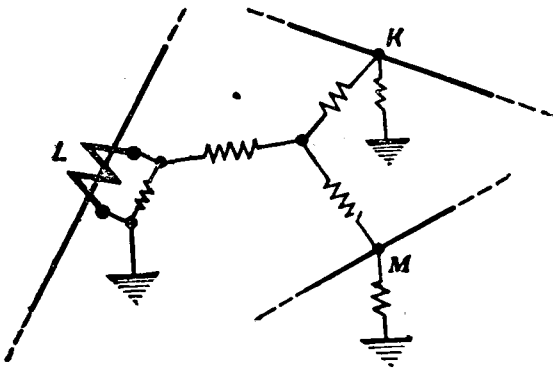


Рис. 11.

Комплексы  $Z_{KL}$  и  $Z_{LK}$  — симметричны относительно оси мнимых величин [это будет при чисто мнимых значениях  $M$  и  $N$  в формуле (22)], то определяемая по (24) величина  $Z_m$  отличается от среднеарифметических величин  $Z_{KL}$  и  $Z_{LK}$  только на некоторое положительное или отрицательное активное сопротивление. В последнем случае формула (24) теряет практическую ценность. Она все же может быть использована в первом случае или при учете значительных активных сопротивлений в исходной системе, когда концы векторов  $Z_{KL}$  и  $Z_{LK}$  сдвигаются в сторону вещественных положительных величин.

Касаясь применения точных или приближенных эквивалентных схем к комбинациям разрывов с короткими замыканиями, необходимо отметить, что обычные Т- и П-образные схемы здесь, за исключением частных случаев, оказываются неприменимыми. Будучи включены в сложную систему, они не обеспечивают выполнения требования, чтобы прямой и обратный токи четырехполюсника (рис. 2), с обеих его сторон, были между собой точно равны при любых внешних условиях. Этот недостаток устраняется введением трансформатора со стороны

первичных или вторичных зажимов четырехполюсника, так что Т-образная схема получает вид<sup>3</sup> рис. 9.

Вместо этого можно иногда применять схему рис. 10 с чисто электрическими связями, также удовлетворяющую указанному требованию [Л. 3]. Ее параметры определяются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} Z'_L &= \frac{B}{D} = \frac{\Delta Z}{Z_K}, \\ Z'_K &= \frac{B}{A} = \frac{\Delta Z}{Z_L}, \\ Z' &= B = \frac{\Delta Z}{Z_{KL}}; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} Y'_L &= \frac{1}{Z'_L} = Y_L, \\ Y'_K &= \frac{1}{Z'_K} = Y_K, \\ Y' &= \frac{1}{Z'} = Y_{KL}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Эта схема всегда содержит емкостные, а иногда и отрицательные активные сопротивления; при изменении частоты требует изменения параметров; она переходит в обычную П-образную схему при соединении накоротко зажимов  $1'$  и  $2'$ .

Изложенное выше относится и к построению эквивалентных схем для тройных несимметричных коммутаций. Схема с трансформатором для комбинации одного разрыва с двумя короткими замыканиями показана на рис. 11.

На расчетных столах переменного тока могут иметь применение эквивалентные схемы со специальными устройствами. Это — схемы, которые в принципе дают точный результат. Сюда относятся схемы по типу Э. Кларк с ручным или автоматическим регулированием [Л. 1, 2] и схема с коллекторными машинами<sup>4</sup>. Последнего типа схема представлена на рис. 12 применительно к случаю, когда величины  $M$  и  $N$  в (22) можно считать чисто мнимыми. Параметры ее определяются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} Z_m &= \frac{1}{2} (Z_{KL} + Z_{LK}), \\ Z_{\Delta L} &= Z_K - Z_m, \\ Z_{\Delta K} &= Z_L - Z_m, \\ \Delta \dot{E}_L &= \frac{1}{2} (Z_{KL} - Z_{LK}) \dot{I}_L, \\ \Delta \dot{E}_K &= -\frac{1}{2} (Z_{KL} - Z_{LK}) \dot{I}_K. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Использование эквивалентных схем несобственных уравнений при расчетах на столах постоянного тока весьма ограничено, так как во

<sup>3</sup> Должны быть, конечно, учтены параметры трансформатора.

<sup>4</sup> Предложенная автором.

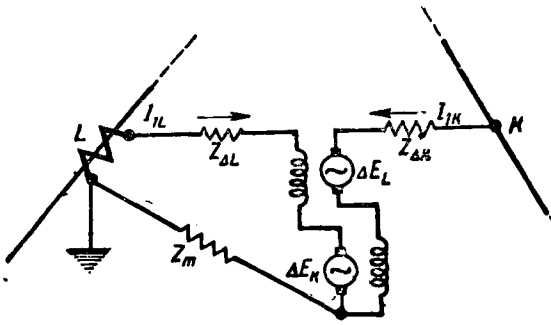


Рис. 12.

многих случаях параметр  $Z_m$  (или  $Y_m$ ) оказывается емкостным, и здесь, очевидно, схемы рис. 9 и 10 для комбинаций разрывов с короткими замыканиями вообще неприменимы. Тем не менее стол постоянного тока может значительно облегчить анализ несимметричных режимов, если допустимо пренебрежение активными сопротивлениями системы. С его помощью легко определяются параметры собственных уравнений, формы  $Z, Y, K$ , а также коэффициенты распределения токов. Помимо того, стол постоянного тока позволяет успешно применять упрощенные, „укороченные“, эквивалентные схемы прямой последовательности в комбинации с несложными вычислениями. Действительно, положив в уравнениях (18)

$$\begin{aligned} Z_{KL} &= Z_{LK} = Z_m, \\ Z_{\Delta K} &= Z_K - Z_m, \\ Z_{\Delta L} &= Z_L - Z_m, \\ Z'_{\Delta K} &= Z_{1K} - Z_{1KL}, \\ Z'_{\Delta L} &= Z_{1L} - Z_{1KL}, \end{aligned}$$

найдем:

$$i_{1K} + i_{1L} = i_{\Sigma} = \frac{\dot{U}}{Z + Z_m}, \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{1}{S} \left[ (Z_{\Delta L} + Z'_{\Delta L}) \dot{U}_K + (Z_{\Delta K} + Z'_{\Delta K}) \dot{U}_L \right], \quad (29) \\ S &= Z_{\Delta K} + Z_{\Delta L} + Z'_{\Delta K} + Z'_{\Delta L}, \\ Z &= Z_{,KL} + \frac{(Z_{\Delta L} + Z'_{\Delta L})(Z_{\Delta K} + Z'_{\Delta K})}{S}. \end{aligned}$$

И в тех же символах несобственные уравнения прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\Delta K} i_{1K} + Z_m i_{\Sigma} &= \dot{U}_{1K}, \\ Z_{\Delta L} i_{1L} + Z_m i_{\Sigma} &= \dot{U}_{1L}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

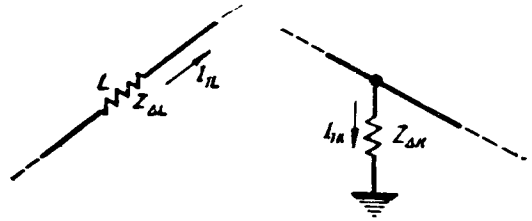


Рис. 13.

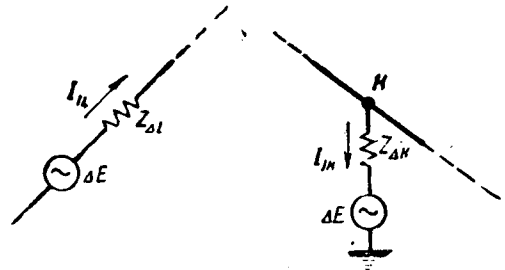


Рис. 14.

При  $Z_m = 0$  эквивалентная схема несобственных уравнений (30) представится просто индуктивными сопротивлениями  $Z_{\Delta L}$  и  $Z_{\Delta K}$ , включенными согласно рис. 13. Она осуществима на столе постоянного тока. При этом формула (28) дает:

$$\dot{i}_{\Sigma} = \frac{\dot{U}}{Z} = \dot{i}_{1L} + \dot{i}_{1K}. \quad (31)$$

Ток  $\dot{i}_{\Sigma}$  определяется с помощью стола постоянного тока по схеме рис. 13. Из сопоставления (28) и (31) имеем:

$$\dot{i}_{\Sigma} = \frac{Z}{Z + Z_m} \cdot \dot{i}_{\Sigma}. \quad (32)$$

Придав уравнениям (18) вид:

$$\left. \begin{aligned} (Z_{\Delta K} + Z_{1K}) i_{1K} + Z_{1KL} i_{1L} &= \dot{U}_K - \Delta \dot{E}, \\ Z_{1KL} i_{1K} + (Z_{\Delta L} + Z_{1L}) i_{1L} &= \dot{U}_L - \Delta \dot{E}, \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где

$$\Delta E = Z_m i_{\Sigma}, \quad (34)$$

заключаем, что все токи прямой последовательности в системе (в том числе  $i_{1K}$  и  $i_{1L}$ ) можно определить в два этапа по принципу наложения: 1) при  $\Delta E = 0$ , т. е. при  $Z_m = 0$  — по схеме рис. 13; 2) при  $\dot{U}_K = \dot{U}_L = 0$ , т. е. положив нулю э. д. с. системы, — по схеме рис. 14. Действительный ток прямой последовательности любого участка сети определится сложением токов, определенных для него в указанных этапах расчета. Изложенный метод (или его модификация в форме  $Y$ ) применим к любой двойной несимметричной коммутации.



Коснемся вопроса об определении затухания токов короткого замыкания с предшествующим разрывом фазы. Вообще для этой цели мыслимо применение всех известных методов, хотя соответствующие расчетные кривые и таблицы должны быть приспособлены к необычным начальным условиям короткого замыкания. Некоторые дополнительные затруднения связаны с применением «метода кривых затухания». Обычная форма его предполагает использование эквивалентной схемы прямой последовательности. В данном случае пришлось бы основываться на схемах рис. 9 и 10. Ни та, ни другая непригодна для расчетов постоянного тока, и обе неудобны для вычислений.

Указанный метод можно применять в форме, предложенной еще Вудвардом [Л. 4] и не связанной с представлением о специальной эквивалентной схеме. Действительно, первым расчетом можно найти начальные значения периодических составляющих токов прямой последовательности генераторов. Затем, исходя из равенства

$$\dot{I}'' = \frac{E''}{j(x'' + x_N)},$$

найти для каждого генератора эквивалентное внешнее реактивное сопротивление  $|x_N|$ , по которому, пользуясь кривыми затухания, определить ток прямой последовательности в генераторе для любого момента времени. Распределение генераторных токов прямой последовательности по сети может быть найдено на основе следующих соображений. Токи  $\dot{I}_{1K}$  и  $\dot{I}_{1L}$  (аналогично и ток  $\dot{I}_{1a}$  какого либо участка  $a$  сети) можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1K} &= \dot{I}_{3K} - Y'_{1K} \dot{U}_{1K} + Y'_{1KL} \dot{U}_{1L}, \\ \dot{I}_{1L} &= \dot{I}_{3L} + Y'_{1KL} \dot{U}_{1K} - Y'_{1L} \dot{U}_{1L}, \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

где  $\dot{I}_{3K}$  и  $\dot{I}_{3L}$  — токи трехполюсного замыкания в точках<sup>5</sup>  $K$  и  $L$  при заданных значениях генера-

<sup>5</sup> Для точки  $L$  это означает отсутствие разрыва фаз.

торных токов (а не э. д. с.), а коэффициенты при напряжениях  $\dot{U}_{1K}$  и  $\dot{U}_{1L}$  определяются в предположении, что генераторные цепи отключены. Следовательно, эти коэффициенты отнюдь не тождественны с аналогичными коэффициентами уравнения (16).

Присоединив к (35) несобственные уравнения в форме  $Z$  (14), получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1K} &= \frac{C_{1L} \dot{I}'_{3K} - C_{1KL} \dot{I}'_{3L}}{C_{1K} C_{1L} - C_{1KL} C_{1LK}}, \\ \dot{I}_{1L} &= \frac{-C_{1LK} \dot{I}'_{3K} + C_{1K} \dot{I}'_{3L}}{C_{1K} C_{1L} - C_{1KL} C_{1LK}}; \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{1K} &= 1 + Y'_{1K} Z_K - Y'_{1KL} Z_{LK}, \\ C_{1L} &= 1 + Y'_{1L} Z_L - Y'_{1KL} Z_{KL}, \\ C_{1KL} &= Y'_{1K} Z_{KL} - Y'_{1KL} Z_{L}, \\ C_{1LK} &= Y'_{1L} Z_{LK} - Y'_{1LK} Z_K. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Токи  $\dot{I}'_{3K}$  и  $\dot{I}'_{3L}$  и коэффициенты  $Y'_{1K}$ ,  $Y'_{1L}$ ,  $Y'_{1KL}$  легко определяются на столе постоянного тока. Особенно простой результат получается при допущении, что все нагрузки перенесены на шины генераторов, причем заданы токи генераторов за вычетом нагрузочных. В этом случае  $Y'_{1K} = Y'_{1KL} = 0$ , и потому:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1K} &= \dot{I}'_{3K}; \quad \dot{I}_{1L} = - \frac{Y'_{1L} Z_{LK}}{1 + Y'_{1L} Z_L} \cdot \dot{I}'_{3K} + \\ &+ \frac{1}{1 + Y'_{1L} Z_L} \cdot \dot{I}'_{3L}. \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, распределение токов прямого следования находится сравнительно просто.

#### Литература

1. Edith Clarke. Simultaneous Faults on Three-phase Systems. Tr. AIEE, стр. 919, 1931.
2. К. Ф. Вагнер и Р. Д. Эванс. Метод симметричных составляющих, ОНТИ, 1936.
3. F. M. Starr. Equivalent Circuit. Tr. AIEE, стр. 287, 1932.
4. Н. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания высоковольтных систем, ОНТИ, 1935.



# Селективная система плавких предохранителей

Кандидат техн. наук Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ

Ленинград

**Плавкие вставки.** Размеры и маркировка плавких вставок, выполняемых штамповкой из листовой меди, показаны на рис. 1 и в таблице.

Вставки серии А штампуются из листовой меди толщиной в 1 мм и предназначаются для установки в предохранителях, защищающих сетевые или заводские трансформаторы со стороны низшего напряжения (120, 220, 380 или 500 В). Вставки серии Б толщиной 0,85 мм устанавливаются в предохранителях, защищающих головные участки кабельных магистралей. Вставки серии В толщиной в 0,7 мм предусмотрены для разделительных пунктов магистральной городской сети, для вводов к потребителю и групповых щитков сетей промышленных предприятий.

В пределах каждой серии вставки выполняются по эскизам а, б, в, г, д, е, ж, з или и (рис. 1), в соответствии с номинальным значением тока вставки.

Произведенные расчеты и эксперименты показали, что, если при изготовлении вставки придется отступать от приведенных размеров, отклонения следует выбирать в сторону сближения сечений трех серий, но ни в коем случае не следует увеличивать разницу между ними. Иначе говоря, вместо толщины медных листов для серий А и В в 1 мм и 0,7 мм можно допустить 0,99 мм и 0,71 мм, но не следует применять размеры 1,01 и 0,69 мм.

С целью упрощения штампов плавкие вставки могут быть выполнены и по модификациям, показанным на рис. 2. Вставки, выполненные по эскизам  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$ , по своим характеристикам аналогичны вставкам эскиза е (рис. 1). Ширина отдельных участков вставок  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  равна ширине соответствующих участков вставки е, но отдельные составляющие этого участка перемычки совмещены. Так, наиболее узкое место вставки е состоит из трех перемычек шириной по 1 мм у вставки  $e_1$  этот участок состоит из двух перемычек по 1,5 мм, у вставок  $e_2$  и  $e_3$  — из одной в 3 мм. Аналогично могут быть получены модификации вставок остальных эскизов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  и т. д.

*В ранее напечатанной статье инж. Б. Л. Айзенберга (Электричество, № 9, 1945) были изложены основные положения о системе плавких предохранителей, могущей обеспечить селективную защиту замкнутой электрической сети (городской, фабрично-заводской, воздушной или кабельной), а также позволяющей улучшить условия защиты радиальной или «полузамкнутой» сети. В связи с целым рядом практических запросов, поступивших после опубликования указанной статьи, ниже приводятся конкретные данные, пользуясь которыми можно осуществить подобную защиту в любой электроснабжающей системе или фабрично-заводской электроустановке.*

Когда изготовление вставок штамповкой встречает затруднения (например, из-за отсутствия возможности изготовить своими силами штампы или вследствие отсутствия калиброванной листовой меди), возможно применение плавких вставок, свитых из медной проволоки,

как это показано на рис. 4 (к которому ниже вернемся по другому поводу). Выполнение их основано на том же принципе, что и штампованных вставок рис. 1 и 2: они имеют ослабленные сечения у концов и увеличенную поверхность охлаждения посредине вставки. Как показали расчеты и опытная проверка, такие вставки в асбоцементной заделке обладают хорошими «время-токовыми» характеристиками, не уступающими характеристикам цинковых вставок, а вследствие двукратного разрыва дуги, обусловленного наличием ослабленных мест, и благодаря заделке в асбоцемент — и весьма значительной разрывной способностью.

Создание серий А, Б и В в данном случае может быть обеспечено применением при изготовлении вставок проволок разного диаметра. Если для предохранителя с номинальным током в 200 А серии А должны быть взяты 4 витых проволочных вставки рис. 4, выполненных из проволоки диаметром 0,6 мм, то вставку серии Б того же эскиза следует изготовить из 4 подобных же витых вставок, но выполненных из медной проволоки диаметром 0,55 мм. Номинальный ток такой вставки составит 160 А. Для серии В при прочих равных условиях диаметр проволоки будет 0,5 мм, а номинальный ток вставки 125 А. Вставки всех рассмотренных типов можно применять луженым и горячим способом, но допустимо применение и луженых гальваническим способом посеребренных или никелированных вставок. Наконец, вполне допустимо применение и медных вставок без какой-либо защитной обработки их поверхности.

**Конструкция предохранителя.** Простейшее выполнение предохранителя, позволяющее применять штампованные вставки в асбоцементной заделке, представляющее собой модернизацию

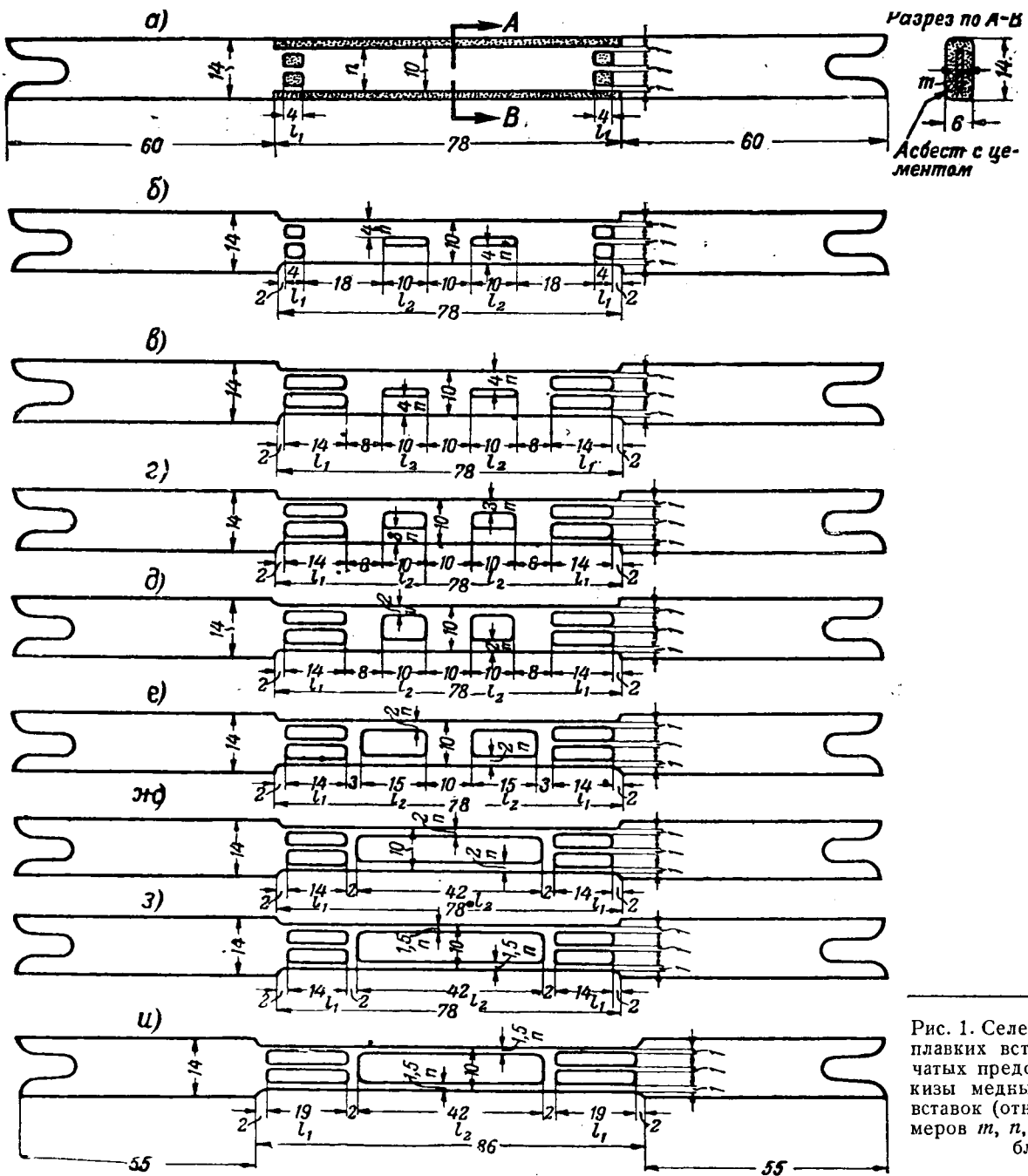


Рис. 1. Селективная система плавких вставок для трубчатых предохранителей. Эскизы медных штампованных вставок (относительно размеров  $m$ ,  $n$ ,  $l_1$  и  $l_2$  см. таблицу).

Плавкие вставки для трубчатых предохранителей (к рис. 1).

Серия	Эскиз на рис. 1	$n$ , мм	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	Число перемычек в средней части	Номинальный ток, А	Серия	Эскиз на рис. 1	$n$ , мм	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм	Число перемычек в средней части	Номинальный ток, А
А ( $m=1,0$ )	а	10	4	—	1×1	425	В ( $m=0,7$ )	д	2	14	10	2×2	180
	б	4	4	10	2×2	350		ж	2	14	42	1×2	150
	в	4	14	10	2×2	300		з	1,5	14	42	1×2	125
	д	2	14	10	2×2	260		и	1,5	19	42	1×2	100
	е	2	14	15	2×2	225	Г ( $m=0,5$ )	ж	2	14	42	1×2	100
	ж	2	14	42	1×2	200		и	1,5	14	42	1×2	80
з	1,5	14	42	1×2	150	з		1,5	19	42	1×2	60	

Примечание. Вставки серии „Г“ предназначены к установке в предохранителях, защищающих ответвления от магистральных линий.



предохранителя типа SPO в части изменения формы контактов, показано на рис. 3.

Если принять выполнение вставок из витой медной проволоки в твердой заделке, показанное на рис. 4, то даже не потребуются модернизация контактов, а вполне пригодны будут обычные трубчатые предохранители SPO существующего типа. В этом случае витые наконечники вставки надо делать более длинными, по 80—90 мм каждый, с сохранением активной длины вставки в 70 мм, как показано на рис. 4. Кроме того, наконечники следует в этом случае выполнять не из двух, а из четырех свитых вместе проволок. Для того, чтобы вставка не касалась фарфора, ее следует при зарядке патрона помещать во внутреннюю асбестовую трубку.

Рис. 4 иллюстрирует компактное выполнение предохранителя нового типа на более значительную силу тока. Этот предохранитель, без каких-либо повреждений отключающий токи к. з. в 10 000—12 000 А (амплитудное значение установлено по осциллограмме), вполне может заменить предохранитель типа ПР-1 и ряд подобных предохранителей закрытого типа иностранных фирм с заполнителем в виде кварцевого песка. Следует отметить, что последние предохранители, вопреки рекламным данным фирм, при испытании их в указанных выше условиях в ряде случаев повреждались, особенно при герметически закрытых патронах.

Предохранитель, представленный<sup>1</sup> на рис. 4, крайне простой, имеет всего одну деталь (кольцо с контактными ножами и держателями вставок), изготавливаемую штамповкой, дешев и удобен в эксплуатации. В случае отсутствия глета укрепление колец с ножами на фарфоровой трубке может быть произведено помощью цемента или иной подобной замазки.

**Заделка вставки.** В результате ряда экспериментов для заделки плавкой вставки был применен следующий состав и способ его изготовле-

<sup>1</sup> Предложение инж. Б. Л. Айзенберга и А. Н. Гордеева, получившее премию в 1945 г. на конкурсе (Севзап-электромонтаж).

ния: ангидрито-красцовый цемент в количестве 2,5 кг замешивают на литре горячего (60—80°С) 30% раствора алюмо-калиевых квасцов и прибавляют 50 г растрепанного до мелких волокон асбеста. Массу тщательно перемешивают, после чего в течение 40—45 мин можно вмазывать плавкие вставки в форму в массу. Затем заделка должна сохнуть при комнатной температуре в течение двух суток.

Такая заделка дала при ее испытании весьма удовлетворительный результат.

При отсутствии ангидрито-квасцового цемента в качестве заделки может быть применен автоклавный гипс с 7% примеси асбестовой ваты (см. «Информационные материалы Энергосбыта Ленэнерго», № 7—8, 1945 г., стр. 67—68) или же иной подобный материал, отвечающий следующим требованиям: а) материал для заделки должен представлять собой непроводник электрического тока; б) заделка должна быть механически прочной и нехрупкой; в) при затвердевании после вмазывания вставки не должно происходить значительного изменения формы и объема заделки; г) продолжительность изготовления и стоимость массы должны быть минимальными, а материалы не должны быть дефицитными; д) заделка должна выдерживать длительный нагрев до 250°—280°С; е) заделка не должна быть сильно гигроскопичной, в сыром помещении не должна становиться хрупкой, электропроводной, не должна набухать или разрушаться и химически действовать на медную вставку.

**Заключение.** Очередной задачей нашей электропромышленности является организация *массового выпуска плавких предохранителей большой разрывной мощности*, более простых, дешевых, требующих меньшего расхода дефицитных материалов, чем предохранители типа ПР-1, и обладающих большей разрывной способностью, чем предохранители SPO и пробочные предохранители. Выпуск предохранителей следует производить комплектно со вставками. Сортамент вставок должен составлять единую селективную систему.



### Расчет функциональных делителей напряжения

Кандидат техн. наук, доц. Е. И. ДМИТРИЕВ

Институт машиноведения Академии наук СССР

Сопротивление  $R$ , включенное по схеме рис. 1, называется делителем напряжения, так как снимаемое напряжение  $U_1$  с участка сопротивления  $R_1$ , является частью общего напряжения  $U$ , подводимого ко всему сопротивлению  $R$ , причем  $U_1 = U \frac{R_1}{R}$ .

Устройство рис. 1 часто называют потенциометром, а схему включения—потенциометрической, что не всегда точно отображает действие, выполняемое при помощи этого устройства. Потенциометром в собственном смысле этого слова следует называть такое устройство, при помощи которого производится измерение разности потенциалов, напряжений и э. д. с. Таковыми являются потенциометры Рапса, Фейснера, Гейгера и др.

Обыкновенные ненагруженные делители напряжения, выполненные по типу Рустрата, дают прямолинейную зависимость между напряжением на выходе  $U_1$  и перемещением скользящего контакта  $X$  вдоль длины  $L$  в виде  $U_1 = U \frac{x}{L}$ , так как  $\frac{x}{L} = \frac{R_1}{R}$ .

Функциональным делителем напряжения будем называть такое устройство, при помощи которого напряжение на выходе  $U_1$  с перемещением скользящего контакта  $x$  изменяется по заданному закону  $U_1 = U \varphi\left(\frac{x}{L}\right)$ .

Цель работы — определение конфигурации каркаса делителя напряжения, т. е. определение высоты каркаса по его длине:  $y = y_0 f\left(\frac{x}{L}\right)$ , при

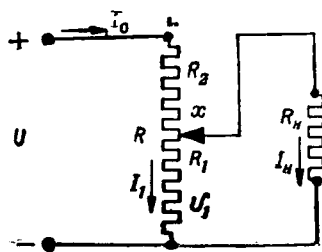


Рис. 1. Принципиальная схема делителя напряжения.

которой выполняется заданный закон изменения выходного напряжения.

Для расчета приняты следующие обозначения:  $y$  — текущее значение высоты ленточного каркаса в м;  $a$  — толщина на каркаса в м;  $L$  —

общая длина делителя напряжения в м;  $x$  — расстояние от начала до скользящего контакта в м;  $R$  — полное сопротивление делителя (сопротивление на его входе) в  $\Omega$ ;  $U$  — входное и  $U_1$  — выходное напряжения в В;  $d$  — диаметр проволоки в м,  $\rho$  — удельное сопротивление проволоки в  $\Omega \text{ м}^2/\text{м}$ ,  $\varphi\left(\frac{x}{L}\right)$  — заданная функция.

**Ненагруженный делитель напряжения** ( $R_n = \infty$ ,  $I_n = 0$ ). Делитель напряжения, выполненный по типу Рустрата, характеризуется известной зависимостью:

$$U_1 = U \frac{R_1}{R} = U \frac{x}{L}. \quad (1)$$

Для функционального делителя напряжения, сопротивление которого

$$R_1 = R_0 \varphi\left(\frac{x}{L}\right), \quad (2)$$

при  $R_n = \infty$  имеет место следующая зависимость:

$$U_1 = U \frac{R_1}{R} = U \frac{R_0}{R} \varphi\left(\frac{x}{L}\right), \quad (3)$$

где  $R_0$  определяется при расчете  $R_1$  из начальных условий<sup>1</sup>.

Если  $R_0 = R$ , то

$$U_1 = U \varphi\left(\frac{x}{L}\right). \quad (3')$$

Следовательно, расчет функционального делителя напряжения при  $R_n = \infty$  совершенно аналогичен расчету функциональных реостатов.

**Нагруженный делитель напряжения** ( $R_n < \infty$ ,  $I_n > 0$ ). Рассмотрим предварительно делитель напряжения, выполненный по типу Рустрата.

Наличие нагрузки  $R_n$  на выходе делителя напряжения нарушает линейную зависимость (1). В этом случае:

$$U_1 = U - I_0 R_2 = U - I_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right) R,$$

$$I_0 = \frac{U}{\left(1 - \frac{x}{L}\right) R + \frac{\frac{x}{L} R R_n}{L R + R_n}}$$

<sup>1</sup> См. статью автора „Расчет функциональных сопротивлений“, Электричество, № 3, 1946.

Поэтому

$$U_1 = U \frac{x}{L} \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{x}{L} \frac{R}{R_n}} \quad (4)$$

Отклонение выходного напряжения  $U_1$  от линейной зависимости (1)—абсолютную погрешность  $\Delta U_1$  устройства можно найти, вычитая из (1) соотношение (4):

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= U_1^{(1)} - U_1^{(4)} = \\ &= U \frac{x}{L} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{L}\right) \frac{x}{L} \frac{R}{R_n}} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

$\Delta U_1$ —абсолютная погрешность напряжения на выходе делителя (рис. 1) тем меньше, чем больше  $R_n$  по сравнению с  $R$ .

При  $R = \text{const}$  погрешность уменьшается одновременно с  $\left(1 - \frac{x}{L}\right)$  и  $\frac{x}{L}$ . Исследование формулы (5) показывает, что  $\Delta U_1 = 0$  при  $x = 0$  и  $x = L$ , а при  $x = 0,5 L$  погрешность  $\Delta U_1$  максимальна (рис. 2).

Назовем коэффициентом нелинейности  $\gamma$  обыкновенного нагруженного делителя напряжения отношение

$$\gamma = \frac{\Delta U_1}{U} 100 \text{ при } \frac{x}{L} = 0,5. \quad (6)$$

Зависимости  $\Delta U_1 = f\left(\frac{x}{L}\right)$  и  $\gamma = \psi(\beta)$ , где  $\beta = \frac{R_n}{R}$ , представлены в таблице и на рис. 3. Как

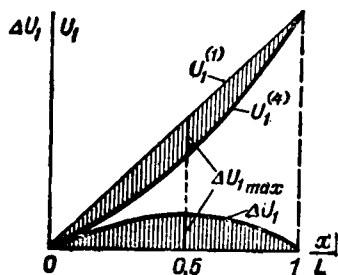


Рис. 2. Погрешность обыкновенного (по типу Рустрата) нагруженного делителя напряжения.

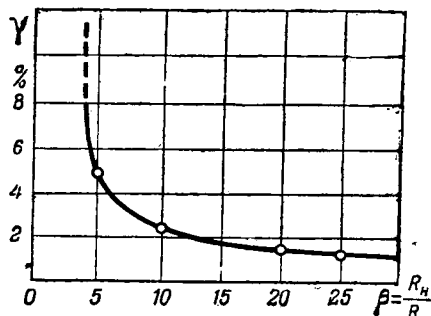


Рис. 3. Коэффициент нелинейности  $\gamma$  в зависимости от отношения нагрузки  $R_n$  к полному сопротивлению  $R$  обыкновенного делителя напряжения.

Коэффициент нелинейности обыкновенного нагруженного делителя напряжения

$\beta = \frac{R_n}{R}$	$\infty$	100	25	20	10	5	1
$\gamma = \frac{\Delta U_1}{U} 100\%$	0	0,25	1	1,5	2,5	5	25

видно из рисунка и таблицы, лишь при  $\beta = \frac{R_n}{R} = 25$  коэффициент  $\gamma$  падает до 1%. Уменьшение сопротивления нагрузки  $R_n$  по сравнению с  $R$  приводит к резкому увеличению коэффициента  $\gamma$  и при  $R_n = R$  он достигает значения  $\gamma = 25\%$ . Очевидно, при равномерной шкале  $\frac{x}{L}$  и нагруженном делителе нельзя обеспечить линейности выходного напряжения.

При проектировании функционального делителя напряжения требуется определить  $y = y_0 f\left(\frac{x}{L}\right)$  при заданной функции  $U_1 = U \cdot \varphi\left(\frac{x}{L}\right)$ .

Из схемы рис. 1 видно, что

$$I_0 = I_1 + I_n$$

или

$$\frac{U - U_1}{R - R_1} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_1}{R_n}.$$

Решив последнее уравнение относительно  $R_1$ , получим:

$$\begin{aligned} R_1 &= -\frac{1}{2} \left( \frac{U}{U_1} R_n - R \right) \pm \\ &= \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{U}{U_1} R_n - R \right)^2 + R R_n}. \end{aligned} \quad (7)$$

Перед радикалом оставим только знак плюс, так как  $R_1$  не может быть отрицательным.

Подставляя в (7) данную функцию  $U_1 = U \varphi\left(\frac{x}{L}\right)$ , получим:

$$\begin{aligned} R_1 &= -\frac{1}{2} \left[ \frac{R_n}{\varphi\left(\frac{x}{L}\right)} - R \right] + \\ &+ \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \frac{R_n}{\varphi\left(\frac{x}{L}\right)} - R \right]^2 + R R_n}, \end{aligned} \quad (8)$$

причем для  $\varphi\left(\frac{x}{L}\right) = 1$ ,  $R_1 = R$ .

В частном случае, если требуется, чтобы напряжение  $U_1$  изменялось прямо пропорцио-

нально  $\frac{x}{L}$ , т. е. чтобы  $U_1 = U \frac{x}{L}$ ,  $R_1$  должно изменяться по закону:

$$R_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{R_n}{\frac{x}{L}} - R \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{R_n}{\frac{x}{L}} - R \right)^2 + RR_n}. \quad (9)$$

Зная закон распределения  $R_1$  вдоль длины делителя напряжения, можно определить его конфигурацию  $y = y_0 f\left(\frac{x}{L}\right)$ .

Для этого воспользуемся результатом, полученным при расчете функциональных сопротивлений<sup>2</sup>:

$$y_{\text{лент}} = \frac{\pi d^3}{8\rho} R_0 \psi' \left( \frac{x}{L} \right) - a \quad (10)$$

или

$$y_{\text{лент}} = \frac{\pi d^3}{8\rho} \frac{dR_1}{dx} - a,$$

где

$$R_1 = R \psi \left( \frac{x}{L} \right).$$

Из (8) определяем производную  $\frac{dR_1}{dx}$  в виде:

$$\frac{dR_1}{dx} = \left\{ 1 - \frac{\frac{1}{2} \left[ \frac{R_n}{\varphi \left( \frac{x}{L} \right)} - R \right]}{\sqrt{\frac{1}{4} \left[ \frac{R_n}{\varphi \left( \frac{x}{L} \right)} - R \right]^2 + RR_n}} \right\} \frac{R_n \psi' \left( \frac{x}{L} \right)}{\varphi^2 \left( \frac{x}{L} \right)}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) получаем:

$$y + a = \frac{\pi d^3}{8\rho} \cdot \frac{R_n}{2} \cdot \frac{\varphi^1 \left( \frac{x}{L} \right)}{\varphi^2 \left( \frac{x}{L} \right)} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4RR_n \varphi^2 \left( \frac{x}{L} \right)}{\left[ R_n - R \varphi \left( \frac{x}{L} \right) \right]^2}} \right\}. \quad (12)$$

В частном случае для  $U_1 = U \left( \frac{x}{L} \right)$

$$y = \frac{\pi d^3}{8\rho} \frac{R_n}{2} \frac{1}{\left( \frac{x}{L} \right)^2} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4RR_n \cdot \left( \frac{x}{L} \right)^2}{\left[ R_n - R \left( \frac{x}{L} \right) \right]^2}} \right\} - a. \quad (13)$$

Определим предельные значения  $y$  при  $R_1 = 0$  и при  $R_1 = R$ .

Согласно схеме рис. 1

$$U_1 = U - I_0 (R - R_1)$$

и

$$I_0 = \frac{U}{(R - R_1) + \frac{R_1 R_n}{R_1 + R_n}}.$$

Следовательно,

$$U_1 = \frac{R_1 R_n}{RR_n + RR_1 - R^2_1};$$

с другой стороны,

$$U_1 = U \varphi \left( \frac{x}{L} \right),$$

поэтому

$$\varphi \left( \frac{x}{L} \right) = \frac{R_1 R_n}{RR_n + RR_1 - R^2_1}. \quad (14)$$

Далее

$$\frac{dR_1}{dx} = \frac{dR_1}{d\varphi \left( \frac{x}{L} \right)} \frac{d\varphi \left( \frac{x}{L} \right)}{dx} = \frac{dR_1}{d\varphi \left( \frac{x}{L} \right)} \varphi' \left( \frac{x}{L} \right)$$

и

$$\frac{d}{dR_1} \varphi \left( \frac{x}{L} \right) = \frac{R_n (RR_n + R^2_1)}{(RR_n + RR_1 - R^2_1)^2}.$$

Следовательно,

$$\frac{dR_1}{dx} = \frac{(RR_n + RR_1 - R^2_1)^2}{R_n (RR_n + R^2_1)} \varphi' \left( \frac{x}{L} \right). \quad (15)$$

Из этого равенства получаем:

$$\lim_{R_1 \rightarrow 0} \frac{dR_1}{dx} = R \varphi' \left( \frac{x}{L} \right) \quad (16)$$

и

$$\lim_{R_1 \rightarrow R} \frac{dR_1}{dx} = \frac{RR_n}{R + R_n} \varphi' \left( \frac{x}{L} \right). \quad (17)$$

Значения  $y$ , соответствующие (16) и (17), определяются из (10) в виде:

при  $R_1 = 0$

$$y_0 = \frac{\pi d^3}{8\rho} \cdot R \varphi' \left( \frac{x}{L} \right) - a; \quad (18)$$

при  $R_1 = R$

$$y_L = \frac{\pi d^3}{8\rho} \cdot \frac{RR_n}{R + R_n} \varphi' \left( \frac{x}{L} \right) - a. \quad (19)$$

Уравнения (8), (12), (18) и (19) являются основой для расчета функциональных нагруженных делителей напряжения.

<sup>2</sup> См. статью автора, цитируемую в сноске 1





# Емкостный делитель высокого напряжения с экранировкой

И. Е. БАЛЫГИН

Ленинград

Известно, что построить высоковольтный емкостный делитель затруднительно по причине коронирования верхнего электрода. Вопрос коронирования является определяющим для подобного рода делителей, если последние предназначаются для целей измерения импульсного напряжения. Ионы, появляющиеся в пространстве между электродами при коронировании, как известно, изменяют соотношение емкостей в делителе и коэффициент деления не остается постоянным. Из элементарных условий (рис. 1) получается:

$$U_2 = \frac{C_1 U_0}{C_2 + C_1}.$$

Обычно в делителях высокого импульсного напряжения  $C_2 \gg C_1$  и практически

$$U_2 = \frac{C_1 U_0}{C_2}.$$

При увеличении  $C_1$  от коронирования  $U_1$  будет увеличиваться непропорционально. В поисках более совершенных выполнений такого рода делителей автором был построен и испытан опытный образец экранированного емкостного делителя, о чем и сообщается ниже. Так как практически избежать коронирования краев верхнего диска очень трудно, то в этом делителе образующие ионы исключаются из схемы деления. Приемный электрод  $A$  помещен внутри деревянного цилиндра, обмотанного безиндукционно проволокой из константана по правой и левой винтовым линиям с общим сопротивлением около  $6200 \Omega$  (рис. 2). Верхний электрод состоит из диска  $d = 1,5$  м. Он вырезан из одного листа фанеры толщиной  $0,6$  см и обклеен фольгой. Верхние концы обмоток присоединены к этому диску, а нижние заземлены. Диаметр цилиндра равен  $90$  см и высота  $1,5$  м. Чтобы иметь возможность оценить действие экрана, испытания производились с обычным емкостным делителем и с экранированным на волнах с несглаженными колеба-

ниями. При этом верхним электродом обычного делителя служил шар диаметром  $d = 1$  м и тот же диск из фанеры, находившийся на том же месте, что и экранированный (при всех прочих одинаковых условиях). Приемным электродом служила тарелка из меди  $d = 15$  см с плавно загнутыми краями.

На осциллограммах (рис. 3, I), записанных при делении без экранирующего цилиндра, когда верхним электродом служил диск из фанеры, явно заметны следы присутствия в междуэлектродном пространстве ионов такого же знака, что и подаваемая волна. Электронный пучок осциллографа после среза пробегал значительно выше нулевой линии. На осциллограммах, записанных при тех же условиях, но при наличии экранированного делителя, влияние объемного заряда ионов исключено экраном и пучок совпадает с нулевой линией (рис. 3). Срезы волны происходили при пробоях воздушного промежутка  $27,5$  см на шарах  $d = 2,5$  м. Такие же осциллограммы снимались при усиленном коронировании верхнего диска, когда на последний было набито 16 гвоздей длиной  $\sim 3$  см по окружности радиуса  $67,5$  см, т. е. вне экранированной зоны (цилиндр  $d = 90$  см). При этих условиях корона была заметна даже в случае значительной освещенности зала. На осциллограммах, снимаемых без цилиндра, присутствие ионов обнаруживалось еще яснее, а при делителе с экраном попрежнему линия электронного пучка осциллографа после среза проходила по нулевой линии (осциллограмма IV). Осциллографирование срезов при импульсах  $715, 835$  и  $855$  кВ с одинаковым временем запаздывания пробоя показало, что коэффициент деления

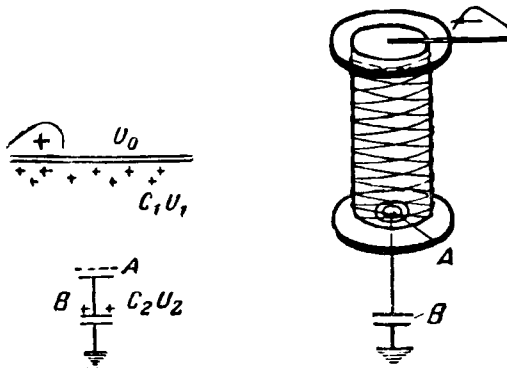


Рис. 1. Схема коронирующего емкостного делителя.

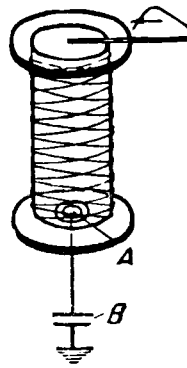


Рис. 2. Экранированный емкостный делитель.

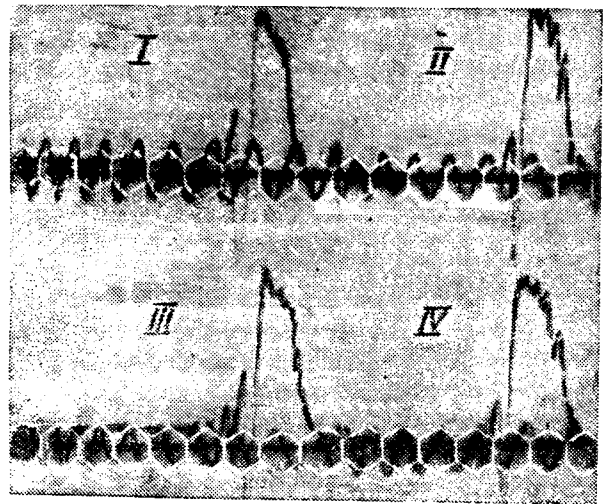


Рис. 3. Осциллограммы срезов волн при делении неэкранированным и экранированным емкостными делителями (градуировочная частота  $2 \mu\text{sec}$ ).

при экранированном делителе не изменился, в то время как при делении обычным делителем с верхним электродом из фанерного листа (без гвоздей) получилось изменение этого коэффициента на 5%.

Эффект коронирования приемного электрода В (рис. 1) не наблюдался и в том случае, когда около этого электрода был concentрически помещен заземленный венец с 13 гвоздями на расстоянии 0,7 см от краев приемного электрода (верхний электрод-шар  $d = 1$  м не коронирован). Гвозди располагались в горизонтальной плоскости на уровне закругленных концов тарелки. При этом верхним электродом служил также шар  $d = 1$  м.



## Автоматическое отключение контактного провода в случае его обрыва

Кандидат техн. наук И. Л. ФАЙБИСОВИЧ

Всесоюзный научно-исследовательский угольный институт

Контактная электровозная откатка, — значительно более простая, дешевая и производительная по сравнению с аккумуляторной, — применяется на многих шахтах, опасных по газу или пыли. «Правила технической эксплуатации угольных шахт» разрешают применение контактных электровозов в шахтах первой и второй категорий по газу для откатки по главным откаточным путям, омываемым входящей струей.

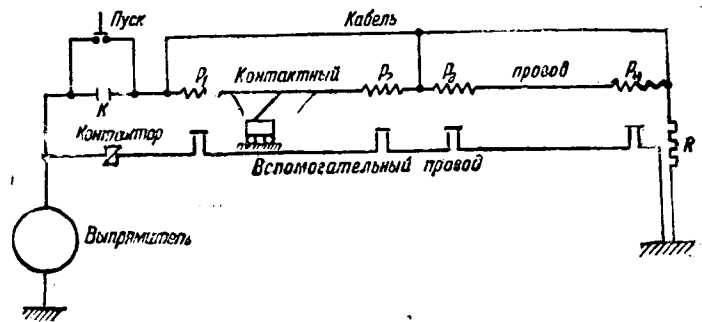
В этих случаях электровозы должны быть снабжены специальными устройствами для уменьшения искрообразования между контактным проводом и токоприемником. Однако это мероприятие не разрешает полностью вопроса безопасности. Существует еще опасность искрообразования при разрыве контактного провода, а затем при падении его на землю. Случаи обрыва контактного провода сравнительно редки, но подобным авариям сопутствует опасность воспламенения газа и возникновения пожара. Предотвращение этих опасностей требует устройства, которое автоматически отключало бы контактный провод при его обрыве.

Скорость отключения контактного провода должна быть такова, чтобы напряжение с контактного провода было снято раньше, чем он успеет упасть после обрыва на электровоз или на вагонетку, т. е. пройдет путь в 0,4 м.

Для устранения опасности появления электрической искры в момент разрыва контактного провода необходимо шунтировать место разрыва. В разработанной нами схеме с токовыми реле (см. рисунок) такое шунтирование осуществляется с помощью питательного кабеля.

В конце линии электровозной откатки между контактным проводом и рельсом включено балластное сопротивление  $R$ . Контактный провод разделен на отдельные участки. В начале и конце каждого участка в контактный провод вклю-

Даже при таких условиях не наблюдалось сколько-нибудь заметного отклонения пучка от нулевой линии. Сравнение осциллограмм, записанных при делении напряжения неэкранированным и некоронирующим емкостным делителем (шар  $d = 1$  м), с осциллограммами, снятыми при использовании экранированного делителя, показало, что последний не искажает формы импульсной волны. Таким образом при испытании емкостного делителя выяснилось, что экранированием его можно избавиться от мешающего действия короны с краев верхнего электрода. Представляется, что делители такого типа могут быть построены и на большие напряжения.



чены электродинамические токовые реле — на первом участке  $P_1$  и  $P_2$  и на втором участке  $P_3$  и  $P_4$ . Отключение контактного провода производится контактором  $K$ , в цепь которого включены с помощью вспомогательного провода контакты токовых реле  $P$ . Контактор  $K$  может быть установлен для каждого участка.

Два токовых реле в начале и в конце каждого участка приходится устанавливать в связи с тем, что обрыв провода может произойти или перед электровозом или после электровоза (см. пунктир на рисунке). В первом случае через обмотку реле  $P_1$  будет проходить ток электровоза, второе же реле будет обесточено и контакты его разомкнут цепь катушки контактора  $K$ . Во втором случае отключение будет произведено контактами реле  $P_2$ . На каждом участке может одновременно находиться только один электровоз, так как в противном случае, если один из электровозов будет находиться перед местом обрыва, а второй — после него, то оба реле останутся включенными, и устройство не сработает.

Эта схема проверена была в лабораторных условиях и работала совершенно четко. Недостаток ее заключается лишь в том, что она требует прокладки питательного кабеля вдоль всей линии откатки и большого количества реле.



## День радио 7 мая 1946 г.

Год тому назад, в связи с 50-летием со дня изобретения радио А. С. Поповым, правительство постановило:

«Учитывая важнейшую роль радио в культурной и политической жизни населения и для обороны страны, в целях популяризации достижений отечественной науки и техники в области радио и поощрения радиолюбительства среди широких слоев населения, установить 7 мая ежегодный «День радио».

День радио 7 мая 1946 г. был отмечен широко. Еще задолго до 7 мая Всесоюзный Радиокomitee провел ряд передач, посвященных достижениям советской радиотехники, радиосвязи, истории великого изобретения и использованию его в разных областях народного хозяйства.

Отдел научно-просветительных передач организовал беседы академика В. А. Фока о распространении радиоволн, академика Б. А. Введенского о путях развития радио. Один из старейших деятелей радиотехники, соратник А. С. Попова, П. Н. Рыбкин выступил с воспоминаниями о Попове. Состоялись также передачи «Автоматические радиометеостанции», «Телевидение», «Сверхмощные радиостанции» и другие.

В общественно-политических передачах были даны беседы маршала войск связи И. Т. Пересыпкина «Радио в Великой Отечественной войне» и героя Советского Союза Э. Т. Кренкеля «Радио в освоении Арктики» и др.

6 мая в Центральном Доме Красной Армии Министр связи СССР К. Я. Сергейчук открыл научную сессию Всесоюзного научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова, посвященную дню радио. За 4 дня работы сессии было заслушано 129 докладов по различным вопросам радиотехники. Почти одновременно научные сессии Всесоюзного научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова состоялись в Ленинграде, Киеве, Горьком, Новосибирске и других городах.

7 мая в Колонном Зале Дома Союзов состоялось торжественное заседание, созванное Комитетом по радиофикации и радиовещанию при Совете министров СССР, Министерством связи и электропромышленности и Центральным Советом Сюза Осоавиахим.

На заседании собрались работники связи и многочисленные специалисты, работающие в области радио, деятели науки и техники, стахановцы предприятий радиопромышленности, работники радиовещания.

Торжественное заседание открыл министр связи СССР К. Я. Сергейчук, охарактеризовавший во вступительном слове выдающиеся заслуги А. С. Попова и осветивший пути дальнейшего развития радиотехники в нашей стране.

С докладом выступил председатель Комитета по радиофикации и радиовещанию при Совете Министров СССР А. А. Пузин.

К заседанию появились первые номера двух новых радиожурналов: «Радио» — органа Всесоюзного Радиокomitee и Ц. С. Осоавиахима — ежемесячного научно-популярного журнала по вопросам радиолюбительского движения и радиоотдела и «Радиотехника» — органа Всесоюзного научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова — ежемесячного научно-технического и теоретического журнала.

Участники торжественного заседания с огромным воодушевлением приняли приветствие товарищу И. В. Сталину.

Главное Политическое Управление вооруженных сил Союза ССР и Управление войск связи сухопутных сил отметили День радио торжественным заседанием в Центральном театре Красной Армии. В зале присутствовали генералы и офицеры всех родов войск, слушатели военных академий, в основном связисты, представители частей Московского гарнизона. В президиуме — Маршал войск связи И. Т. Пересыпкин, Маршал артиллерии М. И. Чистяков, академик Б. А. Введенский, генерал-полковник войск связи Н. Д. Псурцев, командующий войсками Московского военного округа генерал-полковник П. А. Артемьев и другие.

С докладом на тему «Радио в Красной Армии» выступил маршал войск связи И. Т. Пересыпкин.

Участники торжественного заседания с большим подъемом приняли приветствие Генералиссимусу Советского Союза И. В. Сталину.

В Центральном доме Красной Армии Музеем связи КА открыта выставка, посвященная Дню радио. В двух больших залах демонстрируются радиостанции наших вооруженных сил, учебные схемы и наглядные пособия военных школ связи. Стены увешаны картинами, иллюстрирующими историю радио, роль радиосвязи в Великой Отечественной войне, портретами начальников связи фронтов и героев радиостов. Некоторые радиостанции демонстрируются как боевые реликвии: они пробиты пулями и осколками снарядов.

Большая радиовыставка открылась также в Государственном политехническом музее.

Приказом министра связи СССР К. Я. Сергейчука награждены знаком «Почетный радист» лица, способствовавшие развитию радио своими достижениями в области науки, техники, производства и эксплуатации средств радио и организации радиовещания. Первые значки были вручены выдающимся советским ученым — академиком Б. А. Введенскому и Н. Д. Папалекси.

Аналогичные приказы изданы в министерстве вооруженных сил СССР и министерства Электропромышленности.

На предприятиях, в учреждениях, высших учебных заведениях, в техникумах были проведены лекции и беседы о жизни и деятельности А. С. Попова, о развитии и достижении советского радио.

Общественность Ленинграда также широко отметила день радио.

В Доме Красной Армии состоялось торжественное заседание, на котором с большим докладом на тему: «Достижения и задачи советской радиотехники» выступил генерал-лейтенант технических войск Н. Х. Муравьев.

Заседания, посвященные дню радио, были проведены в Доме Культуры работников связи, на заводе им. Козицкого, в институте инженеров связи им. М. А. Бонч-Бруевича и во многих других предприятиях и учреждениях.

Министерством электропромышленности была организована выставка, показывающая историю изобретения радио и деятельность Ленинградской электропромышленности по выпуску массовой радиоаппаратуры и деталей.

6 мая вышла однодневная печатная газета «Говорит Ленинград».

Особенно широко день радио отмечали моряки Балтийского флота. На родине радио — в Кронштадте — состоялось специальное торжественное заседание с участием представителей флота и Ленинградской научной общности.

Открывший заседание вице-адмирал Ралль особенно отметил деятельность Краснознаменной школы связи им. А. С. Попова, в стенах которой на протяжении 18 лет работал А. С. Попов и где он изобрел радио.

С докладом «Изобретение радио и пути

его развития» выступил капитан 2 ранга М. А. Келларов.

В Кронштадте, в Доме офицеров флота, была организована большая радиовыставка. Школа связи им. Попова выставила немало оригинальных физических приборов, с которыми работал изобретатель радио. Специальный раздел выставки был посвящен современной радиоаппаратуре, применявшейся на судах нашего Военно-морского Флота.

Торжественно был отмечен День радио во многих других городах и селах СССР устройством выставок, лекций, бесед и заседаний, посвященных очередной годовщине изобретения радио, достижениям и задачам развития радиотехники в нашей стране.



## К учреждению золотой медали имени А. С. Попова

В целях увековечения памяти изобретателя радио А. С. Попова постановлением правительства от 2 мая 1945 г. учреждена золотая медаль имени А. С. Попова, присуждаемая ежегодно в одном экземпляре советским и зарубежным ученым Академией наук СССР в «День радио» 7 мая за выдающиеся научные работы и изобретения в области радио.

Первая медаль имени А. С. Попова будет присуждаться в конце 1946 г. Ввиду этого Всесоюзный научный совет по радиофизике и радиотехнике при Отделении физико-математических наук Академии наук СССР просит направлять работы на соискание медали имени А. С. Попова до 1 октября 1946 г. по адресу: Москва, 3, Миусская ул., д. 3 — Радиосовет.

Ниже публикуется «Положение о медали имени А. С. Попова», утвержденное Правительством 24 февраля 1946 г.

### ПОЛОЖЕНИЕ

#### о медали имени А. С. Попова

1. Медаль имени А. С. Попова присуждается Президиумом Академии наук СССР по представлению Совета по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР один раз в год, начиная с 1946 г., за выдающиеся научные работы и изобретения в области радио.

2. Рассмотрение и оценка работ, представляемых на соискание медали А. С. Попова, производятся Советом по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР.

3. Медаль имени А. С. Попова присуждается за оригинальные работы, имеющие крупное значение для развития радио. В первый раз медаль присуждается за работу, выполненную в течение 1935—1945 гг., а в последующее время — за работы, законченные в период между конкурсами.

4. Работы на соискание медали имени А. С. Попова представляются в Совет по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР не позднее 1 февраля года присуждения медали с надписью: «На соискание медали имени А. С. Попова».

Совет по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР обязан рассмотреть работы и представить на утверждение Президиума Академии наук СССР кандидатов на

получение медали имени А. С. Попова не позже 7 апреля того же года.

Президиум Академии наук СССР присуждает медаль имени А. С. Попова ежегодно 7 мая (в «День радио»).

5. Медалью имени А. С. Попова могут быть награждены советские и зарубежные ученые за опубликованные ими работы.

Работы могут представляться научными обществами, научно-исследовательскими институтами, высшими учебными заведениями, ведомствами, общественными организациями и отдельными гражданами.

6. Работы могут быть представлены на любом языке в трех экземплярах, напечатанных на пишущей машинке или типографским способом. К работе прилагаются отзывы организаций, представляющих работу на соискание медали, о научной ценности и значении работы для развития радио, а также краткие биографические сведения о кандидате на получение медали с перечнем его основных работ и изобретений.

7. Заседания Совета по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР для рассмотрения и оценки работ, представленных на соискание медали, созываются председателем Совета и считаются действительными при наличии не менее двух третей членов Совета.

8. Решения Совета по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР утверждаются Президиумом Академии наук СССР.

9. Архив и дела по присуждению медали А. С. Попова хранятся в Совете по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР.

10. Средства и расходы, связанные с присуждением медали имени А. С. Попова (рецензирование работ, проведение экспертиз, изготовление медали, проведение торжественного заседания, объявления в газетах и журналах и др.), предусматриваются в смете Совета по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР.

11. О предстоящем конкурсе и о присуждении медали имени А. С. Попова публикуется в «Вестнике Академии наук СССР», в центральных газетах, в известиях отделений и в иностранных радиожурналах.

12. Если Совет по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР признает, что ни одна работа из представленных на соискание медали не заслуживает присуждения ее, то конкурс считается несостоявшимся.



## Конференция-курсы по электроприводу в бумажной промышленности

20—22 февраля 1946 г. ВНИТОЭ совместно с Наркоматом бумажно-целлюлозной промышленности была проведена конференция-курсы по электроприводу в бумажной промышленности. На конференции присутствовало 78 инженерно-технических работников по вопросам электропривода в бумажной промышленности и смежных отраслей, в том числе представители Севзапэлектромонтажа, Бумпрокта, Балахнинского, Марийского комбината, ЛПИ, ЛЭТИ, КИИ и др.

На конференции было заслушано 12 докладов, преимущественно по наиболее сложному электроприводу в бумажной промышленности — приводу бумагоделательных машин. С докладом выступили: Ципкин, инж. П. К. Куликовский, инж. С. С. Меклер, инж. В. Л. Барышников, доктор техн. наук, проф. В. К. Попов, кандидат техн. наук Ю. А. Сабинин, кандидат техн. наук Б. Я. Коган, инж. Л. В. Корнюшин, инж. В. З. Зайцев, инж. И. А. Гунько, инж. Рыбаков.

В принятой резолюции рассмотрены необходимые для дальнейшего развития электропривода в бумажной промышленности мероприятия организационного и научно-исследовательского характера, вопросы проектирования и издательской деятельности. Наибольшей дискуссии подверглись вопросы автоматизированного электропривода бумагоделательных машин.

Конференция отметила интересные работы Севзапэлектромонтажа и Проектно-восстановительного треста по разработке автоматических электронных регуляторов напряжения и скорости для приводов бумагоделательных машин.

Была отмечена также инициатива работников Вишерского бумкомбината по разработке новых методов регулирования натяжения бумажного полотна и рекомендовано продолжать изыскания в этом направлении.

На основании опыта монтажа, наладки, исследования электроприводов бумажных фабрик в СССР, а также на основании практики проектирования приводов бумажной промышленности в СССР, США, Англии и других странах конференция рекомендовала:

1. Все вновь строящиеся бумагоделательные, картонные и подобные по сложности производственные агрегаты в бумажной промышленности снабжать многодвигательными электроприводами; система и конструкция приводов должны при этом видоизменяться в зависимости от назначения машин.

2. На данном этапе многодвигательные приводы осуществлять по системе Леонарда; переход на управление скоростью вращения двигателей от ионных преобразователей поставить в зависимость от времени выпуска заводами электропромышленности регулируемых ионных преобразователей, отвечающих требованиям бумажной промышленности.

3. Систему пуска и ускорения, а также обеспечение вспомогательных работ для секционных двигателей сле-

дует принимать в зависимости от мощности производственного агрегата, при этом, в частности:

а) для бумагоделательных машин с рабочей скоростью свыше 250 м/мин рекомендуется дополнительный вспомогательно-пусковой агрегат Леонарда, по возможности с непрерывным управлением ускорением при постоянстве избыточного момента отдельных секционных двигателей;

б) для бумагоделательных машин с максимальными рабочими скоростями в пределах от 150 до 275 м/мин, рекомендуется применение отдельного генератора в сочетании с отдельными пусковыми сопротивлениями для каждого двигателя;

в) для бумагоделательных машин с максимальными рабочими скоростями до 150 м/мин, рекомендуется применение общего пускового сопротивления;

г) установка рабочей и относительной скорости секций должна производиться вручную непосредственным воздействием на регулятор либо дистанционно с помощью самосинов, применения для этой цели серводвигателей с кнопочным управлением рекомендуется избегать.

4. Автоматическую стабилизацию рабочей и относительной скоростей осуществлять с наибольшей непрерывностью во избежание трудно устранимых в эксплуатации колебаний регулируемых параметров. В новых системах согласованного вращения ременные и подобные им передачи, не имеющие строго постоянного передаточного числа, не должны применяться.

5. Ручное управление натяжением бумажного полотна должно осуществляться при последовательно-параллельном или параллельном соединении двигателей. Предпосылками для применения последовательно-параллельных систем являются диапазон регулирования рабочей скорости 1:3 и выше и относительно большое число секционных двигателей, включаемых в систему согласованного вращения (10 и более). В остальных случаях следует ограничиваться одним параллельным соединением.

Конференция рекомендовала дальнейшие технические изыскания в целях создания более совершенной системы регулирования постоянства мощности дефибреров. Конференция считает системы электроприводов, применяющиеся до сих пор для каландров, перемотных станков, саморезок и других станков отделочных цехов, дорогими и сложными и рекомендует дальнейшее изучение этого вопроса.

Конференция поставила перед электропромышленностью вопрос о необходимости организации производства электрических машин и аппаратов управления, пригодных для работы в специфических условиях подготовительных цехов бумажной промышленности (кислота, хлор, повышенная влажность и пр.).

Доктор техн. наук В. К. ПОПОВ



## Вопросы электрификации железных дорог на научно-технической конференции Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

25—30 марта 1946 г. состоялась научно-техническая конференция Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ЦНИИ), открывшаяся докладом директора института члена-корреспондента АН СССР *Т. С. Хачатурова* на тему: «План развития железнодорожного транспорта в четвертой пятилетке и задачи научно-исследовательской работы в свете указания товарища Сталина».

Возросший объем перевозок требует перевооружения транспорта новой техникой. Предстоит улучшить путевое хозяйство, разработать новые типы вагонов и мощных локомотивов и методы их ремонта.

Широкое внедрение тепловозов и перевод на электрическую тягу железнодорожных магистралей Урала, Сибири, Закавказья требуют применения на транспорте нового вида оборудования его — автоматизации, а также новых методов расчета отдельных элементов тяги.

Докладчик отметил, что конференция подводит итоги работы института за 1945 г.; в программу работы конференции включены вопросы, разрешение которых может дать значительный эффект для развития транспорта в четвертой пятилетке.

Затронутые в докладе *Т. С. Хачатурова* вопросы обсуждались на заседаниях секций.

В частности, на секции электрификации железных дорог был заслушан и обсужден доклад кандидата техн. наук *М. Д. Трейваса* «Игнитронные выпрямители и их испытание на тяговой подстанции Пермской железной дороги».

Проблема применения игнитронных выпрямителей на тяговых подстанциях электрических железных дорог разработана доц. *Б. М. Шляпошниковым* (Ленинградский политехнический институт им. Калинина) в кооперации с заводами электропромышленности, которые изготовили оригинальную конструкцию стеклянно-металлического игнитрона высокого напряжения. Вентили этого типа были собраны по схеме Греца и испытаны на одной из подстанций электрифицированного участка Пермской железной дороги. Испытания, которые были проведены с участием доц. *Б. М. Шляпошникова* и научных сотрудников ЦНИИ, показали полную пригодность игнитронов для работы в условиях эксплуатации и питания электропоездов. К настоящему времени этот игнитронный выпрямитель (300 А, 3000 В) проработал уже более 1000 ч без каких-либо повреждений.

Очередные задачи в области дальнейшего успешного использования игнитронных выпрямителей сводятся к разработке улучшенных схем поджигания его вентиля и созданию силовых и вспомогательных схем, которые позволили бы осуществить рекуперативный режим и обеспечить бы работу выпрямителя в режиме, эквивалентном двенадцатифазному.

Инж. *А. В. Иванов* в докладе «Автоматизация тяговых подстанций электрифицированных железных дорог на слаботочной аппаратуре» сообщил о новых схемах автоматизации фидеров и ртутно-выпрямительных агрегатов, разработанных в ЦНИИ с применением слаботочной аппарату-

ры типа КДР. Использование последних значительно упрощает монтаж подстанций и сокращает расходы на аппаратуру. Испытание новых схем и длительная их работа в эксплуатационных условиях показывает, что найденные новые решения позволяют надежно и сравнительно дешево осуществить автоматизацию тяговых подстанций.

Инж. *В. Д. Мацнев* в своем докладе «Счетчик электроэнергии для электроподвижного состава» отметил актуальность выбора конструкции счетчика постоянного тока в связи с проблемой улучшения способа вождения поездов и экономии энергии. Обычные электродинамические счетчики с барабанным якорем, равно как и ртутные счетчики вследствие ряда недостатков не нашли широкого применения на электроподвижном составе. Но счетчик системы *В. Д. Мацнева*, с дисковым якорем, электродинамического типа свободен от недостатков, присущих вышеупомянутым счетчикам, так же как и второй его вариант — колебательный счетчик. Колебательный принцип работы позволяет сократить габариты и вес подвижной системы счетчика.

Старший научный сотрудник института *А. Б. Воронин* доложил «О токораспределении между проводами контактной сети и тяговом расчете ее элементов». Имеющие место в эксплуатации случаи отжига контактного провода, пережога струн и т. п. указывают на необходимость производства не только механического, но и теплового расчета контактной подвески. Используя теорию подобия и исходя из экспериментальных данных Гильперта, можно определить коэффициенты теплоотдачи для разных типов проводов. Температура перегрева провода при протекании тока может быть определена из уравнения, аналогичного уравнению, по которому производится тепловой расчет тягового двигателя.

Исследуя нагрев струны и поперечных электрических соединений с учетом токораспределения при проходе пантографа, можно определить оптимальное расстояние между электрическими соединениями и их сечения. Можно также составить уравнения для определения допустимого по нагреву тока нагрузки или температуры перегрева отдельных элементов контактной подвески с учетом токораспределения в момент подхода пантографа.

Инж. *А. Н. Кукин* сделал сообщение на тему: «Новый способ приварки стыковых рельсовых соединителей». На железнодорожном транспорте применяются стыковые электрические соединения. Приварка их к рельсам производится при помощи электрической или газовой сварки, требующих громоздкого оборудования. Термитная сварка по существу приводит не к приварке, а к припайке твердым припоем. В ЦНИИ разработан и предложен новый способ термитной приварки стыковых электрических соединений, позволяющий при помощи небольших порций специального термита получать быструю и высококачественную приварку стыковых соединений.

В работе секций конференции приняли активное участие представители «Метропроекта», «Трансхипроекта», Центрального управления электрификации Министерства путей сообщения и других организаций.

Кандидат техн. наук *М. Д. ТРЕЙВАС*





## КЛАВДИЙ ИПОЛИТОВИЧ ШЕНФЕР

18 мая с. г. после тяжелой болезни умер выдающийся советский ученый академик Клавдий Ипполитович Шенфер.

Год тому назад советская электротехническая общественность на торжественном заседании ученого совета Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР совместно с бюро отделения технических наук Академии тепло отмечала 60-летие со дня рождения ученого.

Клавдий Ипполитович Шенфер родился и вырос в семье паровозного машиниста. Он рано начал свою трудовую жизнь, посвятив себя целиком любимой им области науки. Окончив Московское высшее техническое училище, благодаря своим блестящим способностям лектора и педагога он быстро завоевал себе авторитет как преподаватель, а затем и профессор в области электротехники и электрических машин.

Его учебники по электрическим машинам, много раз переиздававшиеся, могут служить образцом того, как сложнейшие теоретические вопросы становятся ясными и понятными в изложении замечательного педагога, каким был К. И. Шенфер.

Научные труды К. И. Шенфера, в количестве более 80, опубликованные у нас и за границей, получили всеобщее признание и положили начало советской науке в области теории электрических машин.

Работы по коммутации в электрических машинах, по переходным режимам, по рекуперации электроэнергии на транспорте и в промышленности принадлежат к числу классических работ и служат гордостью советской науки.

Основной чертой всех научных работ К. И. Шенфера является тесная связь с практикой, стремление дать в результате исследования конкретное улучшение в конструкции электрических машин.

К. И. Шенферу принадлежит авторство многих десятков изобретений.

В своей многосторонней научной и педагогической работе Клавдий Ипполитович выше всего ставил интересы любимой им Родины и с первых дней Великой Октябрьской революции и до последних дней своей жизни всегда был пламенным патриотом Советской страны.

Научная деятельность покойного была по достоинству оценена: в 1930 г. он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1932 г.— академиком. Правительство удостоило его Сталинской премии I-й степени и наградило орденами Ленина и Трудового Красного Знамени.

Клавдий Ипполитович Шенфер с честью прошел свой путь крупнейшего ученого и советского гражданина.

Все, кто работал вместе с ним, и многочисленное поколение молодых ученых, воспитанное им, сохраняют о К. И. Шенфере самую светлую память.

*Президиум Академии наук СССР  
Отделение технических наук АН СССР  
Московский энергетический институт им. В. М.  
Молотова  
Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского Академии наук СССР  
Всесоюзный электротехнический институт  
и НИИ 801  
Научно-исследовательский институт № 627  
Редакция журнала «Электричество»*



# Рефераты

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Новые стандарты на турбогенераторы. *El. World*, стр. 96—99, № 5, 1945.

Объединенным комитетом американского института инженеров-электриков (AIEE) и Объединения инженеров механиков (ASME) разработаны новые стандарты на турбогенераторы мощностью от 11 500 до 60 000 kW при  $n=3\ 600$  об/мин. Стандарты предложены на основе обобщения опыта эксплуатации свыше половины турбогенераторов на электростанциях общего пользования США.

Авторы стандартов рассматривают последние как значительный шаг вперед в стандартизации электрохозяйства и предполагают существенное снижение затрат по изготовлению и эксплуатации электромашин, хотя не исключается и применение машин со специальными нестандартными характеристиками.

В разработанных стандартах поставлена задача сокращения числа типов выпускаемых турбогенераторов в отличие от задач стандартизации в других отраслях, сводившихся, обычно, к обеспечению взаимозаменяемости деталей.

Турбогенераторы в диапазоне мощностей 500—7 500 kW были стандартизованы уже в течение значительного времени, однако, стандартизация более крупных машин затруднялась частыми техническими сдвигами в строительстве. В настоящее время оказалось возможным стандартизовать и более крупные машины.

Прежняя шкала мощностей конденсационных турбогенераторов с  $n=3\ 600$  об/мин насчитывала 10 ступеней мощности от 10 000 до 60 000 kW, новая шкала имеет всего 6 ступеней мощностей от 11 500 до 60 000 kW.

В новом стандарте нет такого разрыва между максимальными мощностями турбины и генератора. Нормальная работа генератора при наибольших нагрузках достигается при превышении киловольтамперной мощности генератора над перегрузочной мощностью турбины на 7%.

Ниже приведено сравнение характеристик двух машин по старому и новому стандарту:

	Мощность, kW	Максимальная перегрузочная мощность, kW	Мощность генератора, kVA	$\cos \varphi$	$\cos \varphi$ при перегрузочной мощности	Отношение kVA генератора к перегрузочной мощности турбины
Старый стандарт . . . . .	35 000	43 750	43 750	0,8	1,0	1,0
Новый стандарт . . . . .	40 000	44 000	47 058	0,85	0,935	1,07

Большое значение в стандарте имеет кратность тока короткого замыкания (т. к. з.), снижение которой позволяет уменьшить размеры машины, расход и стоимость материалов. Комитет рассмотрел вопрос о снижении кратности т. к. з. до 0,9. Были построены машины с колебанием этого коэффициента от 0,5 до свыше 1,0. Отмечены случаи устойчивой работы машин в течение свыше 15 лет при кратности т. к. з. в 0,5—0,6.

Два низших размера машин в предложенной шкале имеют воздушное охлаждение, четыре высших — оборудованы водородным охлаждением. При нынешнем уровне

### Предлагаемые стандарты крупных конденсационных турбогенераторов с $n=3\ 600$ об/мин при трехфазном токе частотой 60 Hz

Параметры	Единицы измерения	Генераторы с воздушным охлаждением		Генераторы с водородным охлаждением при давлении водорода 0,035 kg/cm <sup>2</sup>			
		11 500	15 000	20 000	30 000	40 000	60 000
Мощность турбогенератора . . . . .	kW	11 500	15 000	20 000	30 000	40 000	60 000
Мощность турбины . . . . .	»	12 650	16 500	22 000	33 000	44 000	66 000
Мощность генератора номин. . . . .	kVA	13 529	17 647	23 529	35 294	47 580	70 588
$\cos \varphi$ . . . . .	—	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Кратность тока короткого замыкания . . . . .	—	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Генераторы с водородным охлаждением при давлении водорода 1,06 kg/cm <sup>2</sup>							
Мощность генератора при $\cos \varphi=0,85$ . . . . .	kVA	—	—	27 058	40 588	54 117	81 176

Максимальная перегрузочная мощность машин принята на 10% выше номинальной вместо 25% в прежнем стандарте.

Агрегат в 60 000 kW с максимальной перегрузочной мощностью 66 000 kW представляет собою наиболее экономичную гандемкомплектную машину при  $n=3\ 600$  об/мин. По сравнению с прежним стандартом предложено значительное сокращение числа типов машин.

Стандартные агрегаты характеризуются коэффициентом мощности 0,85 против 0,8 в прежнем стандарте. Последний коэффициент соответствовал номинальной мощности турбины. Наибольшая активная мощность могла быть достигнута для указанной выше перегрузочной мощности (125% номинальной) при  $\cos \varphi=1$ , что требовало дополнительного оборудования для исправления  $\cos \varphi$ .

техники агрегаты в 20 000 kW считаются наименьшим пределом экономичного применения водородного охлаждения.

В новом стандарте воздушные охладители рассматриваются как составная часть генераторов. Охладители проектируются при температуре охлаждающей воды 32° С и рабочем давлении 3,5 kg/cm<sup>2</sup>, но предусмотрена возможность повышения этих параметров.

Водородное охлаждение осуществляется при давлении водорода 0,035 kg/cm<sup>2</sup>, однако, оборудование допускает перевод на давление 1,06 kg/cm<sup>2</sup> при соответствующей установке регулировочных клапанов. Повышение давления позволит увеличить мощность при расчетном  $\cos \varphi$  генератора без повышения гарантированной температуры. Увеличение давления водорода на 0,14 kg/cm<sup>2</sup>



компенсирует повышение температуры охлаждения с 32 до 35° С.

Диапазон применяемых значений генераторного напряжения столь широк, что не представляется возможным установить одно стандартное напряжение; однако, установленные в стандарте 4 напряжения удовлетворяют, вероятно, всем требованиям на 95%. Вопрос о генераторном напряжении изучается Объединенным комитетом (I. E. E.—NEMA). Повидимому, наиболее подходящим для проектировщиков и энергомашиностроителей является напряжение порядка 13,8 кV, но напряжения — 11,5, 12,5 и 14,4 кV также достаточно распространены.

Большое место в новом стандарте занимают данные о реактивной мощности. Спецификация включает кривые зависимости реактивной мощности от нагрузки при отсутствии перегрузки или перегрева обмоток ротора и статора генераторов.

Стандарты в части системы возбуждения базируются на возбудителе, сидящем на общем валу, что соответствует нынешней практике выпуска генераторов. В то же время возбудители могут быть выполнены отдельно без изменения стандарта турбогенератора.

Комитет тщательно рассмотрел полученные эксплуатационные данные и рекомендовал максимальное увеличение доли стандартных машин в общем их выпуске, для повышения экономичности электрохозяйства.

Кандидат техн. наук **Б. Л. ЭРЛИХМАН**

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

**E. Karplus. Конструкция трансформаторов типа Variac. AIEE Transactions, стр. 508, т. 63, 1944.**

Трансформаторы типа Variac (название происходит от слов Variable a—с voltage) представляют собой регулировочные автотрансформаторы, предназначенные для регулирования напряжения, для поддержания номинального напряжения у потребителя независимо от нагрузки или от его расстояния от подстанции, для регулирования скорости двигателей, температуры электропечей в лабораториях, для театрального освещения и т. п. Преимущество трансформаторов типа Variac перед другими видами регуляторов напряжения обусловили их широкое распространение в последние годы в США. В настоящее время в эксплуатации находится уже около миллиона таких трансформаторов.

Трансформаторы типа Variac изготавливаются мощностью от 10J до 10 000 VA, большей частью в сухом исполнении на стандартные низкие напряжения.

Сердечник трансформаторов типа Variac имеет кольцеобразную форму. На него в один слой наматывается обмотка, по которой скользит контакт, перемещаемый путем вращения центральной рукоятки. Таким образом, число ступеней регулировки равно числу витков обмотки трансформатора; последнее выбирается достаточно большим для того, чтобы регулировка напряжения была плавной даже при малых вторичных напряжениях. Число вольт на виток, как правило, колеблется в пределах от 0,5 до 1 V.

Соседние витки обмотки расположены близко друг к другу, а ширина контакта достаточна для того, чтобы он всегда касался по крайней мере одного витка. Таким образом, оказывается возможным регулирование напряжения под нагрузкой без размыкания цепи. Для обеспечения надежного регулирования ширина контакта должна быть больше, чем расстояние между соседними витками, т. е. возможно закорачивание смежных витков контактом.

Скользящий контакт изготавливается из электротехнического угля и должен обладать такими свойствами, чтобы он, с одной стороны, в достаточной мере ограничивал ток, циркулирующий в короткозамкнутом витке, а с другой стороны, не представлял бы слишком большого сопротивления для протекающего через него тока нагрузки.

Если через  $R_1$  и  $R_2$  обозначить эквивалентные сопротивления между угольным контактом и двумя соседними витками, которые он закорачивает, то, как показывает

анализ, минимальные потери в контакте получаются в случае, если эти сопротивления удовлетворяют условию:

$$\sqrt{R_1 R_2} = \frac{e_0}{I_2},$$

где  $e_0$  — вольт на виток трансформатора, а  $I_2$  — ток нагрузки. Если  $R_1$  и  $R_2$  удовлетворяют этому условию и равны между собой, то потери в контакте получаются:

$$W_0 = e_0 I_2.$$

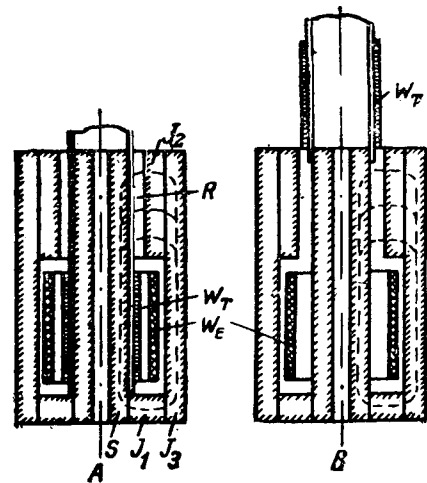
Трансформаторы типа Variac рассчитываются таким образом, чтобы они длительно выдерживали дополнительные потери, возникающие при закорачивании контактом соседних витков.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

**A. Meyerhans. Бесконтактный регулировочный трансформатор с плавным регулированием напряжения. Brown-Boveri Mitt., стр. 207, № 6, 1945.**

Регулирование вторичного напряжения в распределительных сетях имеет большое значение для поддержания номинального напряжения и повышения качества электроэнергии в местах ее потребления. Для этой цели строятся регулировочные распределительные трансформаторы и автотрансформаторы либо со ступенчатым, либо с плавным регулированием напряжения под нагрузкой. В реферированной статье описывается конструкция трансформатора с плавным регулированием напряжения фирмы Brown-Boveri (Швейцария), отличающаяся от потенциал-регулятора и трансформатора с подвижным сердечником тем, что в ней передвигается лишь одна обмотка относительно другой обмотки и магнитопровода. Конструкция Brown-Boveri отличается также от трансформатора с подвижной катушкой системы Normis.

Как видно из рисунка, трансформатор имеет две обмотки: одну неподвижную возбуждения обмотку  $W_E$  и подвижную обмотку  $W_T$ . Если обмотка  $W_T$  находится в крайнем нижнем положении А, то обе обмотки сцеплены с полным магнитным потоком и в обмотке  $W_T$  индуктируется максимальное напряжение. В крайнем верхнем положении В обмотка  $W_T$  полностью выходит из магнитопровода и не сцеплена с магнитным потоком, в результате чего в ней не индуктируется напряжение. В промежуточных положениях обмотка  $W_T$  передвигается в кольцеобразном воздушном зазоре; при этом плавно изменяется ее потокосцепление, а следовательно, и индуктируемое в ней напряжение.



Принципиальное устройство однофазного регулировочного трансформатора.

А—крайнее нижнее положение подвижной обмотки  $W_T$ ; В—крайнее верхнее положение подвижной обмотки  $W_T$ ;  $J_1$ —нижнее ярмо;  $J_2$ —верхнее ярмо;  $J_3$ —боковые ярма;  $R$ —кольцеобразный зазор;  $S$ —сердечник с радиальным расположением листов;  $W_E$ —обмотка возбуждения;  $W_T$ —подвижная обмотка.

Ввиду того, что обычно для компенсации изменения напряжения в сети достаточно иметь ограниченный диапазон регулирования напряжения, то подвижная обмотка  $W_T$  соединяется с обмоткой возбуждения  $W_E$  по схеме автотрансформатора. Наличие сравнительно широкого воздушного зазора могло бы привести к чрезмерно большому току холостого хода. Во избежание этого сердечник выполнен с радиальным расположением листов и сильно увеличена высота верхнего ярма, так что индукция в воздушном зазоре составляет лишь небольшую долю от индукции в сердечнике. Этому способствует также и то, что ярмо охватывает сердечник по всей окружности.

Поднимание и опускание подвижной обмотки производится с помощью небольшого двигателя, вращающего через коробку передач вертикальный вал с резьбой, вдоль которого передвигается гайка, соединенная с подвижной обмоткой. Подвод тока к подвижной обмотке осуществляется гибкими кабелями. Вся конструкция помещается в маслonaполненный цилиндрический бак и поэтому пригодна для наружной установки и, в частности, на мачтах.

Описанные трансформаторы изготовляются фирмой для напряжения 380 В с диапазоном регулирования 74 В при номинальных токах от 10 до 400 А.

*Инж. А. Г. КРАЙЗ*

**H. C. Stewart, J. E. Holcomb. Методы обнаружения импульсных пробоев в распределительных трансформаторах. *El. Eng., стр. 640, № 9, 1945.***

Опыт импульсных испытаний трансформаторов говорит о недостаточной надежности применявшихся до настоящего времени методов обнаружения повреждений в трансформаторах при этих испытаниях. В реферруемой статье обобщается опыт американской фирмы GE по вопросу обнаружения повреждений при импульсных испытаниях распределительных трансформаторов и предлагается новый метод испытаний значительно более совершенный, чем применявшиеся ранее.

В утвержденном в 1942 г. стандарте США на трансформаторы указаны следующие признаки импульсных пробоев в трансформаторах: а) искажение формы волны импульса на зажимах трансформатора; б) дым и пузыри, поднимающиеся на поверхность масла; в) изменение шлейфовых осциллограмм в результате возникновения сопровождающего тока вслед за импульсным пробоем.

Все эти методы непригодны для обнаружения импульсных межвитковых и межслоевых пробоев, а иногда и пробоев главной изоляции трансформатора. В связи с этим фирмой GE была проведена исследовательская работа с целью изыскания новых, более совершенных методов обнаружения импульсных пробоев в трансформаторах. Исследования проводились при помощи импульсного анализатора с имитацией пробоев на различных участках обмоток.

Всего было исследовано восемь методов. Из них первые пять заключались в осциллографировании волны напряжения в той или иной точке трансформатора, а последние три — в осциллографировании формы волны импульсного тока в нейтрали трансформатора. При первых двух методах осциллографировалась согласно существующим правилам волна напряжения на зажимах трансформатора. В одном случае емкость импульсного генератора составляла 0,025 мкФ, что является обычной величиной. В другом случае емкость импульсного генератора была значительно меньше — 0,006 мкФ. В этом случае связь между трансформатором и импульсным генератором получается значительно менее жесткой и изменения величины полного сопротивления испытуемого трансформатора в результате импульсных пробоев в его обмотках приводят к большим падениям напряжения. Это облегчает обнаружение повреждений и, таким образом, второй метод является более надежным, чем первый.

Третий метод состоял в осциллографировании потенциала магнитопровода трансформатора. Вследствие емкостной связи с обмотками этот потенциал воспроизво-

дит форму приложенной к трансформатору волны импульса с накладывающимися высокочастотными колебаниями. Применение этого метода затрудняется тем, что он требует изоляции магнитопровода от земли.

При четвертом методе осциллографируется потенциал испытуемой обмотки не у линейного конца, а в какой-либо точке в глубине обмотки. Этот метод требует наличия выведенной на крышку трансформатора отпайки от высоковольтной обмотки и поэтому широкого применения иметь не может.

Наконец, пятый метод, основанный на осциллографировании напряжения, состоит в снятии формы потенциала одной из неиспытываемых обмоток испытуемого трансформатора. Вследствие наличия электростатической и электромагнитной связи между обмотками импульсные пробои в высоковольтной обмотке могут привести к значительным изменениям в форме потенциала низковольтной обмотки.

Последние три метода обнаружения импульсных пробоев основаны на осциллографировании импульсного тока в полном сопротивлении, включенном в нейтраль трансформатора. Изменения полного сопротивления обмотки трансформатора при импульсном пробое в ней приводят к изменениям импульсного тока. Последние фиксируются путем осциллографирования падения напряжения на включенном в нейтраль полном сопротивлении.

В качестве включаемого в нейтраль полного сопротивления исследовались активное сопротивление, емкость и емкость параллельно с сопротивлением. При одном омическом сопротивлении, включенном в нейтраль трансформатора, получается очень большой бросок тока в первый момент, так что приходится устанавливать искровой промежуток для защиты осциллографа. Применение одной емкости является весьма чувствительным методом, однако, оно связано с тем неудобством, что заряд конденсатора продолжает расти в течение длительного времени, в особенности при наличии отделяющего промежутка между объектом испытания и импульсным генератором. Поэтому оказалось целесообразным параллельно емкости включить сопротивление таким образом, чтобы не слишком снизить чувствительность схемы. Этот последний метод оказался наилучшим из всех исследованных и он был дополнительно проверен на реальных трансформаторах.

Приводимые в статье осциллограммы показывают, что этот метод дает возможность совершенно четко по изменению формы осциллограммы импульсного тока в нейтрали обнаружить замыкание одного витка в обмотке на 7200 В, т. е. 0,02% от общего числа витков. В то же время осциллограмма напряжения на линейном конце не показывает никаких изменений даже при пробоях, перекрывающих половину всей обмотки.

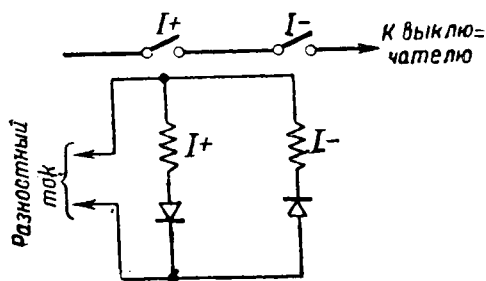
На основании проделанной работы авторы рекомендуют ввести в правила испытаний трансформаторов метод обнаружения импульсных пробоев в обмотках, основанный на осциллографировании падения напряжения на полном сопротивлении, включенном в нейтраль трансформатора.

*Инж. А. Г. КРАЙЗ*

**E. L. Michelson. Выпрямительное реле для защиты трансформаторов, *El. Eng., стр. 252, № 5, 1945.***

Построено и опробовано реле нового типа, предназначенное для дифференциальной защиты трансформаторов. В этом реле использован новый принцип блокировки от бросков намагничивающего тока при включении трансформатора<sup>1</sup>. Использованный метод не уменьшает чувствительности реле в момент включения трансформатора. Принцип действия нового реле основан на том, что ток включения представляет собой практически пульсирующий постоянный ток положительной или отрицательной полярности. Принципиальная схема показана на рисунке.

<sup>1</sup> См. также реферат „Усовершенствованная защита трансформаторов с помощью дифференциальных реле с блокировкой от бросков тока включения“. *Электричество*, № 4, 1946.



Принципиальная схема дифференциального выпрямительного реле.

В схеме имеются два отдельных реле, каждое из которых включается последовательно с сухим выпрямителем. Таким образом, одно реле работает при положительном, другое при отрицательном токе. Для отключения выключателя должны сработать оба реле. При бросках тока намагничивания работает только одно реле и выключатель не отключается. При повреждениях же в защищаемой зоне, когда положительный и отрицательный токи примерно равны между собой, оба реле придут в действие и отключат трансформатор.

Действительные условия несколько отличаются от идеальных. Осциллограммы токов включения, снятые во вторичной цепи трансформаторов тока, показывают, что эти токи являются знакопеременными, несмотря на то, что первичный ток практически представляет собой пульсирующий постоянный ток. Периодическая слагающая тока включения во вторичной цепи в первый момент включения мала, но затем растет и достигает своего максимума примерно спустя 5 периодов после включения. Более ранними исследованиями было установлено, что эта слагающая обусловлена насыщением трансформатора тока, вызванным протеканием через него постоянного тока. Амплитуда периодической слагающей и время ее появления в цепи зависят от конструкции трансформатора тока и сопротивления вторичной цепи.

Во избежание неправильной работы реле вследствие этой периодической слагающей тока имеется еще вспомогательное реле с выдержкой времени, которое включается при срабатывании любого из двух основных реле и через 1,5 периода включает параллельно основным реле сопротивление, уменьшающее их чувствительность.

После того, как ток включения трансформатора снизился до значения меньшего тока возврата основных реле, вспомогательное реле отключается и восстанавливается полная чувствительность основных реле.

Ряд лабораторных испытаний нового реле дал удовлетворительные результаты, после чего реле было применено для дифференциальной защиты трансформатора, который часто отключался в результате неправильного действия защиты при включениях. При этом реле вполне себя оправдало, устранив неправильные отключения трансформатора от бросков токов намагничивания и вместе с тем обеспечив большую чувствительность в отношении действительных повреждений в защищаемой зоне.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

### Развитие электромобилей в Англии в послевоенный период (обзор).

В Англии электромобили находят широкое применение для обслуживания торговой сети и молокопоставок. Число электромобилей, обслуживающих молочную торговлю, по утверждению W. H. Неупан, главного инженера Battery E1. Vehicle Dept [Л. 1], в течение ближайших 10 лет достигнет 12 500 шт., а общее число электромобилей, обслуживающих всю торговую сеть больших городов Англии, к этому же времени возрастет до 25 000 шт.

Специфика эксплуатации электромобилей, предназначенных для развозки продуктов, выработала требования, предъявляемые к электромобилям этого класса. Скорость таких электромобилей, как правило, должна составлять 9,5—11 км/ч. Ежедневный пробег электромобилей при полезной нагрузке в 345 л молока составляет не более 16 км, тогда как для развозки прочих продуктов требуется полезная нагрузка электромобиля в 750 кг, а ежедневный пробег должен достигать 65 км при скорости в 27 км/ч.

Интересной модификацией электромобилей, предназначенных для обслуживания торговой сети, являются „электротачки“ — электромобили, управляемые сзади или рядом идущим продавцом. Скорость таких электротачек составляет всего 4 км/ч [Л. 2].

Применение сплавов легких металлов для конструктивной механической части электромобилей позволило повысить их полезную нагрузку на 15%. Значительное снижение веса электромобиля удалось достигнуть путем применения алюминиевых ящиков для установки аккумуляторных батарей вместо применявшихся ранее стальных. Замена стальных стеллажей для молочных бутылок на алюминиевые дала дальнейшее снижение веса электромобиля на 10%.

В части пассажирских электромобилей [Л. 3] опыт эксплуатации их в военное время показал целесообразность постройки двухместных электромобилей, развивающих скорость в 40—48 км/ч и обеспечивающих радиус действия на одну зарядку в 56—64 км, что соответствует примерно 8—10 ч времени нахождения электромобиля в работе при средних условиях, предъявляемых пассажирским транспортом.

В условиях использования электромобилей для индивидуального пассажирского транспорта большую роль играет разработка простых и надежных в работе зарядных устройств, могущих обеспечить полную зарядку аккумуляторных батарей электромобиля в течение ночи. Стоимость зарядки современных электромобилей, как показал опыт эксплуатации, обходится в 50% стоимости горючего, необходимого автомобилю равной грузоподъемности для достижения одинакового с электромобилем пробега.

C. Ridley [Л. 3], указывая на уже известные преимущества электромобиля перед автомобилем, упоминает, что самые дешевые электромобили обладают по плавности хода качествами, не уступающими первоклассным маркам современных автомобилей Rolls-Royce, Bentley, Mercedes и др. Это дает возможность занять электромобилю видное место в пассажирских перевозках индивидуального городского транспорта.

В последнее время делались попытки создания стандартных типов электромобилей, и пассажирских в частности, которые, однако, не имели должного успеха, так как в конструкциях электромобилей еще слишком много заимствовало от автомобиля.

Автор приходит к выводу, что настало время ведущим автомобильным фирмам заняться разработкой специальных вполне современных конструкций электромобилей в механической части, органически согласованных с применением электрооборудованием электромобиля. Это мероприятие позволит создать электромобили, по комфортабельности и конструкции не уступающие лучшим маркам автомобилей.

По утверждению J. Delaney, [Л. 4], опыт строительства электромобилей показал, что при разработке механической части электромобиля компоновка всего электромобиля в целом должна производиться с обязательным участием инженеров-электриков, могущих предопределять и учесть все особенности и требования, предъявляемые к конструкциям электромобилей. Автор считает, что конструирование и постройка электромобилей должны вестись первоклассными автомобильными фирмами.

Широкое развитие электромобильного транспорта в городах выдвигает вопрос о создании фирмами, производящими электромобили, достаточно развитой сети ремонтно-зарядных станций, обслуживающих электромобили

## Литература

1. W. H. Neuman. *El. Times*, стр. 521, № 2818, 1945.
2. *El. Rev.*, стр. 469, № 3541, 1945.
3. C. Ridley. *El. Times*, стр. 299—300, № 2811, 1945.
4. J. Delaney. *El. Times*, стр. 573, № 2819, 1945.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

Опыт эксплуатации Паулистной и Центральной электрических железных дорог в Бразилии. *M.-V. Gaz.*, стр. 86, № 349 и стр. 110, № 350, 1945; *El. Times*, стр. 311, № 2811, 1945.

Магистральная железнодорожная линия Paulista электрифицирована на постоянном токе 3000 V. На линии эксплуатируются электровозы Metropolitan-Vickers с формулой осей 1—С—С—1, предназначенные для ширины колеи 1600 мм. Длительная мощность электровоза составляет 1750 kW. Система управления — электропневматическая с рекуперативным торможением.

Электровозы имеют сцепной вес 100 t и предназначаются для ведения пассажирских поездов весом в 400 t со скоростью 80 км/ч на площадке или 62 км/ч на подъеме в 20‰. Предельная скорость электровоза на площадке при хорошем состоянии путей с указанным составом поезда может быть доведена до 96 км/ч.

Как показал опыт эксплуатации электровозов на Paulista жел. дор., при применении рекуперативного торможения обеспечивается возврат 13,2% электроэнергии, затрачиваемой на движение поезда. Стоимость эксплуатации при электрической тяге на t-км составляет 32% от стоимости эксплуатации при паровой тяге.

Электрифицированная линия Центральной электрической железной дороги обслуживается двумя тяговыми подстанциями; на этой линии эксплуатировалось 60 трехвагонных моторвагонных секций. В настоящее время Metropolitan-Vickers совместно с Metropolitan-Cammell Carriage and Wagon Co изготовили и поставили для дороги дополнительно 30 моторвагонных секций вместе с электрооборудованием для двух тяговых подстанций. Подвижной состав каждой секции состоит из трех вагонов цельнометаллической конструкции. Каждый вагон оборудуется четырьмя тяговыми двигателями длительной мощностью по 130 kW, рассчитанными на напряжение 1500/3000 V. Управление секцией осуществляется по системе многих единиц и дает возможность эксплуатировать по две и более секций в одном составе поезда.

На каждой тяговой подстанции установлено по три водоохлаждаемых ртутных металлических выпрямителя мощностью 2500 kW каждый.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

R. J. Kipper. *Электричество на судах. El. Rev.*, стр. 520, № 3542; стр. 302, № 3536; стр. 339, № 3537, 1945.

Основная реферируемая статья представляет выдержки из доклада фирмы J. Brown Co Шотландскому отделению института инженеров-электриков (Scottish Centre of Inst. of El. Eng.).

В качестве примера современного электрооборудования судов приводится оборудование известного пассажирского судна „Queen Mary“.

На этом судне всего установлено 578 электродвигателей общей мощностью в 13 100 kW; в том числе 77 мощностью 3420 kW обслуживают машинный зал; 37 мощностью 2900 kW установлены в котельной; 19 мощностью 290 kW обслуживают производственные вентиляционные установки; 235 мощностью 820 kW предназначаются для вентиляции пассажирских помещений; 28 мощностью 4240 kW обслуживают палубные механизмы; 3 мощностью 550 kW установлены на рулевом управлении; 32 мощностью 30 kW обслуживают кухонное оборудование; 78 мощностью 190 kW служат для привода различных мелких судовых установок; 40 мощностью 200 kW предназначаются для подъемных механизмов; 5 мощностью 110 kW служат для холодиль-

ных установок; 24 мощностью 350 kW приводят механизмы для спасательных лодок.

Общая установленная мощность генераторов, обслуживающих эти электроприводные механизмы, составляет 9100 kW. Генераторное устройство состоит из семи турбогенераторов мощностью по 1300 kW каждый. Турбогенераторы установлены на двух отдельных силовых станциях, расположенных в различных частях судна.

Электрическая энергия постоянного тока, получаемая от турбогенераторов, поступает на два основных распределительных щита, откуда передается на 32 вспомогательных распределительных пункта, управляемых с центрального диспетчерского пункта.

На судне проложено 1300 км кабеля. Кроме указанных приводных устройств на судне установлены электрообогревательные устройства мощностью 420 kW и кухонные нагревательные приборы общей мощностью 1450 kW. Освещение судна обслуживается 29000 электрических ламп. В целях экономии электрической энергии и лучшего обслуживания пассажиров широко применяется индивидуальное освещение. В осветительных цепях применяются многократные переключатели до четырех цепей.

Известный интерес представляет оборудование нефтеналивного судна Англо-саксонской нефтяной компании водоизмещением 17,6 тыс. t—турбоэлектрохода мощностью на винте 9500 kW. Этот турбоэлектроход является самым мощным одновинтовым судном этого класса. Электрооборудование этого турбоэлектрохода фирмы Swan Hunter and Wigham Richardson.

Фирма Thomson Houston Co поставила электрооборудование для самого большого в мире кабелеукладочного судна Monarch, состоящее из двух турбогенераторов по 200 kW и двух дизельгенераторов по 100 kW. Применение питания цепи возбуждения генераторов от амплитудов позволяет использовать одни и те же генераторы для режима работы как при неизменном токе, так и при неизменном напряжении, что упрощает электрооборудование кабельного судна.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН

## РЕНТГЕНОТЕХНИКА

W. D. Coolidge, E. E. Charlton. *Прогресс в области рентгеновских трубок за пятьдесят лет со времени Рентгена и до наших дней. GER*, стр. 36—51, № 11, 1945.

За пятьдесят лет с момента открытия рентгеновских лучей рентгеновские трубки непрерывно совершенствовались от сравнительно примитивных типов и до мощных современных трубок со стабильными характеристиками, применяемых в разнообразнейших областях промышленности и медицины и пригодных для широкого диапазона напряжений и токов.

Соответственно с глубиной вакуума и характером разряда рентгеновские трубки разделяются на два класса: ионные рентгеновские трубки (у которых электроны эмитируются алюминиевым катодом под влиянием бомбардировки его положительными ионами) и электронные рентгеновские трубки (катод которых испускает электроны благодаря явлению термоэлектронной эмиссии, бомбардировке его другими электронами, либо вследствие автоэлектронной эмиссии).

В статье приводится описание различных типов ионных и электронных рентгеновских трубок и дается их сравнительная характеристика. Из современных типов трубок рассматриваются диагностические трубки с линейным фокусом и трубки с вращающимся анодом (рис. 1), терапевтические трубки для поверхностной (напряжение до 10 kV) и глубокой терапии (напряжение 200—400 kV), специальные секционированные трубки на 1—2 млн. V и трубки для структурного анализа металлов. Один из разделов посвящен вопросам защиты от рентгеновских лучей и высокого напряжения. В нем описываются некоторые конструкции безопасных трубок (рис. 2).

В последнем разделе кратко описывается трубка бетатрона, обладающая скоростью электронов, соответствующей напряжению 100 млн. V. Трубка бетатрона представляет собой тороид из стекла или какого-либо иного изоляционного материала, состоящий из 16 секций.

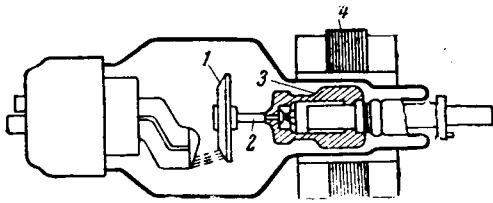


Рис. 1. Трубка с вращающимся анодом.

1—массивный вольфрамовый диск; 2—молибденовый стержень; 3—ротор; 4—статор.

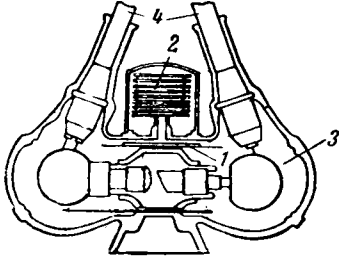


Рис. 2. Безопасная трубка с защитой от рентгеновских лучей и от высокого напряжения.

1—свинец; 2—силифон; 3—масло; 4—высоковольтный кабель.

Электроны, испускаемые раскаленным катодом, направляются напряжением в 20 000 V по касательной к оси трубки и далее разгоняются магнитным полем, совершая 25 000 оборотов за четверть периода ( $1/240$  sec) и увеличивая свою скорость с каждым оборотом на 400 V.

Инж. И. И. Заславский.

### Электротехнические материалы

Halvard Liander. Эмальпроводники. В сборнике *The Svedberg, 1884—1944. utd. Almqvist & Wiksells Bocktryckeri A. B., Uppsala (Швеция), стр. 320—343, 1944.*

Подробная статья посвящается одному из весьма важных видов обмоточных проводов — эмальпроводке. Описываются различные виды эмалей, применявшиеся на протяжении 40 лет существования производства эмальпроводки, включая как уже оставленные по тем или иным причинам типы эмалей, например ацетилцеллюлозную, так и новейшие типы. Отмечается обладающая весьма высокими механическими свойствами эмаль на основе син-

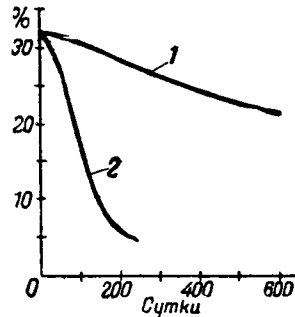


Рис. 1.

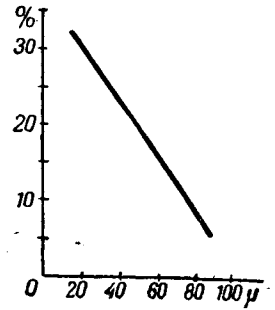


Рис. 2.

тетического термопластика найлона (ранее найлон применялся в электротехнике только в качестве волокнистого материала и пластмассы для формования фасонных изделий). Рассматриваются вопросы технологии эмалирования, методики испытания качества эмальпроводки, поведения эмалей в эксплуатации и пр.

Для наиболее распространенных в настоящее время эмалей на основе высыхающих масел (льняного и тунгового) скорость теплового старения значительно выше при работе в трансформаторном масле, чем при работе на воздухе. Это иллюстрируется рис. 1, дающим наибольшее удлинение в % (до разрыва пленки, т. е. до образования в ней трещин) при растяжении эмальпроводки с нормальной толщиной эмали и нормальной степенью запечки в функции времени теплового старения при температуре 90° C (кривая 1 — старение на воздухе, 2 — в масле). Более сильно запеченные эмали, а также пленки эмалей повышенной толщины стареют более быстро; особенно велико это различие при работе на воздухе. На рис. 2 дано наибольшее удлинение в % после 588 суток старения на воздухе при 90° C в функции полной толщины (в микронах) эмали на проволоке.

При хранении эмальпроводки на складе при нормальной температуре может наступить весьма быстрое (за несколько месяцев и даже недель) старение, если проволока подвергается действию света; напротив, в темноте эмальпроводка сохраняется значительно дольше — весьма важное практическое указание.

Исследования автора, проведенные в лаборатории фирмы ASEA в Västerås, подтверждают ранее делавшиеся выводы о высокой эластичности и стабильности по отношению к тепловому старению эмалей типа формекс.

Реферруемая статья снабжена указателем литературы (39 названий).

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ



### П О П Р А В К И

В статье проф. С. М. Брагина (Электричество, № 2, 1945):  
на стр. 16, в аннотации вторую фразу следует читать: „Исследуются распределение напряженности электрического поля по изоляции кабеля и влияние на это поле теплового поля“;  
на стр. 16 выражение для теоремы Гаусса должно иметь следующий вид:

$$\oint (\vec{A}E) d\vec{s} = \int \text{div} (\vec{A}E) d\omega;$$

в том же абзаце, стр. 16, после слов „... по поверхности“ следует читать: „... а в правой части — ток, протекающий через рассматриваемую поверхность“.

В реферате А. Д. Степанова, (Электричество, № 3, 1943):  
на стр. 94, левый столбец, 2-ую строку снизу следует читать: „... вследствие трения шин об очень сухой бетон или асфальт“.

В заметках Е. Я. Казовского: „По страницам технических журналов СИА“ (Электричество, № 4, 1946):  
на стр. 95, левый столбец, 18 строка, следует читать: „... толщиной до 300 мкм“;  
ниже, в том же абзаце, следует читать: „... развивают скорость, равную 96% от скорости света (288 тыс. км/сек)“.

# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

НА 1946 ГОД

НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

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

Основан в 1880 г. 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 „Электричество“

Физические и общетеоретические вопросы электричества  
и электротехники

Общие вопросы электроэнергетики

Электрические системы, станции, сети и передача электро-  
энергии на дальние расстояния

Электрические машины и трансформаторы

Электропривод и электрификация отраслей промыш-  
ленности

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; Хроника;  
Библиография; Рефераты (по иностранным техническим журналам)

**Подписная цена на год 96 руб.**

Подписка принимается в отделениях „Союзпечать“ и на почте

Подписку можно также направлять по адресу:

Москва, Шлюзовая набережная, 10—Госэнергоиздат.

При внесении годовой платы, хотя и не в начале года, подписчикам  
доставляются все вышедшие в 1946 г. номера журнала.