

ВОЛОГДА 321.12  
ОБЛ. БИБЛИОТЕКЕ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Вологодская областная универсальная научная библиотека

[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

1945

11

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Г. И. Атабеков</i> —Пути развития современной техники релейной защиты . . . . .	1
<i>И. А. Карякин</i> —Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угольными электродами . . . . .	9
<i>И. С. Брук</i> —О некоторых методах механического решения системы линейных алгебраических уравнений . . . . .	17
<i>И. М. Белаш</i> —Электрические модели для приближенного решения интегральных и интегродифференциальных уравнений . . . . .	23
<i>Л. И. Гутенмахер, Л. Г. Козан, И. Н. Попов</i> —Электромагнитные расчеты на интеграторе	26
<i>А. А. Пистолькорс</i> —Проблема высокочастотного транспорта . . . . .	30
<i>Ю. М. Галонен</i> —Электромобили . . . . .	35
<i>Е. М. Цейров</i> —Принципы гашения электрической дуги сжатым воздухом . . . . .	39
<i>М. Г. Чижкин</i> —Переходные процессы в квадратичной системе Леонарда . . . . .	44
<b>Хроника</b> . . . . .	49
<b>Рефераты</b> . . . . .	51

---

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Б. Е. Веденеев** (ответственный редактор), член-корр. АН СССР **А. И. Берг**, доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, 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. Товстопалов**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

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

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР  
И НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

## Пути развития современной техники релейной защиты<sup>1</sup>

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория НКЭС СССР

**Предотвращение неправильных действий защит при качаниях.** С появлением в начале тридцатых годов быстродействующих защит магистральных линий — реактансных и высокочастотных — вопрос предотвращения неправильных действий этих защит при качаниях разрастается постепенно в целую проблему.

Аналитическому изучению поведения защит при нарушениях устойчивости параллельной работы электрических систем положено начало в 1933 г. статьей Schimpf'a (ETZ). В 1933—1934 гг. теоретические и экспериментальные исследования проведены в лаборатории им. проф. Смурова. Последующие годы изобилуют целой серией работ советских и иностранных авторов: инж. Р. С. Зурабова (1934), доктора техн. наук, проф. Н. Н. Щедрина (1935), инж. А. Б. Барзама (1935), E. H. Bancker и E. M. Hunter (1934), C. R. Mason (1937) и др.

Одновременно с аналитическими исследованиями в СССР и за границей ведется разработка методов предотвращения неправильных действий защит при качаниях. К этому начальному периоду, в частности, относится появление первых блокировочных схем, основанных на одновременном действии при качаниях двух реле, имеющих разные установки (авторы — инж. О. В. Суслов<sup>2</sup> и инж. А. Б. Барзам<sup>3</sup>).

Тот же принцип несколько позднее (1937) с успехом применен французской фирмой CdC в реактансной защите RXAP и американской фирмой Westinghouse в высокочастотной защите HZ.

Последующие экспериментальные исследования, проведенные лабораторией «Теплоэлектропроекта», показали, что в целях ускорения действия такого

рода блокировок возможно применение реле с нормально замкнутыми контактами. При этом разница в уставках пусковых реле должна быть тем больше, чем меньше ожидается период качаний. При малых периодах качаний может потребоваться столь большая разница в уставках, что чувствительность защиты при коротких замыканиях окажется недопустимо низкой (особенно в случаях длинных линий). В частности, в защите HZ фирмы Westinghouse разница в уставках достигает 80%.

В 1935 г. за границей наряду с другими способами блокировки начинают применяться два важных принципа, а именно: 1) выведение защиты из действия через определенный промежуток времени с момента ее запуска (Германия) и 2) пуск защиты с помощью составляющих отрицательной последовательности (США и Германия).

Несколько позднее принцип запуска защиты токами отрицательной последовательности находит также применение в схеме деблокировки защиты RXAP фирмы CdC. При этом в противовес высказываниям на счет пригодности такого рода пуска только для несимметричных коротких замыканий в 1937 г. Roger Dubusc выдвигает идею о том, что даже и при трехфазном коротком замыкании можно рассчитывать на кратковременное появление составляющих отрицательной последовательности (вследствие неодновременности перекрытия всех трех фаз). Однако R. Dubusc не сделал следующего шага — в отношении объединения двух вышеупомянутых принципов, диктовавшегося самой логикой вещей.

Этот шаг был сделан в 1938 г. инж. А. Б. Барзамом, предложившим замыкать цепи быстродействующих защит на определенный промежуток времени с помощью реле, реагирующих на составляющие отрицательной последовательности<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Первая часть статьи помещена в № 9, 1945.

<sup>2</sup> Авторское свидетельство № 48718, 7 августа 1934.

<sup>3</sup> Зависимое авторское свидетельство № 48720, 9 марта 1935.

<sup>4</sup> Авторское свидетельство по заявке № 15997, 10 апреля 1938.

Большая доля заслуги в деле практического разрешения этого вопроса принадлежит системе Уралэнерго, которая первой эксплуатационно проверила возможность применения блокировок с помощью  $U_2$ . Опыт эксплуатации этих устройств, сказавшийся положительным, был вскоре распространен на другие энергосистемы Союза.

Теоретические исследования показали, что кратковременного появления напряжения на выходе фильтра отрицательной последовательности следует ожидать даже при одновременном замыкании всех трех фаз, так как оно обуславливается переходными процессами в фильтре в результате: а) полного исчезновения или частичного снижения напряжений и б) влияния аperiodических слагаемых напряжений в первичной цепи короткого замыкания.

Появляющиеся при этом на выходе фильтра напряжения затухают со временем, достаточным для срабатывания (кратковременного размыкания контактов) быстродействующих пусковых реле.

Общий недостаток, свойственный блокировкам с помощью  $U_2$ , заключается в невозможности быстрого выведения защиты из действия на тех участках сети, где вероятна каскадная работа защиты.

Некоторое осложнение вносит также то обстоятельство, что в момент отключения симметричного повреждения возможно кратковременное появление напряжения на выходе фильтра  $U_2$  из-за неодновременного размыкания контактов выключателя, либо вследствие переходных процессов, возникающих в фильтре при восстановлении напряжения в системе.

В 1939—1940 гг. автором совместно с инж. Я. М. Смородинским была разработана схема устройства<sup>5</sup>, действующего от реле, реагирующего на составляющую отрицательной последовательности или скорость изменения электрических величин, в которой повторный пуск защиты в момент отключения короткого замыкания предотвращен посредством замедленной деблокировки. Практическое выполнение блокировок с  $U_2$  облегчено применением фильтра Я. М. Смородинского, построенного на двух емкостях и двух активных сопротивлений<sup>6</sup>.

В вопросе предотвращения неправильных действий защит при качаниях американская техника избрала другие пути. Она пошла в основном по линии использования неодновременного действия смметров второй и третьей зон (HZ Westinghouse), а также по линии блокировки с помощью токов высокой частоты в зависимости от поведения органов направления энергии при перемещении электрического центра качания (GMB GEC).

В 1943 г. Американским институтом инженеров электриков был проведен специальный опрос 16 энергосистем США, выявивший следующие точки зрения и основные тенденции эксплуатирующих организаций [Л. 1] в вопросе действия защит при качаниях.

1. Применение блокирующих устройств целесообразно во всех точках за исключением тех, где при выпадении из синхронизма параллельно рабо-

тающих станций желательны разделение системы (точки раздела нагрузок). В случае если четкое действие защиты в точках деления при асинхронном ходе не обеспечивается, то необходима установка специальных делительных устройств.

2. Вопрос о том, должна ли блокировка защит при качаниях представлять собой отдельное устройство или составную часть самой защиты, является спорным. Отмечается целесообразность в ряде случаев раздельного исполнения блокирующих устройств и защиты.

3. Констатируется необходимость дальнейшего изучения целого ряда вопросов, связанных с работой защиты при затянувшихся коротких замыканиях (сопровожаемых качаниями), несинхронном включении линии, качаниях в системах с длинными линиями и т. д.

В наших условиях к этим вопросам добавляется еще необходимость изучения быстроты чередования повреждений при грозах (важной с точки зрения блокировки с  $U_2$ ), а также разработка типовых схем делительных устройств.

**Создание новых малорелейных защит.** Проблема создания малорелейных, т. е. упрощенных, но вместе с тем полноценных защит, удовлетворяющих современным требованиям в отношении быстроты действия, чувствительности и селективности — актуальная с точки зрения эксплуатации и экономии дефицитного оборудования — назрела еще перед началом второй мировой войны. *Переход к малорелейным защитам, обладающим повышенными техническими качествами, возможен только на основе пересмотра старых методов и теоретической разработки и практического применения новых принципов и устройств.*

Создание упрощенных и малорелейных защит, удовлетворяющих современным требованиям, мыслится в электрических системах на основе:

1) построения защит на фильтрах фазовых последовательностей; 2) ускорения действия защит в целях использования существования составляющих отрицательной последовательности перед наступлением режима симметричного трехфазного короткого замыкания; 3) замены трехсистемного выполнения защит односистемным; 4) широкого использования электроники и т. д.

Эти методы в одинаковой мере применимы как для дистанционных, так и для высокочастотных защит.

Следует отметить, что в связи с внедрением токов высокой частоты дистанционные защиты на ближайшее время сохраняют за собой преимущественно функции резервной защиты высоковольтных магистралей и сборных шин.

Что касается распределительных сетей средних напряжений, то ввиду относительной дешевизны дистанционных защит (по сравнению с высокочастотными) они сохраняют здесь за собой функции основной защиты линий и шин.

В результате перехода на односистемное выполнение удается получить защиты в техническом отношении равноценные, а в ряде случаев — более совершенные, чем трехфазные.

В 1940 и 1941 гг. на страницах журнала «Электричество» нами неоднократно освещались новые методы упрощения дистанционных защит импе-

<sup>5</sup> Авторское свидетельство по заявке № 4С817.

<sup>6</sup> Авторское свидетельство № 65003.

ного и реактансного типов [Л. 2, 3, 4], нашед- за годы Отечественной войны практическое применение в некоторых системах Союза. Различные разновидности упрощенных дистанци-ных защит, обеспечивающих правильный за- омметров, могут быть разделены на две гории:

1) с питанием токовых обмоток омметра со- ляющими всех трех последовательностей ана- гично трехфазной схеме (разностью токов или с овой компенсацией), с переключениями в цепях ка;

2) с питанием токовых обмоток омметра только твляющими нулевой или отрицательной по- довательности.

Не останавливаясь подробно на рассмотрении ем первой категории<sup>7</sup>, мы заметим лишь, что еющийся трехгодичный опыт эксплуатации под- ердил их жизнеспособность.

К числу их основных преимуществ (в случае иенения реле реактансного типа) относятся:

а) возможность обеспечения реактансной за- той большего количества участков, чем при трех- стемном выполнении; б) исключение возможности правильного действия реактансного реле в от- гающей фазе при замыканиях между двумя фаза- и; в) уменьшение вероятности неправильных дей- твий при несимметричных трехфазных, а также и двухфазных замыканиях на землю (ввиду на- ния одного омметра); г) обеспечение простым особом фиксации вида повреждения.

Целесообразность применения подобных схем ттверждается также заграничным опытом. В естности, фирма GEC в последние годы стала вы- скарать именно односистемные реактансные защи- ты с переключением в главных токовых цепях.

Значительный интерес в этом отношении пред- ставляет работа Audlin и Warrington'a, опублико- анная в 1943 г. [Л. 5]. Упомянув о причинах, тор- озящих в США применение односистемных схем е переключением токовых цепей (несовершенство ервоначальных схем с точки зрения замеров и ыстроты действия), авторы указывают, что со- анные в настоящее время односистемные реак- ансные защиты (с реле GCX) имеют время дей- вия (в I ступени) не более 0,08 сек и благодаря авильному замеру омметра применимы во всех лучаях, когда по условиям устойчивости системы время 0,08 сек достаточно.

Мы не будем останавливаться здесь на рас- отрении этих схем, заметим лишь, что с точки рения простоты и некоторых других особенностей ли схемы, по нашему мнению, уступают описан- ным ранее [Л. 3].

Заслуживают внимания данные, приводимые мериканскими авторами в отношении работы ереключающих реле. Отмечается, что переключе- ния в цепях тока, вообще говоря, не являются енее надежными, чем в цепях напряжения или остоянного тока, так как изолирующие пленки, образующиеся на контактах с течением времени, егче пробиваются вторичным напряжением транс- форматоров тока, чем трансформаторов напряже- ний. По мнению авторов, при одинаковых разме- рах контактов, поверхностях касания и давлениях,

переключения в цепях тока не только не пред- ставляют меньшей надежности, но наоборот, тре- буют меньшего надзора, чем в цепях напряжений.

После 5 000 переключений в цепях тока (при 100 А, длительностью каждый раз 3 sec) контакты найдены в исправном состоянии. Только после 500 переключений контактов, специально отрегулиру- ванных без точек соприкосновения, контакты ока- зались несколько поврежденными, хотя и продол- жали работать. Наконец, после введения специ- ального воздушного зазора между контактами (0,8 мм) стало наблюдаться обгорание контак- тов, без особого, впрочем, для них ущерба.

Эти данные, приводимые авторитетными специ- алистами США, являются поучительными для не- которых скептиков, еще недоверчиво относящихся к односистемным схемам.

Переходя к рассмотрению защит второй кате- гории (на фильтрах нулевой или отрицательной последовательности), следует отметить, что разра- ботка их была предпринята не столько ради упро- щения схем, сколько в целях коренного улучшения замеров при двухстороннем питании и переходных со- противлениях. Возможность искажения замеров под влиянием переходных сопротивлений известна еще со времени выхода в свет классической рабо- ты W. A. Lewis и L. S. Tippet (1931), однако, почти во всех исследованиях до 1940 г. этот во- прос рассматривался преимущественно с каче- ственной стороны.

Когда в 1940 г. Н. Gutmann привел на страни- цах ETZ [Л. 6] количественную оценку погрешно- стей, то результат, полученный им, превзошел вся- кие ожидания. Стала очевидной большая вероят- ность неправильных действий реактансных защит в условиях расхождения по фазе токов, подтекаю- щих с двух сторон к переходному сопротивлению в месте повреждения.

В 1940 г. автором была разработана новая ди- станционная защита от замыканий на землю<sup>8</sup> при помощи реле направления синусного типа, вклю- ченного на ток нулевой последовательности  $I_p = 3I_0$  и на напряжение:

$$\dot{U}_p = \dot{U} - \left( I + \frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{3\dot{Z}_1} 3I_0 \right) \dot{Z}'_1, \quad (1)$$

где  $\dot{U}$ ,  $I$  — фазные напряжения и ток поврежден- ной фазы в месте установки защиты;  $I_0$  — состав- ляющая токов нулевой последовательности в мес- те установки защиты;  $\dot{Z}'_1$  — полное сопротивле- ние положительной последовательности защищае- мой зоны;  $\dot{Z}_1$ ,  $\dot{Z}_0$  — полные сопротивления поло- жительной и нулевой последовательностей участ- ка от места установки защиты до точки коротко- го замыкания.

Выражение (1) преобразуется при однофазном замыкании в нижеследующее:

$$\dot{U}_p = (\dot{I} + k3I_0)(\dot{Z}_1 - \dot{Z}'_1) + 3I_{ок} \cdot R,$$

где  $I_{ок}$  — составляющая токов нулевой последо- вательности в месте короткого замыкания;  $R$  — пере- ходное сопротивление;  $k = \frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{3\dot{Z}_1}$ .

<sup>7</sup> Авторское свидетельство № 63590 на имя Г. И. Атабе- кова и Я. М. Смородинского.

<sup>8</sup> Авторское свидетельство по заявке № 301926.

Поскольку ток  $I_p = 3I_0$  и падение напряжения в переходном сопротивлении  $3I_{ок} \cdot R$  близко совпадают по фазе, знак момента реле типа  $U_p I_p \sin \varphi_p$  определяется знаком выражения  $(Z_1 - Z'_1)$ ; при повреждениях в защищаемой зоне момент отрицателен, так как  $Z'_1 > Z_1$ , а при замыканиях вне зоны (в том же направлении — от шин в сторону линии) положителен, так как  $Z'_1 < Z_1$ . Таким образом действие синусного реле всецело определяется удаленностью места повреждения и не зависит от переходного сопротивления (при близком совпадении фаз  $I_0$  и  $I_{ок}$ ).

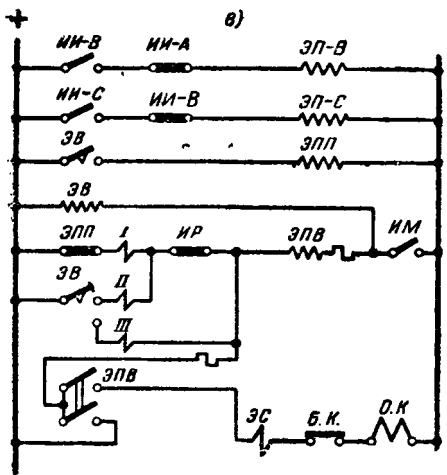
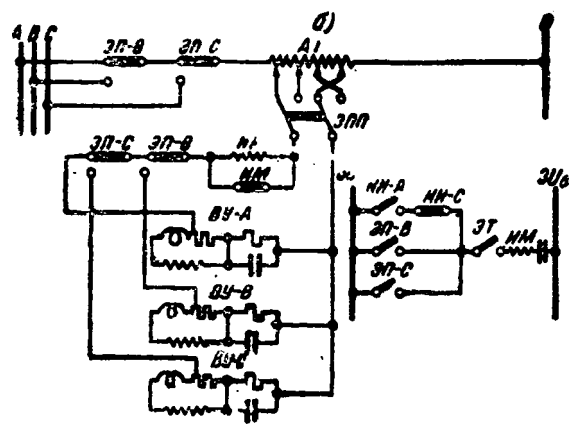
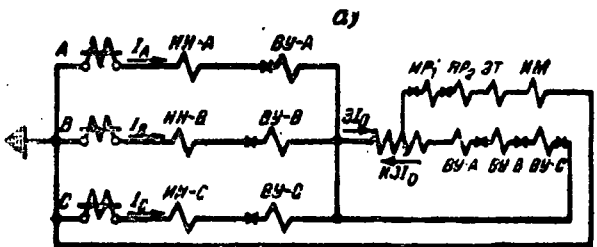


Рис. 1. Дистанционная защита от однофазных и двухфазных замыканий на землю на фильтре токов нулевой последовательности.

а—цепи токов; б—цепи напряжений; в—цепи постоянного тока.

На рис. 1 (а, б, в) изображены схемы цепей постоянного и переменного тока защиты, основанной на описанном принципе<sup>9</sup>. В качестве синусного реле использован омметр ИР-105, а в качестве

твёрдые пусковые органы ИИ-111 (в фазах А и В) реле минимального импеданса ИР-105 (в фазе В). Защита действует при однофазном и двухфазном замыкании на землю.

Дальнейшее упрощение схемы может быть достигнуто путем перевода измерительного органа питания от  $3I_0$  на питание от  $3U_0$ . В этом случае отпадает необходимость применения отдельного органа направления энергии (ИМ-148).

Принцип компенсации полного падения напряжения от места установки реле до конца защищаемой зоны, положенный в основу вышеописанной защиты, может быть также использован для защиты от замыканий между двумя фазами<sup>10</sup>, например фаз В и С.

Для этого к синусному реле должны быть введены ток  $I_p = jI_2$  и напряжение

$$U_p = \dot{U}_{BC} - (I_B - I_C) Z'_1 = j\sqrt{3} [(I_2 - I_1)(Z_1 - Z'_1) + I_{2к} \cdot R];$$

Близкое совпадение по фазе токов  $I_2$  (протекющего в синусном реле) и  $I_{2к}$  (в переходном сопротивлении  $R$ ) исключает влияние на работу защиты переходного сопротивления (дуги) в месте повреждения. Однако при неблагоприятных фазовых соотношениях между  $I_2$  и  $I_1$  (например, при качаниях или большой односторонней нагрузке) знак момента синусного реле может быть искажен из-за счет множителя  $(I_2 - I_1)$ , входящего в (2).

В процессе развития дистанционного принципа делались попытки создания многофазных омметров, обеспечивающих правильное действие при различных комбинациях переходных сопротивлений. В отличие от устройства, описанного в книге М. Schleicher'a (1936) и использующего схему Ареса для защиты от замыканий между фазами, вид В. Л. Фабрикантом был предложен в 1939 г. способ замера сопротивлений при всех видах повреждений с помощью оригинального трехфазного омметра<sup>11</sup>. Многофазные омметры не нашли пока применения ввиду относительной конструктивной сложности и недостаточной изученности вопроса (особенно при двухстороннем питании).

Новая полоса в развитии малорелейных защит начинается с появлением фильтровых дифференциально-фазовых и направленных высокочастотных защит. Работа по созданию дифференциально-фазовых защит, сравнивающих при помощи высокой частоты фазу промышленного тока по концам линии (в развитие идей Фитцджералда), в Советском Союзе начата в 1940 г. инженерами Е. А. Карповичем, А. И. Плешко, К. В. Шумяцким и Г. В. Микучкиным [Л. 7, 8]. В 1941 г. заводом ХЭМЗ выпущен первый комплект такой защиты (КРЗ-151) находящийся в настоящее время в Центральной научно-исследовательской электротехнической лаборатории НКЭС на испытании.

В 1944 г. получены сведения из США [Л. 9, 10] о промышленном освоении дифференциально-фазовой защиты НКВ Westinghouse и установке ее в эксплуатацию. Американские схемы описаны в рефератах журнала "Электричество", № 9, 1945.

<sup>9</sup> Схема испытана в лаборатории «Теплоэлектропроекта» инж. И. Н. Поповым, принимавшим также участие в ее практическом осуществлении.

<sup>10</sup> Заявочное свидетельство № 384977 на имя А. М. Бреслера.

<sup>11</sup> Заявочное свидетельство № 26429.

Но нашему мнению, существенным недостатком в схем является низкая чувствительность пусковых органов при замыканиях между двумя фазами особенно в защите НКВ, где пусковые органы включены на ток  $I_1 + ki_0$ .

Дифференциально-фазовым защитам, основанным, в сравнении фаз токов  $I_1 + ki_0$ , свойственны два недостатка:

1. При коротких замыканиях, сопровождаемых выключением на землю, распределение токов положительной и нулевой последовательности может быть таково, что на одном из концов поврежденного участка будет превалировать ток  $I_1$ , а на другой — ток  $ki_0$ . Фазовый сдвиг между токами, наблюдаемыми по концам линии, может при таких условиях варьировать в самых широких пределах и защита может в некоторых случаях не действовать.

2. Дифференциально-фазовым защитам свойственно при определенных условиях отказывать в действии в случае обрыва фазы с односторонним замыканием на землю [Л. 11]. Объясняется это тем, что продольно-действующие симметричные составляющие э. д. с. (в месте обрыва) обуславливают протекание вдоль поврежденного участка дополнительных токов соответствующих последовательностей, искажающих при известных соотношениях параметров системы фазу результирующих токов той или иной последовательности.

В тех случаях, когда пусковой орган защиты со стороны обрыва в действие не приходит, указанный недостаток, естественно, отпадает (линия отключается с заземленного конца).

Дифференциально-фазовый принцип подкупает своей простотой и нереагированием на качания. Поэтому, повидимому, предстоит занять важное место в релейной технике по мере накопления опыта.

Что касается направленной высокочастотной защиты, то имеющийся многолетний опыт эксплуатации этой защиты свидетельствует о том, что на сегодняшний день она является основным видом защиты высоковольтных магистралей. Разработка направленных высокочастотных защит в Советском Союзе начата в 1933 г. (ЛЭТИ — Уралэнерго). В настоящее время в ряде энергосистем Союза находится в эксплуатации значительное количество комплектов высокочастотных защит, преимущественно импортных.

В 1941 г. автором совместно с инж. Я. М. Смоляковским была начата разработка новой фильтровой направленной защиты с высокочастотной блокировкой и дистанционным пуском передатчика<sup>13</sup>, могущей по конструктивной простоте своей и малорелейности конкурировать с дифференциально-фазовыми защитами и имеющей преимущества перед существующими направленными высокочастотными защитами в отношении чувствительности и простоты. Описание этой защиты будет дано отдельно.

**Защита сверхдлинных линий.** В США находятся в эксплуатации две сверхдлинные магистрали: Порт Пек — Рейнбау (478 км, 161 kV) и Канзас — Небраска (432 км, 154 kV).

Релейная защита первой из них выполнена фирмой Westinghouse, второй — GEC. К защите предъявлены следующие требования:

<sup>13</sup> Авторское свидетельство по заявкам № 307036 и № 330125.

1. Быстрое отключение коротких замыканий (металлических и с переходными сопротивлениями) в пределах всей длины линии.

2. Действие защиты с выдержкой времени при замыканиях в пределах зоны резервирования.

3. Действие защиты при качаниях, угрожающих потерей синхронизма.

4. Нереагирование на перегрузки в пределах статической устойчивости.

5. Нереагирование на качания в пределах динамической устойчивости (ориентировочно до величины угла  $\theta$  расхождения между векторами э. д. с. менее  $110^\circ$ ).

В отношении защиты линии Канзас — Небраска поставлены еще дополнительные условия:

6. Применение высокочастотной телеблокировки (на случай внешних повреждений).

7. Быстродействующее автоматическое повторное включение (в случае, если действие защиты обусловлено коротким замыканием, а не качанием).

Характерной особенностью схемы коммутации этих линий является отсутствие выключателей на высокой стороне концевых трансформаторов. Взамен них установлены разъединители — линейные (перед трансформаторами) и заземляющие.

В случае повреждения трансформатора одновременно с отключением масляного выключателя на низкой стороне автоматически включается на высокой стороне заземляющий разъединитель и отключается разъединитель трансформатора. Линия переводится таким образом в режим трехфазного короткого замыкания и отключается от линейной защиты с противоположного конца (действием на выключатель трансформатора на низкой стороне).

В основу проектирования защиты положены анализы работы длинных линий, имеющих целью выявить специфические особенности аварийных режимов [Л. 12]. Ввиду некоторой громоздкости этих анализов ниже дано более простое, при той же строгости, изложение общих принципов проектирования защиты сверхдлинных линий.

Рассматривая линию вместе с трансформаторами в качестве четырехполюсника, имеем:

$$\dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \quad (3)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \quad (4)$$

где  $\dot{U}_1, \dot{I}_1$  — напряжения и токи на входе четырехполюсника;

$\dot{U}_2, \dot{I}_2$  — то же на выходе,  $A, B, C, D$  — параметры Брейзига.

Проектирование защиты удобно вести на основе графоаналитического исследования входного сопротивления  $\dot{Z}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$  (для различных режимов),

поскольку поведение отдельных типов реле может быть графически представлено в той же комплексной плоскости, что и  $\dot{Z}_1$ .

В данном случае нас могут интересовать значения  $\dot{Z}_1$  в функции от сопротивлений  $Z = \frac{U_2}{I_2}$  на выходе четырехполюсника, т. е.  $\dot{Z}_1 = f(Z)$ , либо от угла  $\theta$  и отношения  $\frac{U_2}{U_1}$ , т. е.  $\dot{Z}_1 = F(\theta, \frac{U_2}{U_1})$ .

Первое выражение, исходя из (3) и (4), имеет вид:

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{A}\dot{Z} + \dot{B}}{\dot{C}\dot{Z} + \dot{D}} \quad (5)$$

Выражение (5) может быть преобразовано следующим образом:

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{A}}{\dot{C}} + \frac{\dot{B} - \frac{\dot{A}\dot{D}}{\dot{C}}}{\dot{D} + \dot{C}\dot{Z}}$$

и так как  $\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1$ ,

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{A}}{\dot{C}} - \frac{1}{\dot{C}\dot{D}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\dot{C}}{\dot{D}}\dot{Z}} \quad (6)$$

Если изменять только модуль вектора  $\dot{Z}$ , то согласно теории геометрических мест конец вектора  $\dot{Z}_1$  будет описывать окружность. На рис. 2 изображена

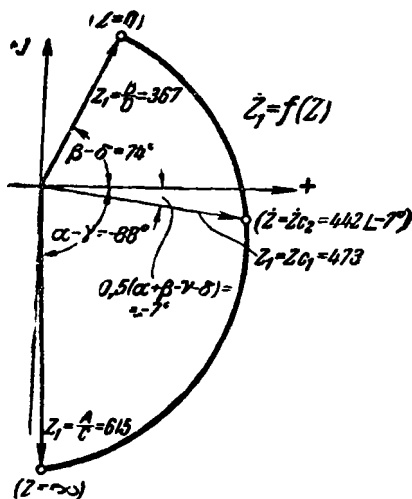


Рис. 2. Круговая диаграмма входного сопротивления линии в зависимости от величины нагрузки  $Z$  на приемном конце [формула (6)].

круговая диаграмма  $\dot{Z}_1 = f(Z)$  при  $\dot{Z} = Z \angle -7^\circ$  и  $Z = \text{var}$ , применительно к параметрам системы Канзас — Небраска [Л. 12]:  $\dot{A} = A \angle \alpha = 0,824 \angle 3^\circ$ ,  $\dot{B} = B \angle \beta = 282 \angle 77^\circ$ ,  $\dot{C} = C \angle \gamma = 1,34 \cdot 10^{-3} \angle 91^\circ$ ,  $\dot{D} = D \angle \delta = 0,769 \angle 3^\circ$ .

На диаграмме показаны векторы  $\dot{Z}_1 = \frac{\dot{B}}{\dot{D}} = 367 \angle 74^\circ$ , соответствующий режиму короткого замыкания в Небраске ( $Z=0$ ),  $\dot{Z}_1 = \frac{\dot{A}}{\dot{C}} = 615 \angle -88^\circ$ , соответствующий холостому ходу ( $Z=\infty$ ) и  $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_{c1} = \sqrt{\frac{\dot{A}\dot{B}}{\dot{C}\dot{D}}} = 473 \angle -7^\circ$  при нагрузке, равной  $\dot{Z} = \dot{Z}_{c2} = \sqrt{\frac{\dot{B}\dot{D}}{\dot{A}\dot{C}}} = 442 \angle -7^\circ$  (где  $\dot{Z}_{c1}$  и  $\dot{Z}_{c2}$  — характеристические сопротивления данного несимметричного четырехполюсника).

Графическая зависимость  $\dot{Z}_1 = F(\theta, \frac{U_2}{U_1})$  проще всего может быть получена путем инверсии кривой

$$\frac{1}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{C}\dot{U}_2 + \dot{D}}{\dot{U}_1} \frac{\dot{U}_1 - \dot{A}\dot{U}_2}{\dot{B}}$$

или, что то же,

$$\frac{1}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{D}}{\dot{B}} - \frac{1}{\dot{B}} \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{D}}{\dot{B}} \left[ 1 + \frac{1}{\dot{D}} \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \angle 180^\circ - (\theta + \delta) \right]. \quad (7)$$

Как видно из (7), геометрическим местом концов векторов  $\frac{1}{\dot{Z}_1}$  при  $\theta = \text{var}$  служит семейство коцентрических окружностей, центр которых расположен на конце вектора  $\frac{\dot{D}}{\dot{B}}$  (рис. 3). При  $\frac{U_2}{DU_1} =$

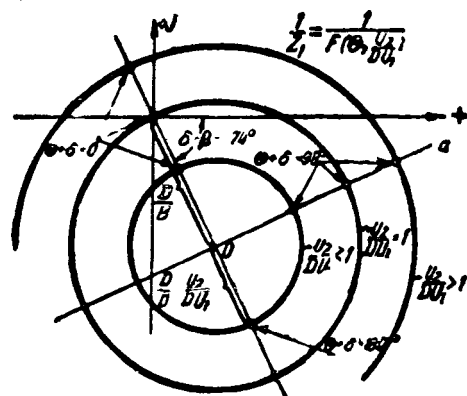


Рис. 3. Круговые диаграммы входных проводимостей линии в зависимости от угла  $\theta$ , для разных соотношений  $\frac{U_2}{DU_1}$  [формула (7)].

окружность проходит через начало координат, при  $\frac{U_2}{DU_1} < 1$  начало координат остается за пределом круга<sup>13</sup>.

Методом инверсии круговых диаграмм (рис. 3) получаем круговые диаграммы  $\dot{Z}_1 = F(\theta, \frac{U_2}{DU_1})$ , из-

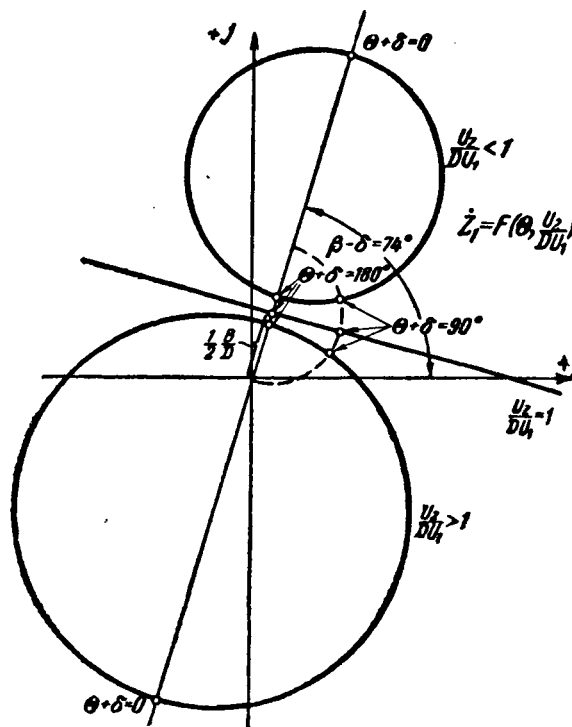


Рис. 4. Круговая диаграмма входных сопротивлений линии в зависимости от угла  $\theta$  для разных соотношений  $\frac{U_2}{DU_1}$ .

<sup>13</sup> Те же круговые диаграммы (в соответствующем масштабе) применимы для токов  $\dot{I}_1$  и мощностей  $\dot{P}_1$ .



раженные на рис. 4. Задаваясь предельными значениями<sup>14</sup> угла  $\theta$  и имея в виду положение вектора  $\dot{Z}_1 = \frac{\dot{B}}{D}$ , соответствующего короткому замыканию (металлическому и через дугу)<sup>15</sup>, можно на рис. 4 установить зону (расположенную преимущественно в первом квадранте), при нахождении в пределах которой вектора  $\dot{Z}_1$  защита должна действовать.

Задача проектирования защиты сводится теперь к использованию такой комбинации реле, чтобы результирующая характеристика защиты, вычерченная в комплексной плоскости рис. 4, полностью охватывала указанную выше зону.

На рис. 5 изображены характеристики отдельных типов реле (заштрихованные площади соответствуют зонам действия), а именно:

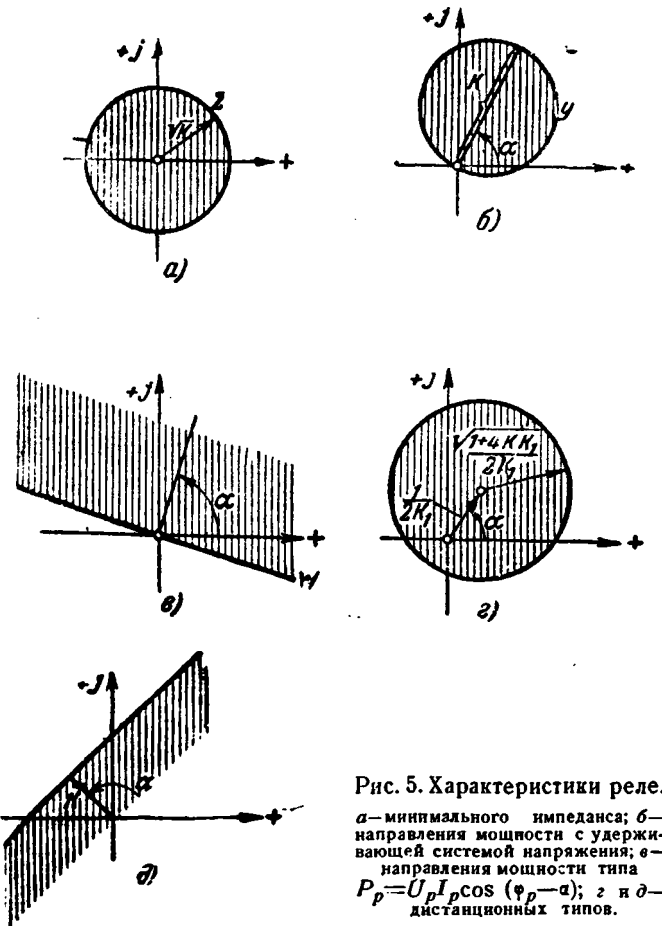


Рис. 5. Характеристики реле. а — минимального импеданса; б — направления мощности с удерживающей системой напряжения; в — направления мощности типа  $P_p = U_p I_p \cos(\varphi_p - \alpha)$ ; г — дистанционных типов.

1. Реле минимального импеданса (рис. 5а). Уравнение равновесия:  $kI^2 = U^2$  или  $Z = \frac{U}{I} = \sqrt{k}$ . Характеристика — окружность радиуса  $\sqrt{k}$  с центром в начале координат.

2. Реле направления с удерживающей системой напряжения (рис. 5б). Уравнение равновесия:  $U^2 = kUI \cos(\varphi - \alpha)$ , откуда  $Z = k \cos(\varphi - \alpha)$ . Харак-

<sup>14</sup> Точки, соответствующие определенному значению  $\theta + \delta$ , располагаются на рис. 4 по окружности, представляющей инверсию соответствующей прямой рис. 3. Например, при  $\theta + \delta = 90^\circ$  окружность (показанная на рис. 4 пунктиром) получается в результате обращения прямой  $Oa$  рис. 3 и т. д.

<sup>15</sup> При проектировании защиты линии Канзас—Небраска сопротивление дуги учитывалось (на основе приближенных расчетов) в размере 50—70  $\Omega$  на ближнем конце и 100—150  $\Omega$  на дальнем конце.

теристика — окружность диаметра  $k$ , проходящая через начало координат.

3. Реле направления мощности (рис. 5в). Уравнение равновесия:  $UI \cos(\varphi - \alpha) = 0$ , откуда  $Z \cos(\varphi - \alpha) = 0$ .

Характеристика — прямая, образующая с положительным направлением оси действительных величин угол  $90 + \alpha$ .

4. Реле дистанционное общего типа (рис. 5г и д). Уравнение равновесия:  $kI^2 - k_1 U^2 + UI \cos(\varphi - \alpha) = 0$ , откуда  $\frac{k}{k_1} Z^2 + \frac{Z \cos(\varphi - \alpha)}{k_1} = 0$ .

Характеристика — окружность с центром на расстоянии  $\frac{1}{2k_1}$  от начала координат и радиусом  $\frac{\sqrt{1+4kk_1}}{2k_1}$  (рис. 5г).

В случае  $k_1 = 0$  и перемены знака момента токовой системы уравнение равновесия принимает вид:  $-kI^2 + UI \cos(\varphi - \alpha) = 0$ , откуда  $k = Z \cos(\varphi - \alpha)$ . Характеристика — прямая на расстоянии  $k$  от начала координат (рис. 5д).

На рис. 6—9 представлены возможные варианты защит, использующих характеристики соответствующих элементов [Л. 13, 14, 15].

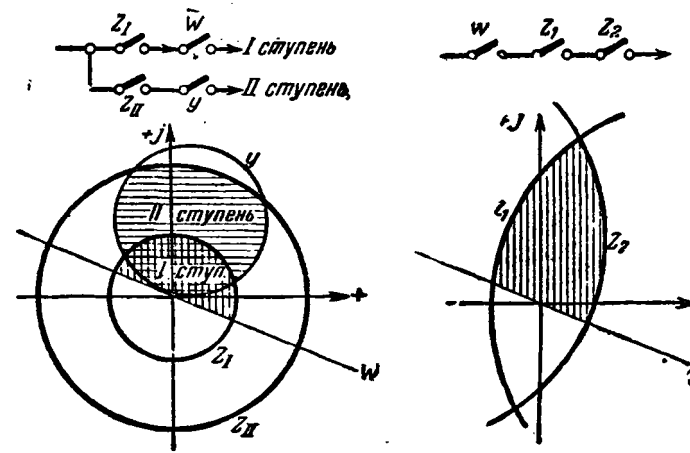


Рис. 6. Двухступенчатая защита с применением двух реле минимального импеданса, реле направления мощности с удерживающей системой напряжения и органа направления типа  $P_p = U_p I_p \cos(\varphi_p - \alpha)$ .

Рис. 7. Защита с применением двух дистанционных реле и органа направления мощности.

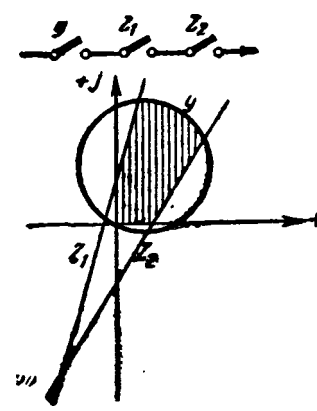


Рис. 8. Защита с применением двух дистанционных реле и реле направления мощности с удерживающей системой напряжения.

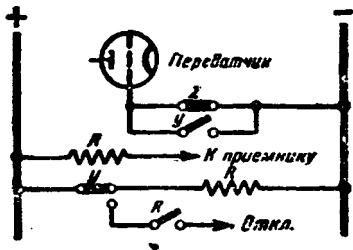
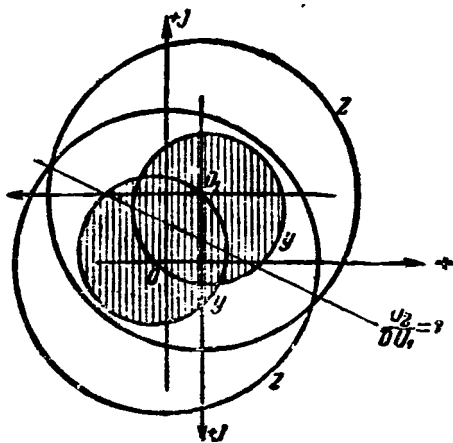


Рис. 9. Высокочастотная защита с применением пускового органа минимального импеданса и реле направления мощности с удерживающей системой напряжения.

разработке специальных конструкций трансформаторов тока (с увеличенным размером сердечника с воздушным зазором и, наконец, вовсе без железа [Л. 17]) и к конструированию новых типов релейной защиты.

**Заключение.** Релейная техника — одна из молодых отраслей электротехники. В процессе ее развития теория и практика находятся в тесном контакте и перед коллективом специалистов-релейщиков непрерывно встают все новые и новые задачи.

Развитие современной техники релейной защиты идет по пути комплексного разрешения вопросов защиты, автоматики и коммутации электрических систем. При этом повышение быстроты действия и чувствительности составляет в настоящее время основное содержание работ в области релейной защиты.

Общий прогресс техники релейной защиты и достижения в отношении быстродействия и чувствительности обеспечиваются неуклонным совершенствованием методов защит, созданием новых конструкций и изучением явлений, происходящих в цепях защит. Среди новых проблем релейной техники важное место занимают вопросы дальнейшего внедрения электроники и высоко-частотной техники в релейную защиту и автоматику энергосистем.

Наряду с этим повышение качества и коренное упрощение защит за счет широкого использования фильтров фазовых последовательностей, применение различного рода вентильных устройств и разработка новых принципов защит, гармонически увязанных с конструкциями самих реле — все это составляет условия дальнейшего прогресса и совершенствования современной техники релейной защиты.

Коллектив релейщиков Советского Союза, вносящий свой вклад в дело развития релейной техники, стоит в настоящее время перед необходимостью срочного разрешения многих новых проблем, тесно переплетающихся с аппаратостроением и системной автоматикой.

*Своевременное и правильное разрешение этих задач возможно только при условии создания в СССР специального релейного завода и хорошо оснащенного экспериментально-исследовательского центра.*

#### Литература

1. Interim Report on Application and Operation of Out-of-Step Protection (AIEE Relay Subcommittee), El. Eng., p. 567—573, № 9, 1943.
2. Г. И. Атабеков. Однорелейные схемы дистанционной защиты. Электричество, стр. 39—43, № 4, 1940.
3. Г. И. Атабеков и Я. М. Смородинский. Новые способы включения омметров и упрощения дистанционной защиты. Электричество, стр. 42—46, № 5, 1941.
4. Г. И. Атабеков. Упрощенная защита дистанционного типа от замыканий на землю. Электричество, стр. 49—51, № 4, 1940.
5. L. J. Audlin A. R. van C. Warrington. Distance Relay Protection for Subtransmission Lines Made Economical, p. 574—578, 9, 1943.
6. H. Gutmann. Verhalten von Reaktanzrelais bei zweiseitig gespeisten Kurzschlüssen, ETZ, S. 541—544, № 24, Juni 1940.
7. Материалы к совещанию по высокочастотной связи и высокочастотной защите, стр. 39—48, 1941.
8. А. П. Плешко. Новые системы защиты. Вестник электропромышленности, стр. 46—48, № 9, 1940.
9. T. R. Halman, S. L. Goldsborough, H. W. Lesper, A. E. Dromp. A New-Carrier Relaying System, p. 538—572, № 8, 1944 (реферат, Электричество, № 9, 1945).

К концу 1944 г. фирма ГЕС освоила выпуск дистанционных реле балансного типа, допускающих регулировку и перемещение характеристики в весьма широких пределах и не имеющих мертвой зоны [Л. 16]. Эти реле облегчают подбор характеристики защиты длинных линий.

В американской литературе приводятся интересные результаты испытаний защиты линий Канзас — Небраска, сопровождавшихся 22 искусственными короткими замыканиями с последующим автоматическим повторным включением (без проверки синхронизма). При этом имели место два случая нарушения устойчивости (в одном из которых защита действовала замедленно из-за вибрации контактов земляного реле). Во всех остальных случаях, спустя примерно 0,4 сек, работа линии восстанавливалась.

Нами была затронута только часть научно-производственных проблем современной релейной техники, далеко не исчерпывающая также исследовательской тематики по защите линий, которой было уделено преимущественное внимание. Здесь остается еще множество неразрешенных задач. В частности, на сегодняшний день не найден полноценный метод отстройки быстродействующих защит от работы разрядников. На очереди стоят вопросы конструктивной разработки и промышленного освоения новейших быстродействующих реле, вопросы разработки защит при пофазных отключениях.

Поле деятельности открыто также перед исследователями в области быстродействующих дифференциальных защит генераторов, трансформаторов и шин, связанных с изучением переходных процессов в цепях защит. Намечившиеся за годы войны тенденции в этой области сводятся в основном к

10. Logan. Fault Current Polarities Compared by Carrier. World, April 15, 1944 (реферат, Электричество, № 9, 1945).  
 11. Г. И. Атабеков. Фазовые соотношения при обрыве фазы с односторонним замыканием на землю „Теплопроект“, 1941.  
 12. F. C. Poage, C. A. Stiefus, D. M. MacGregor, E. George. Performance Requirements for Relay on Unusual Long Transmission Lines. El. Eng., p. 275—283, № 6, 1943.  
 13. A. R. van C. Warrington. Protective Relaying Long Transmission Lines. El. Eng., p. 261—268, № 6, 1943.

14. R. E. Cordray, A. R. van C. Warrington. The MHO Carrier Relaying Scheme. El. Eng., p. 228—235, № 5, 1944.  
 15. E. Floor, H. N. Muller, S. L. Goldsborough. Transmission and Relaying Problems on the Fort Peck Project. El. Eng., p. 209—214, № 5, 1944.  
 16. S. L. Goldsborough. A Distance Relay With Adjustable Phase—Angle Discrimination, p. 241—248, № 5, 1942.  
 17. E. L. Harder, E. H. Klemmer, W. K. Sonnemann, E. C. Wentz. Linear Couplers for Bus Protection. El. Eng., p. 241—248, № 5, 1942.

## Эффект высокой интенсивности в вольтовой дуге постоянного тока между угольными электродами

Доктор техн. наук, проф. Н. А. КАРЯКИН

Всесоюзный электротехнический институт

*Первая статья данной серии помещена в журнале „Электричество“, № 8, 1945 г. В настоящей второй статье обосновывается метод исследования дуги высокой интенсивности с помощью характеристических кривых. Путем анализа указанных кривых выявляются показатели развития эффекта высокой интенсивности и устанавливается стадийность этого развития. Исследуется зависимость развития названного эффекта от условий работы углей в лампе, от типа и марки углей. Делаются практические выводы из исследования.*

**Метод исследования.** Сложность явлений в дуге высокой интенсивности, трудности экспериментирования с дугой, наличие практических задач, ограниченных сроком исполнения, придают важное значение вопросу о методе исследования дуги этого вида.

Дугу высокой интенсивности изучали с разных точек зрения и разными способами. Нам известны работы, в которых делались попытки увеличить яркость кратера химическими средствами (замена фторидов редких земель в составе фидиля окислами, применение редких земель в виде карбидов, применение тугоплавких нитридов, введение новых примесей, обдувание дуги кислородом, паром и др.). Известны работы технологического характера, в которых возможность повышения яркости кратера ставилась в зависимость от качества обработки угольной массы, изменения режима обжига углей и т. п. Проводились также исследования физического характера, ставившие целью изучение оптическими методами физической сущности дуги высокой интенсивности и нахождение путей для увеличения яркости кратера.

Приходится, однако, констатировать, что все эти работы до настоящего времени не дали результатов, позволяющих понять основные явления дуги высокой интенсивности и решить поставленные практические задачи.

Из материала статьи первой видно, что рассмотрение основных свойств и параметров дуги высокой интенсивности ставит перед нами ряд серьезных вопросов, как-то: о роли величины плотности тока в создании яркости кратера, о причинах пониженной яркости кратера углей меньшей мощности, о значении геометрических параметров углей, о связи состава углей с яркостью кратера и др. Поэтому при выборе методики исследования дуги высокой интенсивности мы прежде всего учитывали необходимость выяснения указанных вопросов.

Сложность химического состава углей, сложность спектра излучения дуги, недостаточная изученность физико-химических свойств компонент углей обуславливали, по нашему мнению, для данной стадии исследований дуги высокой интенсивности нецелесообразность применения методов исследования, направленных к детальному изучению элементарных процессов, происходящих в дуге.

Базируясь на данных предварительных исследований дуги и учитывая отрицательные результаты упомянутых выше химических, технологических и физических исследований, мы признали необходимым комплексное изучение внешних показателей развития эффекта высокой интенсивности и выяснение обстоятельств, сопровождающих это развитие.

С этой целью мы снимали одновременно следующие характеристические кривые дуги высокой интенсивности: 1) вольтамперную кривую  $U(i)$ ; 2) стильбамперную кривую  $B(i)$ ; 3) кривую глубины кратера  $h(i)$ ; 4) кривую расхода анода  $v(i)$ .

При снятии указанных кривых производились визуальные наблюдения (через плотный фильтр) за строением пламени дуги, измерялся диаметр анода, учитывалось звучание дуги и постоянство ее режима горения.

Работа показала, что исследование дуги высокой интенсивности на основе указанных характеристических кривых является достаточно эффективным. Последовательное применение этого метода при исследовании дуги с углями разных типов и марок позволило установить для дуги высокой интенсивности ряд важных закономерностей и решить стоявшие перед нами практические задачи.

**Характеристические кривые дуги.** Характеристические кривые дуги высокой интенсивности с опытными углями типа 16—150 получены при следующей установке углей в дуговой лампе: длина дуги  $L = 30$  мм (рис. 1), вылет конца положительного угля из радиатора лампы  $S = 30$  мм,

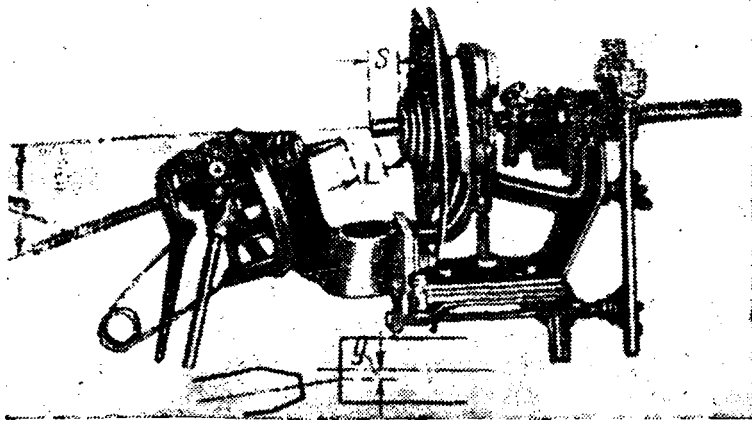


Рис. 1.

угол наклона оси отрицательного угла к горизонту  $\beta = 20^\circ$ , направление оси отрицательного угла пересекает плоскость среза кратера на 2 мм ниже центра ( $y = -2$ ). Указанное расположение отрицательного угла соответствует расположению, обычно принимаемому в прожекторных дуговых лампах.

Характеристические кривые показаны на рис. 2. Величины напряжения дуги, приведенные на рис. 2,

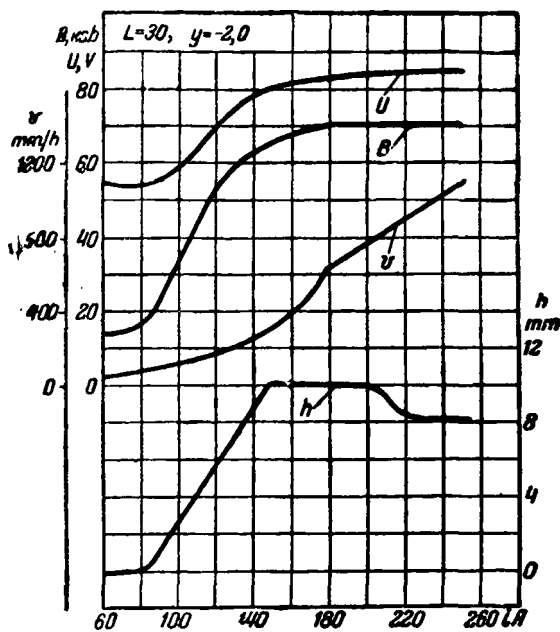


Рис. 2.

измерялись на электродах в непосредственной близости от горящих концов. Величины яркости являются средними арифметическими из нескольких отсчетов для центральной зоны кратера диаметром в 2 мм при измерении с направления под углом  $35^\circ$  от оси положительного угла в горизонтальной плоскости.

Полученные кривые весьма интересны. Из рис. 2 видно, что каждая из характеристических кривых дуги имеет на некоторых участках ход, связанный с ходом других кривых на аналогичных участках. Так, например, участку до точки минимума на кривой  $U(i)$  соответствуют участки с пологим ходом на кривых  $B(i)$  и  $v(i)$ , а по кривой  $h(i)$  соответствующий участок характеризуется отсутствием

кратера. Если исходить из необходимости увязки хода каждой характеристической кривой с ходом всех остальных кривых соответствующих участках, то согласно рис. 2 пришлось бы разделить кривые на пять участков. Второй участок соответствовал бы интервалу сил токов от 80 до 150 А, и все кривые показывают рост рассматриваемых величин. Для третьего участка пришлось бы выбрать интервал от 150 до 180 А для четвертого от 180 до 200 А, для пятого от 200 до 250 А.

Очевидно, рациональным делением характеристических кривых на отдельные участки нужно считать такое деление, при котором границы участков будут соответствовать наиболее существенным моментам процесса горения дуги.

Анализируя ход характеристических кривых, учитывая структуру пламени, постоянство режим горения и звучание дуги, считаем рациональным деление полученных кривых на три участка.

Первый участок (рис. 2) простирается до сил тока дуги 80 А. Его граница на кривой  $U(i)$  определяется минимумом напряжения дуги, равным в данном случае 54 В. Согласно кривой  $h(i)$  этой границе соответствует появление кратера. По данной стилибамперной кривой яркость кратера в первом участке не превышает нормальной яркости кратера простой угольной дуги. Первому участку соответствует меньшее постоянство электрического и светового режима горения дуги. Наблюдаются сравнительно редкие, но довольно длительные глубокие изменения яркости кратера, напряжения и силы тока дуги. Пламя дуги при изменении силы тока в пределах первого участка соответствует в структуре пламени нешипящей простой угольной дуги. Дуга горит при этом бесшумно.

Второй участок характеристических кривых следует ограничить величинами сил тока от 80 до 180 А. На этом участке наблюдается рост напряжения дуги, расхода анода, яркости и глубины кратера.

Анализируя второй участок, можно заметить, что ход разных кривых на этом участке не является одинаковым. Так, согласно рис. 2 кривые  $U(i)$  и  $B(i)$  имеют приблизительно одинаковый ход, характеризующийся быстрым ростом напряжения дуги и яркости кратера при увеличении силы тока до 120 А и замедленным ростом тех же величин при дальнейшем увеличении силы тока до границы второго участка. В то же время кривая  $h(i)$  показывает непрерывный рост глубины кратера при увеличении силы тока до 150 А и практически неизменную глубину кратера при дальнейшем росте силы тока дуги до границы участка. Кривая  $v(i)$  обнаруживает непрерывный рост расхода анода на протяжении всего второго участка.

Заслуживает внимания тот факт, что расход анода на всем протяжении второго участка совершается быстрее, чем по линейному закону. Большие изменения на протяжении второго участка претерпевают постоянство режима горения и звучание дуги.

По мере возрастания силы тока дуги от нижней границы второго участка постоянство режима горения (электрического и особенно светового) улучшается. В интервале сил тока от 120 до 140 А

блюдается наиболее постоянный режим. При увеличении силы тока выше 140 А постоянство режима горения ухудшается, и у верхней границы того участка режим становится наименее постоянным. В этом случае имеют место весьма резкие и частые «мигания» пламени, сопровождающиеся кратковременными и большими изменениями яркости кратера. Уверенная установка полей фотометра на равенство яркости при этом становится невозможной, и можно говорить лишь о средних приблизительных величинах яркости кратера.

Бесшумное горение дуги сохраняется до тех пор, пока постоянство режима горения еще не ухудшается, т. е. до  $i = 140$  А. При дальнейшем увеличении силы тока наблюдается звучание дуги, проявляющееся сначала в виде редких несильных потрескиваний сравнительно низкого тона. Продолжительность, сила и высота тона звучания растут вместе с увеличением силы тока дуги.

Строение пламени дуги при изменении силы тока в пределах второго участка характеристических кривых показывает следующие изменения. При появлении кратера начинает развиваться положительное пламя дуги, представляющее собой ярко светящиеся пары положительного угля, вытекающие из кратера. При силе тока дуги  $i = 140$  А пары в виде плотной струи вытекают из кратера спокойно вверх и прижимаются встречным давлением отрицательного пламени к отверстию кратера. Такое строение пламени дуги мы условимся называть хорошим. При дальнейшем увеличении силы тока положительное пламя дуги в отдельные кратковременные моменты теряет характер плотной струи и приобретает больший объем, выбиваясь из кратера в стороны и вперед. Частота указанных моментов горения растет с силой тока дуги, и при  $i = 180$  А хорошее строение пламени имеет место лишь в отдельные короткие промежутки времени.

Наблюдения за изменением основных характеристик горения дуги при увеличении силы тока в пределах второго участка характеристических кривых позволяют правильно выбрать нормальную силу тока дуги высокой интенсивности. Для дуги с указанными выше опытными углями высокой интенсивности, работающими в данных условиях, сле-

дует принять за нормальную силу тока  $i = 140$  А. Силы тока больше 140 А нужно рассматривать, как соответствующие перегрузке дуги, а силы тока меньше 140 А — недогрузке. Точность экспериментального определения величины нормальной силы тока дуги составит при этом около  $\pm 5$  А.

Третий участок характеристических кривых соответствует силам тока дуги от 180 А и выше. Как видно из кривых рис. 2, напряжение дуги и средние значения яркости центральной зоны кратера остаются практически постоянными на всем протяжении третьего участка. Согласно кривой  $v(i)$  рост расхода анода при переходе к третьему участку несколько замедляется, и на протяжении указанного участка расход анода растет по линейному закону. Кривая  $h(i)$  показывает неожиданное уменьшение глубины кратера.

Интересные изменения происходят с постоянством режима горения и звучанием дуги при силах тока, соответствующих третьему участку характеристических кривых.

При увеличении силы тока дуги выше 180 А частота миганий пламени продолжает увеличиваться и при предельных силах тока становится настолько большой, что установление средних значений напряжения и силы тока дуги с помощью электроизмерительных приборов, а также установление средних значений яркости кратера с помощью фотометра перестают быть трудными. Таким образом увеличение частоты миганий пламени сначала ухудшает постоянство режима горения дуги, а затем улучшает последнее.

Следует отметить, что в отдельные кратковременные моменты, наблюдающиеся при силе тока дуги приблизительно до 230 А, пламя дуги приобретает хорошее строение, и в это время мгновенные отсчеты яркости достигают весьма больших величин, до 130 ksb.

Сила звучания дуги растет вместе с силой тока. При предельно больших силах тока дуги звучание становится непрерывным, и при этом повышается его тон.

Результаты наблюдений за изменениями показателей горения дуги высокой интенсивности приведены в таблице.

Участок характеристических кривых	Сила тока дуги, А	Изменения показателей горения дуги на протяжении участка характеристических кривых						
		Напряжение дуги	Яркость кратера	Расход анода	Глубина кратера	Постоянство режима горения	Звучание	Строение пламени
Первый	< 80	Убывает до минимума	Растет медленно	Растет медленно	Кратера нет	Неудовлетворительное	Дуга горит бесшумно	Положительное пламя отсутствует, как у простой дуги
Второй	80—180	Растет сначала быстро, а затем медленнее	Растет сначала быстро, а затем медленнее	Растет по закону выше линейного	Сначала быстро растет, а затем не меняется	Улучшается до оптимального при 140 А, а затем ухудшается до предельно плохого	Дуга горит бесшумно до 140 А, затем постепенно учащаются и усиливаются скрипы	Развивается положительное пламя и до $i = 140$ А сохраняет хорошее строение. Далее в моменты скрипов пламя теряет хорошее строение
Третий	> 180	Остается практически постоянным	Средние значения одинаковы	Растет по линейному закону	Неожиданно уменьшается, а затем почти не меняется	Постепенно улучшается	Усиливаясь, звучание становится непрерывным	Ухудшается

**Основные стадии развития эффекта высокой интенсивности.** Результаты исследования позволяют заключить, что напряжение дуги, яркость и глубина кратера, расход анода, а также постоянство режима горения, строение пламени и звучание дуги тесно связаны друг с другом. Наблюдая за изменением указанных показателей горения дуги, при увеличении силы тока, следует прийти к выводу о том, что эти изменения отображают процесс развития эффекта высокой интенсивности.

Анализ хода кривых, изображенных на рис. 2, приводит к заключению об отсутствии разницы между характеристическими кривыми дуги высокой интенсивности на первом участке и характеристическими кривыми обычной пламенной дуги.

Кроме того вольтамперная кривая дуги высокой интенсивности на первом участке имеет падающий ход, в то время как в диапазоне рабочих сил тока она имеет возрастающий ход. Кривая  $h(i)$  на первом участке показывает отсутствие кратера, в то время как при рабочей силе тока дуга высокой интенсивности характеризуется глубоким кратером. Эти факты дают основание считать, что при увеличении силы тока исследуемой дуги в пределах первого участка развитие эффекта высокой интенсивности не наблюдается. В соответствии с этим выводом рост яркости кратера нельзя считать исчерпывающим показателем развития названного эффекта.

Первой особой точкой характеристических кривых рис. 2 является точка при силе тока дуги 80 А, разграничивающая первый и второй участки кривых и соответствующая началу развития эффекта высокой интенсивности. В данном случае этой точке соответствует плотность тока 40 А/см<sup>2</sup> (отнесенная к сечению положительного угля).

Приведенные выше результаты исследования показывают, что все развитие эффекта высокой интенсивности происходит при увеличении силы тока дуги в пределах второго участка характеристических кривых. Это развитие характеризуется в данном случае быстрым ростом напряжения дуги и яркости кратера, нелинейным ходом кривой расхода анода, выгоранием предельно глубокого кратера, развитием положительного пламени. Особая точка кривых рис. 2 при силе тока дуги 180 А, являющаяся верхней границей второго участка, соответствует окончанию развития эффекта высокой интенсивности.

Имеющая большой практический интерес точка нормального режима горения дуги (наибольшего постоянства яркости кратера) не совпадает с моментом полного развития эффекта высокой интенсивности. В данном случае исследования силу тока нормального режима горения дуги можно считать равной 140 А, в то время как полное развитие эффекта наблюдалось при силе тока 180 А.

Согласно характеристическим кривым начало развития эффекта высокой интенсивности совпадает с моментом появления кратера, однако предельную глубину кратер приобретает раньше окончания развития названного эффекта. Отсюда видно, что развитие эффекта высокой интенсивности нельзя считать следствием только выгорания кратера.

Ход изменения напряжения дуги, яркости кратера, расхода анода, строения и звучания пламени, постоянства режима горения при увеличении силы тока дуги в пределах третьего участка ха-

рактеристических кривых соответствует в общем ходу изменения тех же показателей при переходе третьей участку следует считать соответствующими стадиями развитого эффекта высокой интенсивности прекратившего свое дальнейшее развитие.

Уменьшение глубины кратера на третьем участке кривых не отразилось на ходе изменения других показателей горения дуги. Это, в свою очередь подтверждает сделанное выше заключение об ограниченности связи развития эффекта высокой интенсивности с выгоранием кратера.

В дальнейшем нам предстоит установить причины, обуславливающие начало и конец развития эффекта высокой интенсивности, и выяснить причины найденных изменений каждого из показателей горения дуги на всем протяжении характеристических кривых.

**Характеристические кривые дуги при разных условиях работы углей.** Из практики работы дуговых лам высокой интенсивности известно, что угли заданного типа и марки обычно предназначаются для работы в определенных дуговых лампах конструктивные особенности которых должны обеспечивать наиболее благоприятные для этих углей условия работы. Последние следует считать складывающимися из угла наклона  $\beta$  отрицательного угля к горизонту (рис. 1), высоты  $y$  расположения отрицательного угля, вылета  $S$  конца положительного угля из радиатора дуговой лампы и длины дуги  $L$  или рабочего напряжения на зажимах дуговой лампы. Для углей высокой интенсивности разных типов и марок, работающих в соответствующих дуговых лампах, перечисленные условия работы строго фиксируются. Однако в литературе и практике нет достаточных данных о сущности и механизме влияния условий работы углей на характеристики горения дуги.

С целью выяснения влияния условий работы углей на ход развития эффекта высокой интенсивности мы сняли характеристические кривые дуги при разных условиях работы углей. Эти исследования были произведены при одних и тех же опытных углях типа 16—150, работающих в лабораторной дуговой лампе, позволяющей изменять по желанию каждое из условий работы углей.

а) *Влияние высоты расположения отрицательного угля.* На рис. 3 даны характеристические кривые дуги, снятые при сниженном расположении отрицательного угля (катода) до  $y = -5,5$  мм и при неизменных остальных условиях работы ( $S = 30$  мм,  $\beta = 20^\circ$  и  $L = 30$  мм).

Из рис. 3 видно, что и в этом случае можно разделить характеристические кривые на три участка, соответствующие различным стадиям развития эффекта высокой интенсивности. Первый участок простирается до силы тока дуги 110 А. Граница между вторым и третьим участками соответствует силе тока приблизительно 180 А, т. е. практически не меняется по сравнению с той, которая была при  $y = -2$  мм.

Развитие эффекта высокой интенсивности при этом имеет интересные особенности. Они заключаются в запаздывании начала развития названного эффекта (при силе тока 110 А вместо 80 А в предыдущем случае) и в скачкообразном изменении величин напряжения дуги, яркости и глубины кратера на границе между первым и вторым участ-

характеристических кривых. Скачкообразный характер кривых связан с тем, что при переходе во время экспериментов от силы тока 100 А к силе 110 А дуга первое время горела при плоском катодном слое и имела пониженное напряжение и яркость катодного пятна. По истечении некоторого времени (части секунды или нескольких минут) горения при той же силе тока начиналось образование кратера, который быстро приобретал постоянную глубину; при этом напряжение дуги и яркость кратера также увеличивались. При дальнейшем горении дуги при той же силе тока напряжение дуги и яркость кратера оставались практически стабильными.

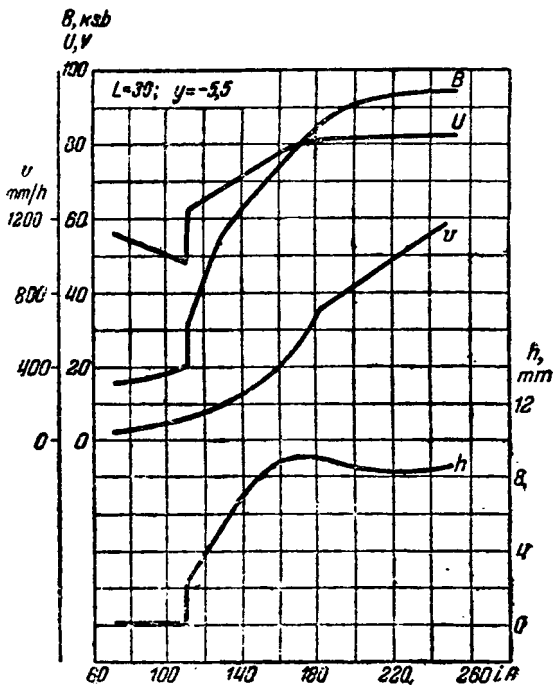


Рис. 3.

зывают рост величин напряжения дуги, яркости и глубины кратера при увеличении силы тока дуги. Нелинейный закон роста расхода анода на втором участке сохраняется и в этом случае.

Ход характеристических кривых на их третьем участке при  $y = -5,5$  mm аналогичен ходу кривых для случая при  $y = -2$  mm. Можно отметить лишь изменение хода кривой  $B(i)$ , которая в этом случае показывает некоторый рост яркости. Последний объясняется тем, что при пониженном расположении катода более часто имеют место кратковременные периоды с хорошим строением пламени дуги, в течение которых получают большие отсчеты яркости, повышающие ее средние значения, представленные на кривых.

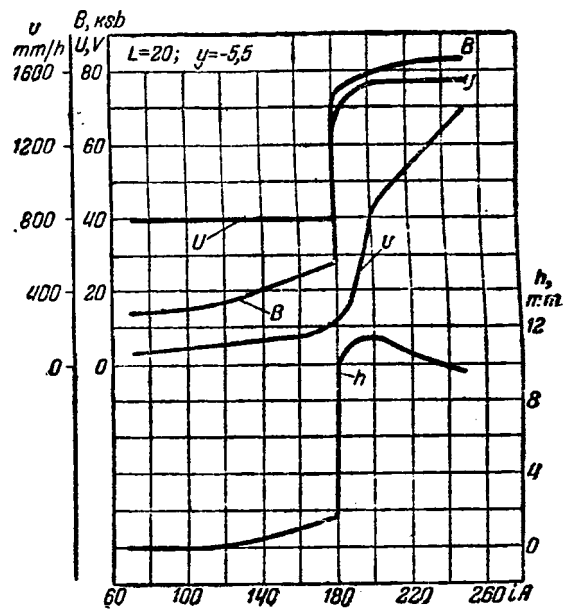


Рис. 4.

Следует также отметить, что в этом случае на протяжении первого участка кривых яркость кратера постепенно возрастает приблизительно до 20 ksb, в то время как напряжение дуги понижается до 48 В.

Запаздывание начала развития эффекта высокой интенсивности при сниженном расположении катода приводит к увеличению силы тока нормального режима горения дуги. Для указанного расположения катода область наибольшего постоянства режима горения дуги соответствует силам тока от 140 до 160 А. За нормальную силу тока дуги следует считать 160 А вместо 140 А для предыдущего случая.

Согласно приведенным данным силу тока нормального режима горения дуги с углями высокой интенсивности не следует считать функцией только параметров углей. Она зависит в значительной мере и от высоты расположения отрицательного электрода в дуговой лампе.

Кроме указанных особенностей развитие эффекта высокой интенсивности при сниженном расположении катода ( $y = -5,5$  mm) остается в основном таким же, как и при более высоком расположении катода ( $y = -2$  mm). Характеристические кривые  $U(i)$ ,  $B(i)$  и  $h(i)$  на втором участке пока-

нельзя не отметить того обстоятельства, что сниженное расположение катода, задерживая начало развития эффекта высокой интенсивности, обеспечивает (при достаточном развитии названного эффекта) увеличенную яркость кратера и увеличенный расход анода при одинаковой силе тока дуги. В наших экспериментах при снижении катода с  $y = -2$  mm до  $y = -5,5$  mm было получено при силе тока дуги 160 А увеличение яркости кратера с 68 до 75 ksb и увеличение расхода анода с 370 до 440 mm/h. Особенно интересно отметить, что в этом случае увеличенная яркость кратера и увеличенный расход анода достигаются при меньшей глубине кратера (9 mm вместо 10 mm) и при меньшем напряжении дуги (78 В вместо 82 В), т. е. при меньшей мощности, затрачиваемой в разряде.

б) Влияние длины дуги и угла наклона отрицательного электрода. На рис. 4 даны характеристические кривые с углями, работающими при уменьшенной длине дуги  $L = 20$  mm и при остальных условиях работы таких же, как в предыдущем случае.

Из кривых видно, что начало развития эффекта высокой интенсивности при уменьшенной длине дуги запаздывает еще больше. Быстрое развитие указанного эффекта начинается только при силе тока

дуги 180 А, т. е. при расчетной плотности тока  $90 \text{ А/см}^2$  (вместо  $40 \text{ А/см}^2$  и  $55 \text{ А/см}^2$  в предыдущих случаях). При этом скачкообразное развитие эффекта выражено еще более резко.

Особенности развития эффекта высокой интенсивности на протяжении первого участка характеристических кривых в данном случае проявляются в виде постоянства напряжения дуги, выгорания кратера глубиной до 2 мм и роста яркости кратера до 27 ksb. Нельзя не отметить при этом также меньшую устойчивость первого участка кривых в том смысле, что при повторном снятии цикла кривых быстрое развитие эффекта высокой интенсивности может начинаться несколько раньше, в пределах сил тока дуги от 150 до 180 А.

Второй участок характеристических кривых заключен в узком интервале сил тока дуги от 180 до 200 А. Постоянство режима горения дуги при этом значительно ухудшено, и хорошего постоянства светового режима дуги не наблюдается при любом значении силы тока. Рост расхода анода по закону более быстрому, чем линейный, наблюдается и в этом случае.

Все особенности хода кривых на третьем участке сохраняются и при короткой дуге. Связь между постоянством режима горения дуги, ее звучанием и структурой пламени остается в этом случае такой же, как и в предыдущих случаях.

Исследование дуги при увеличенном угле наклона отрицательного угля  $\beta=40^\circ$  показало, что в этом случае наблюдается небольшое ускорение развития эффекта высокой интенсивности. Вместе с тем с увеличением угла  $\beta$  несколько раньше появляется звучание и раньше наступает ухудшение постоянства режима горения дуги.

**Характеристические кривые дуги при углях разных марок.** Угли высокой интенсивности одного и того же типа, но разных марок могут отличаться по яркости кратера и другим показателям горения дуги. Представляет интерес применить наш метод исследования дуги к случаям работы углей высокой интенсивности разных марок одного типа.

Для исследования были взяты угли типа 16—150 марки ПИГ. Характеристические кривые дуги с этими углями могут сопоставляться с описанными ранее аналогичными кривыми дуги с опытными углями того же типа.

На рис. 5 даны характеристические кривые дуги с углями марки ПИГ, работающими в дуговой лампе при следующих условиях: длина дуги  $L=30 \text{ мм}$ , вылет конца положительного угля из радиатора лампы  $S=30 \text{ мм}$ , угол наклона оси отрицательного угля к горизонту  $\beta=20^\circ$ ; высота расположения отрицательного угля  $y=-2 \text{ мм}$ . Пунктирные кривые на том же рисунке являются описанными ранее характеристическими кривыми дуги с опытными углями, работающими в одинаковых условиях (рис. 2).

Из сопоставления сплошных и пунктирных кривых рис. 5 легко подметить разницу в ходе развития эффекта высокой интенсивности у дуги с углями одного типа двух разных марок. Разница состоит в том, что достаточно быстрое развитие названного эффекта у дуги с углями марки ПИГ начинается при силе тока 120 А вместо 80 А при опытных углях и происходит в значительной мере скачкообразно. Конец развития эффекта дости-

гается при силе тока дуги 200 А вместо 180 А при опытных углях.

Область наиболее спокойного режима горения дуги с углями ПИГ заключена в интервале сил тока от 140 до 160 А. В качестве силы тока нормального режима горения дуги можно принять  $i=160$  вместо  $i=140 \text{ А}$  при опытных углях.

В отношении других существенных моментов ход развития эффекта высокой интенсивности у дуги с углями марки ПИГ совпадает с тем, что наблюдалось у дуги с опытными углями, а именно: рост расхода анода на втором участке характер-

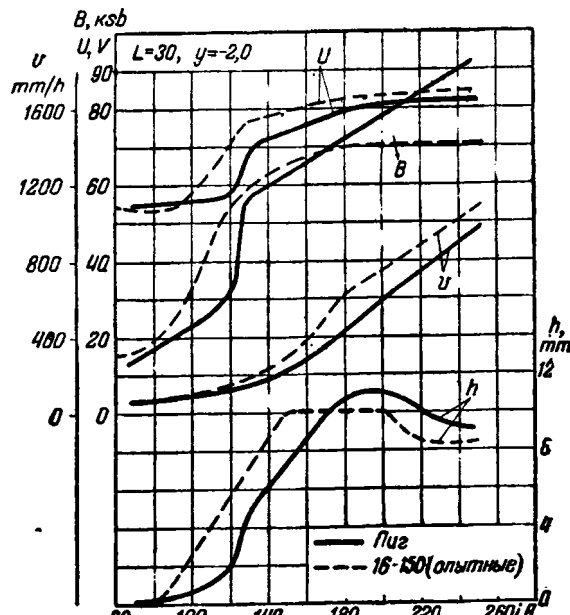


Рис. 5.

стических кривых совершается по закону выше линейного; на границе третьего участка кривая  $v(i)$  показывает замедление роста расхода анода, а на протяжении третьего участка — расход по линейному закону; на третьем участке прекращается рост напряжения дуги и неожиданно уменьшается глубина кратера; наблюдается та же связь между постоянством режима горения, звучанием и строением пламени дуги.

На основании полученных результатов исследования можно сказать, что особенности состава и геометрических параметров углей марки ПИГ, работающих в одинаковых условиях с опытными углями того же типа, обусловили запаздывание начала ( $\sim$  на 40 А) и конца ( $\sim$  на 20 А) развития эффекта высокой интенсивности и увеличили ( $\sim$  на 20 А) силу тока нормального режима горения дуги. Наибольшая крутизна кривой  $v(i)$  в случае углей ПИГ получилась меньшей, чем при опытных углях. Кроме того при углях ПИГ несколько чаще наблюдались моменты правильного строения пламени дуги и большие отсчеты яркости кратера при силах тока более 180 А. Благодаря этому кривая  $B(i)$  средних значений яркости центральной зоны кратера показывает непрерывный рост.

Исследование горения дуги с углями марки ПИГ при  $y=-5,5 \text{ мм}$  (рис. 6) показало, что снижение катода оказывает аналогичное действие на ход развития эффекта высокой интенсивности у дуги с опытными углями и у дуги с углями ПИГ.



Катод с  $y = -2$  мм до  $y = -5,5$  мм с углями ПИГ задержало начало развития эффекта высокой интенсивности с 120 до 140 А. Словило в большей мере скачкообразность развития. Сила тока нормального режима дуги увеличилась приблизительно до 170 А. Сила тока дуги 170 А расход анода составил 360 мм/ч и яркость кратера 77 ksb вместо расхода 360 мм/ч и яркости кратера 68 ksb при  $y = -2$  мм. Эти повышенные значения расхода анода и яркости кратера достигались при меньших значениях напряжения дуги (72 В вместо 78 В) и глубины кратера (8 мм вместо 10 мм).

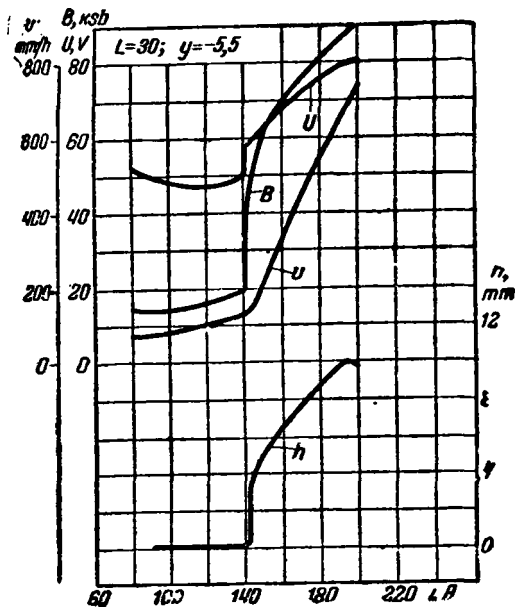


Рис. 6.

при равных плотностях тока яркость кратера тонких углей выше яркости кратера толстых углей.

Из табл. 3 (см. статью первую) мы видели, что угли разных марок типа 11—75 дают яркость кратера 36—40 ksb, тогда как угли типа 16—150 при одинаковой расчетной плотности тока дают яркость кратера 60—66 ksb. Учитывая это, является жела-

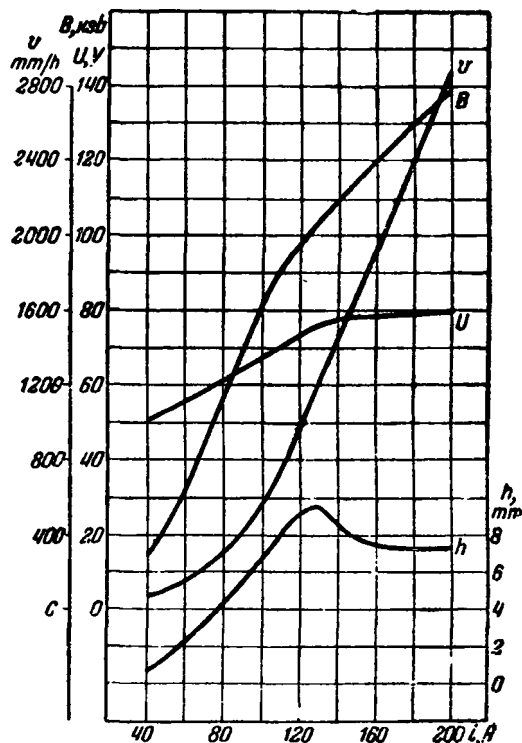


Рис. 7.

Существенной особенностью горения дуги с углями ПИГ при  $y = -5,5$  мм мы считаем преобразование нелинейного хода кривой  $v(i)$  раньше (при  $i = 160$  А), чем достигается предельная глубина кратера (при  $i = 190$  А). Этот факт указывает на то, что нелинейный ход кривой расхода анода не может служить безусловным показателем развития эффекта высокой интенсивности.

Стильбамперные кривые для случая  $y = -5,5$  мм при малых силах тока дуги лежат ниже аналогичных кривых для случая  $y = -2$  мм; при больших же силах тока дуги первые кривые располагаются выше. Пересечение указанных кривых при дуге с опытными углями имеет место при  $i = 130$  А, а при дуге с углями ПИГ при  $i = 150$  А. Отсюда следует, что снижение катода с  $y = -2$  мм до  $y = -5,5$  мм оказывается полезным в случае опытных углей и бесполезным в случае углей ПИГ.

Проведенные нами исследования дуги с углями высокой интенсивности других марок показали неизменность основных моментов развития эффекта высокой интенсивности во всех случаях. Особенности углей той или иной марки проявлялись лишь в изменении скорости развития названного эффекта.

**Характеристические кривые дуги при углях разных типов.** При исследовании дуги высокой интенсивности представляет интерес вопрос о причинах пониженной яркости кратера углей меньшей мощности.

В литературе можно встретить указания, что

нужно снять характеристические кривые дуги с углями типа 11—75 и изучить особенности их хода.

На рис. 7 приведены характеристические кривые дуги с опытными углями типа 11—75, работающими в дуговой лампе при следующих условиях:  $L = 20$  мм;  $S = 30$  мм;  $\beta = 20^\circ$ ;  $y = -2$ . Яркость кратера измерялась с направления оси положительного угла.

Согласно кривым рис. 7, развитие эффекта высокой интенсивности в данном случае начинается с минимальной при опыте силы тока дуги 40 А ( $\Delta i = 42$  А/см<sup>2</sup>). Благодаря этому характеристические кривые имеют только второй и третий участки.

Анализируя характеристические кривые дуги с углями типа 11—75, можно сказать, что этим кривым присущи свойства аналогичных кривых дуги с углями типа 16—150.

По совокупности указанных свойств границу между вторым и третьим участками кривых следует считать соответствующей силе тока дуги 130 А. Отсюда вытекает первая особенность развития эффекта высокой интенсивности у дуги с углями типа 11—75, а именно: эффект развивается медленнее, достигая полного развития при  $\Delta i = 135$  А/см<sup>2</sup> вместо  $\Delta i = 90$  А/см<sup>2</sup> у дуги с углями типа 16—150 (рис. 2).

Наблюдения за постоянством горения позволяют принять за нормальную силу тока дуги в этом случае  $i = 100$  А. Отсюда вытекает вторая особен-

ность горения дуги с углями типа 11—75, а именно: нормальная сила тока дуги ( $i = 100$  А и  $\Delta i = 105$  А/см<sup>2</sup>) значительно превышает номинальную (рабочую) силу тока углей ( $i = 75$  А и  $\Delta i = 79$  А/см<sup>2</sup>).

Согласно кривой  $B(i)$  яркость кратера дуги при номинальной силе тока составляет 50 ksb, а при нормальной силе тока — 80 ksb.

Можно сказать, что пониженную яркость кратера углей типа 16—150 по сравнению с яркостью кратера углей типа 16—150 следует объяснить недостаточностью силы тока (номинальной), при ко-

дуги 270 А ( $\Delta i = 106$  А/см<sup>2</sup>) развитие эффекта заканчивается, благодаря чему характеристические кривые имеют лишь первые два участка. Сравнение кривых рис. 8 с аналогичными кривыми дуги с углями типа 16—150 (рис. 4) показывает замедленное развитие эффекта высокой интенсивности у дуги с углями типа 18—250. Для начала конца развития эффекта высокой интенсивности получаем соответственно следующие значения плотности тока: при углях типа 16—150  $\Delta i_1 = 90$  А/см<sup>2</sup> и  $\Delta i_2 = 100$  А/см<sup>2</sup>, а при углях 18—250  $\Delta i_1 = 75$  А/см<sup>2</sup> и  $\Delta i_2 > 106$  А/см<sup>2</sup>.

Отсюда следует важное заключение о том,

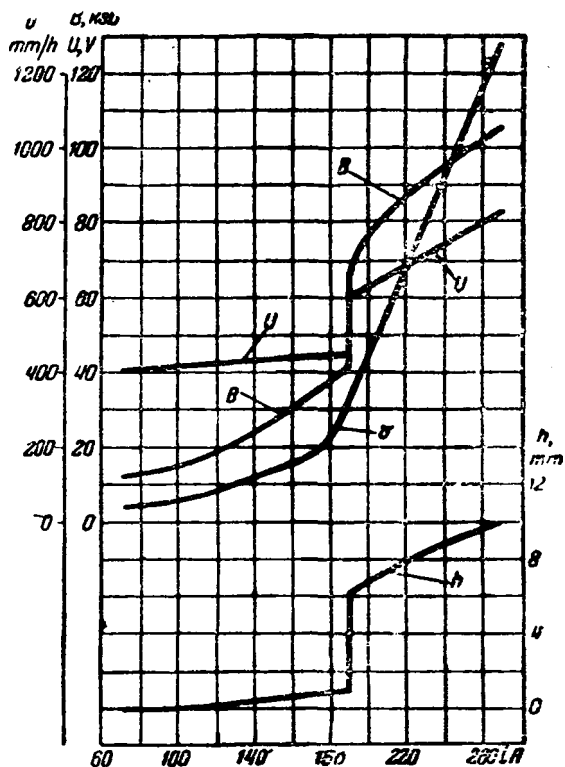


Рис. 8.

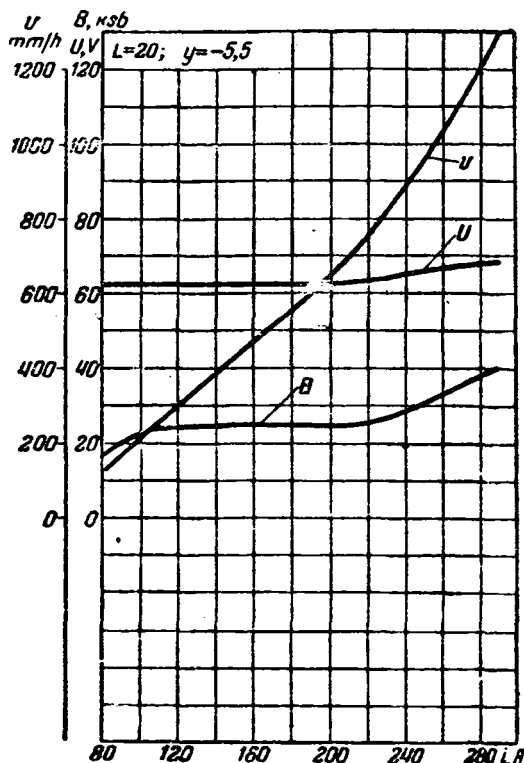


Рис. 9.

торой эксплуатируются угли типа 11—75. Параметры этих углей обуславливают нормальную силу тока дуги равной 100 А, в то время как рабочая (номинальная) сила тока дуги установлена в 75 А.

Остается открытым вопрос о том, можно ли изменить параметры углей типа 11—75 так, чтобы нормальная сила тока дуги снизилась до ее рабочей силы тока и будет ли в случае совпадения указанных сил тока яркость кратера углей типа 11—75 равна яркости кратера углей типа 16—150.

Не решая пока этого вопроса, мы можем сказать, что очевидно, положительное решение его требует знания средств (в виде изменения параметров углей) для регулирования скорости хода развития эффекта высокой интенсивности.

Кривые рис. 8 представляют собой характеристические кривые дуги с углями типа 18—250, снятые при следующих условиях работы углей в дуговой лампе:  $L = 20$  мм;  $S = 30$  мм;  $\beta = 20^\circ$  и  $y = -5,5$  мм.

Согласно кривым рис. 8 при силе тока дуги 190 А ( $\Delta i = 75$  А/см<sup>2</sup>) наблюдается скачкообразное развитие эффекта высокой интенсивности. При предельной по условиям эксперимента силе тока

замедленное развитие эффекта высокой интенсивности не является специфическим свойством углей малой мощности, имеющих небольшой диаметр; оно наблюдается и в случае мощных углей большого диаметра.

Интересную особенность обнаруживает в данном случае кривая расхода анода  $v(i)$ , а именно: возрастание крутизны кривой совершается на первом участке и заканчивается в точке внезапного развития эффекта; на всем втором участке рост расхода анода происходит по линейному закону.

Для первого участка характеристических кривых в этом случае необходимо отметить значительное возрастание яркости кратера, большое возрастание крутизны кривой  $v(i)$ , небольшое, но несомненное увеличение напряжения дуги и появление глубокого кратера. Аналогичное явление наблюдалось у дуги с углями типа 16—150 при  $L = 20$  мм (рис. 4). В свете приведенных данных мы должны говорить о частичном развитии в этих случаях эффекта высокой интенсивности на первом участке характеристических кривых. С другой стороны, это указывает на необходимость более точного определения понятия указанного эффекта.

В описанных выше экспериментах наиболее быстрое развитие эффекта высокой интенсивности наблюдалось при углях типа 16—150. Вместе с тем отношение диаметра фитиля к диаметру оболочки было равно около 0,6 для углей типа 18—250 приблизительно равно 0,4 для углей двух остальных типов (11—75 и 16—150).

Отсюда приходится констатировать, что отношение  $\frac{d_{ф}}{a}$ , принимаемое обычно за характеристи-

геометрических параметров положительных углей, не связано непосредственно со скоростью развития эффекта высокой интенсивности.

**Характеристические кривые простой угольной дуги.** Представляет интерес сравнить характеристические кривые дуги высокой интенсивности с кривыми простой угольной дуги.

На рис. 9 даны характеристические кривые простой угольной дуги с положительными углями диаметром 16 мм. Угли имели фитиль того же диаметра, как у углей высокой интенсивности типа 16—150, но состоящий только из углерода без каких-либо примесей. Они работали в дуговой лампе при  $L = 20$  мм;  $S = 30$  мм;  $\beta = 20^\circ$  и  $y = -5,5$  мм.

Кривые показывают, что при относительно малых значениях силы тока простая дуга имеет большее напряжение и повышенный расход анода по сравнению с теми же характеристиками дуги высокой интенсивности (рис. 4). При силах тока дуги больше 200 А наблюдается заметный рост напряжения дуги и яркости анода; расход анода при

этом возрастает по закону быстрее линейного. Кратер не выгорает при любых значениях силы тока дуги.

Учитывая ход характеристических кривых рис. 9, мы должны сказать, что при силах тока больше 200 А простая угольная дуга обнаруживала в некоторой мере развитие эффекта высокой интенсивности.

**Основные выводы из исследования развития эффекта высокой интенсивности.** Рассматривая результаты исследования развития эффекта высокой интенсивности с практической точки зрения, мы имеем основания для следующих заключений:

1. Для углей каждого типа существует свой оптимальный ход развития эффекта высокой интенсивности, при котором сила тока нормального режима горения дуги совпадает с номинальной (рабочей) силой тока углей этого типа.

2. Угли разных марок одного типа при одинаковой силе тока дуги могут давать неодинаковую яркость кратера по двум основным причинам:

а) несовпадение скоростей хода развития эффекта высокой интенсивности;

б) неодинаковый уровень эффекта высокой интенсивности в одинаковой фазе его развития.

3. Задача разработки рациональных углей того или иного типа связана с нахождением средств для регулирования скорости хода и уровня развития эффекта высокой интенсивности.

Кроме того результаты исследования развития эффекта высокой интенсивности должны быть положены в основу определения сущности явления названного эффекта.

## О некоторых методах механического решения системы линейных алгебраических уравнений\*

Член-корреспондент Академии наук СССР И. С. БРУК

*В статье на ряде примеров рассмотрено применение приборов, облегчающих или полностью механизующих процесс решения систем линейных уравнений. Охарактеризованы сравнительные достоинства и недостатки различных приборов, основанных на динамическом и кинематическом принципах. Указаны способы составления схем приборов и предотвращения возможных ошибок при пользовании ими. Печатается в порядке обсуждения.*

Около года тому назад в связи с разработкой счетнорешающего устройства автором были предложены некоторые схемы для решения системы линейных алгебраических уравнений. При этом было обнаружено, что эти схемы, содержащие внутренние источники энергии, обладают рядом интересных особенностей. В последнее время в печати появились статьи [Л. 1, 2, 3], в которых рассматривается применение электрических схем с усилителями для решения систем линейных алге-

браических уравнений. Статьи могут привести к неправильным представлениям, если не обратить внимание читателей на упомянутые особенности рассматриваемых электрических схем, которые авторы статей, повидимому, не заметили. Это обстоятельство и побудило меня написать по этому вопросу настоящую статью, которая содержит также краткий обзор основных возможностей для построения приборов, служащих для решения системы линейных алгебраических уравнений.

Все задачи, в основу решения которых может быть положен принцип суперпозиции, сводятся к решению системы линейных алгебраических уравнений. К этому же, как известно, может быть приближенно сведено и решение задач, формулируемых посредством интегральных или дифференциальных линейных уравнений. Однако обычные методы численного решения системы уравнений весьма трудоемки. Было сделано немало попыток построить приборы, облегчающие или полностью механизующие процесс решения системы линейных уравнений.

Отметим два принципа, на основе которых могут быть осуществлены подобного рода приборы.

Первый из них, который можно назвать динамическим принципом, основан на линейной зависимости между обобщенными силами и перемещениями, имеющей место в линейной физической системе. Например, в упругой системе, составленной из стержней, имеет место линейная зависимость между деформацией стержней и действующими силами. В электрической линейной системе имеет место такая же зависимость между токами и напряжениями. Поэтому, составив физическую систему, описываемую предложенной системой уравнений, можно, произведя с ней надлежащий опыт, установить связь между «силами» и «перемещениями» и таким образом решить предложенную систему уравнений. Этот принцип применим практически лишь к системам, для которых матрица коэффициентов симметрична. Применение его к системам с несимметричной матрицей требует дополнительных преобразований.

Второй принцип — кинематический — заключается в том, что кинематическая схема прибора составляется таким образом, чтобы предложенная система уравнений выражала связь между перемещениями элементов кинематической схемы. При этом предполагается, что элементы кинематической схемы недеформируемы (твердые тела)<sup>1</sup>.

«Деформацию» нужно понимать в широком смысле слова. Например, если кинематическая схема — механическая, то это значит, что растяжение и сжатие, изгиб и кручение отдельных элементов исчезающе малы и ими можно пренебречь.

Рассмотрим некоторые примеры, иллюстрирующие применение обоих принципов.

Пусть, например, предложена система  $n$  алгебраических линейных уравнений с  $n$  неизвестными  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , матрица коэффициентов которых симметрична. Для простоты ограничимся системой с вещественными коэффициентами, к которой можно свести и систему с комплексными коэффициентами. Не будем, однако, накладывать никаких ограничений на знаки коэффициентов.

Систему запишем в виде:

$$\sum_{j=1}^n a_{kj} x_j = A, \quad (1)$$

где  $k=1, 2, \dots, n$ ,  $a_{kj} = a_{jk}$  — вещественные числа произвольного знака.

<sup>1</sup> К этой группе следует отнести также приборы, в основе которых лежит использование вычислительных машин для производства арифметических действий по заранее установленной схеме.

Как известно, для линейной электрической цепи имеющей  $n$  точек питания, справедлива следующая система уравнений, связывающая между собой значения напряжений в точках питания с токами притекающими извне к этим же точкам:

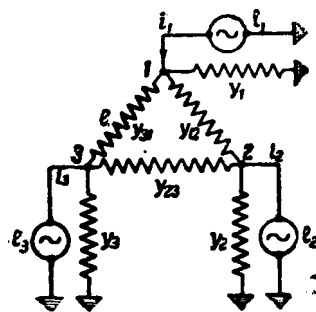


Рис. 1.

$$i_k = e_k y_{kk} - \sum_{j=1, j \neq k}^n e_j y_{kj}$$

где  $k=1, 2, \dots, n$ . (1) Этой системе уравнений соответствует определенная электрическая схема, составленная подобно тому, как показано на рис. 1 для  $n=3$ .

Матрица коэффициента содержит  $\frac{n(n-1)}{2}$  различных по числовому значению элементов, так как  $y_{jk} = y_{kj}$ . В электрической схеме нужно выбрать взаимные проводимости  $y_{jk}$  равными или пропорциональными элементам  $a_{jk}$  матрицы предложенной системы. Что касается значений  $y_{kk}$ , которые должны быть равны или пропорциональны элементам  $a_{kk}$  предложенной матрицы, то для них нетрудно установить следующее соотношение:

$$y_{kk} = y_k + \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{jk}, \quad (2)$$

откуда определяются проводимости  $y_k$ , включаемые между точками питания и нулевой точкой. Так как все  $y_{jk}$  равны или пропорциональны элементам предложенной матрицы, то из уравнения (2) однозначно определяется  $y_k$ .

Таким образом получаем значения всех проводимостей, из которых составляется электрическая схема, эквивалентная предложенной системе уравнений. Так как знаки  $a_{jk}$  произвольны, то и знаки проводимостей в электрической схеме могут быть положительными и отрицательными. Чтобы не ограничиваться частными случаями, целесообразно электрическую схему составить из реактивных проводимостей (емкостных и индуктивных) в соответствии со знаком данной проводимости. Питание электрической схемы должно осуществляться от источника переменного тока [Л. 4].

Решение предложенной системы уравнений сводится к отысканию матрицы, обратной матрице коэффициентов. Элементы этой обратной матрицы получают путем измерения в электрической схеме. Присоединив, например, только первую точку питания к источнику переменного тока и установив силу, равную единице, получим значение элементов обратной матрицы,  $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}$ , посредством измерения напряжения (по величине и фазе) всех точек питания относительно нулевой точки. При отсутствии сдвига фаз можно условно приписать знак плюс соответствующему коэффициенту, при сдвиге  $180^\circ$  — знак минус. Решение системы для произвольных значений правых частей уравнений (1) может быть сразу написано при помощи обратной матрицы.

Для составления электрической схемы и проведения необходимых измерений можно воспользоваться расчетным столом переменного тока при условии, что реактивные проводимости имеют достаточно малый угол потерь и частота подержится постоянной. Таким путем можно получить точность решения порядка нескольких процентов. Аналогичным путем можно было бы рассмотреть другие физические системы. Такие системы состоят из элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$  — в случае электрической системы, из элементов, характеризующихся массой, упругостью и вязким трением, — в механической системы.

В пассивных линейных физических системах, как известно, соблюдается принцип взаимности, что и приводит к существенному ограничению — системам уравнений с симметричной матрицей. Можно, разумеется, осуществить физические системы, в которых принцип взаимности не имеет места, т. е. системы, содержащие активные элементы (усилители или «отрицательные» сопротивления). Таким путем, пользуясь приведенными выше схемами с  $n$  точками питания, можно было бы решать системы и с несимметричной матрицей. Однако эта возможность имеет скорее принципиальное, чем практическое, значение по следующим причинам.

Поведение физической системы описывается, строго говоря, дифференциальным уравнением того или иного порядка или системой таких уравнений. Если отвлечься от действия сил, зависящих от производных координат, можно описать статические свойства системы, пользуясь линейными алгебраическими уравнениями. Для рассматриваемых физических систем, составленных из пассивных элементов, состояние равновесия или относительного покоя всегда имеет место, если внешние силы неизменны. Если же внешние силы заданы периодическими функциями времени, то в пассивной системе рано или поздно установится режим вынужденных колебаний, также описываемый системой линейных алгебраических уравнений. Что касается систем, содержащих активные элементы, то здесь подобное утверждение не может быть обосновано.

Может случиться, что состояние системы, формально определяемое решением заданных совместных линейных алгебраических уравнений, неустойчиво. В этом случае невозможно будет производить измерения, необходимые для нахождения решения. Разумеется, по виду предложенной системы уравнений, без анализа свойств отображающей ее физической системы, невозможно предсказать поведение последней.

Путем несложного преобразования мы всегда можем привести систему с несимметричной матрицей к симметричной, после чего можно воспользоваться изложенным выше методом, не прибегая к схемам с активными элементами. Пусть в предложенной системе уравнений

$$\sum_{j=1}^n a_{kj} x_j = A_k$$

коэффициенты

$$a_{kj} \neq a_{jk}.$$

Составим преобразованную систему следующим образом.

Помножим каждое из уравнений на коэффициент при  $x_1$  и сложим. Получим таким образом первое уравнение преобразованной системы. Поступая таким же образом с другими неизвестными, получим и другие уравнения преобразованной системы, находящейся в  $j$ -ом столбце и  $k$ -ой строке,

$$\varepsilon_{kj} = \sum_{\mu=1}^n a_{\mu j} a_{\mu k}. \quad (3)$$

Элементы по главной диагонали

$$\varepsilon_{jj} = \sum_{\mu=1}^n a_{\mu j}^2, \quad (4)$$

т. е. являются просто суммой квадратов.

Из структуры уравнения (3) видно, что матрица  $\|\varepsilon_{kj}\|$  симметрична. Что касается правых частей ( $B_k$ ) преобразованной системы, то они выражаются через  $A_k$  следующим образом:

$$B_k = \sum_{\mu=1}^n A_{\mu} a_{\mu k}, \quad (5)$$

т. е. получаются путем суммирования по столбцам исходной системы. Составив эквивалентную схему для симметричной матрицы  $\|\varepsilon_{kj}\|$ , можно по указанному выше способу экспериментально определить обратную матрицу  $\|\beta_{kj}\|$ . Переход от  $\|\beta_{kj}\|$  к обратной матрице предложенной системы  $\|\alpha_{kj}\|$  осуществляется, как нетрудно убедиться, по формулам

$$\alpha_{kj} = \beta_{kj} \sum_{\mu=1}^n \alpha_{k\mu}. \quad (6)$$

Матрица  $\|\alpha_{kj}\|$  уже не будет симметричной, так как

$$\sum_{\mu=1}^n \alpha_{k\mu} \neq \sum_{\mu=1}^n \alpha_{\mu k}.$$

Таким образом, пользуясь расчетным столом переменного тока, можно решать любую систему линейных алгебраических уравнений с вещественными коэффициентами.

Во всех случаях, когда предложенная система несимметрична, необходима добавочная вычислительная работа. Хотя операции сами по себе очень просты, но при большом числе неизвестных они требуют значительной затраты труда и времени.

От указанных недостатков свободны приборы, основанные на кинематическом принципе. Классическим представителем этой группы приборов является прибор В. Томсона, воспроизведенный в Массачусетском технологическом институте в несколько ином конструктивном оформлении. Не приводя здесь описания прибора Томсона, которое имеется в других источниках [Л. 5,6], покажем, каким образом можно составить схему прибора для решения системы уравнений, основанного на кинематическом принципе — сложении вращательных движений<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Схема предложена Novak'ом (германский патент № 225756).

Рассмотрим для простоты систему из двух уравнений с двумя неизвестными

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = A_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = A_2.$$

Значение неизвестных  $x_1$  и  $x_2$  и правых частей  $A_1$ ,  $A_2$  будем представлять углом поворота надлежащим образом соединенных валов. Кинематическая схема, эквивалентная системе уравнений, показана на рис. 2. Вал I через зубчатые передачи с передаточным числом  $a_{11}$  и  $a_{21}$  связан с валами I и 2. Вал II через передачи с передаточным числом  $a_{12}$  и  $a_{22}$  связан с валами 3 и 4. Вал 5 соединен при помощи дифференциала (сумматора) с валами I и 3.

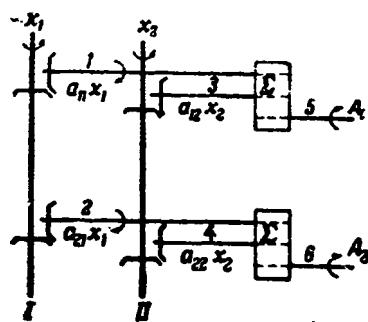


Рис. 2.

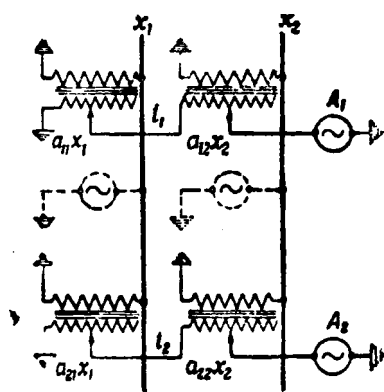


Рис. 3.

Точно так же соединен вал 6 с валами 2 и 4. Следовательно, углы поворота валов 5 и 6 равны сумме углов поворота валов I и 3 и соответственно — 2 и 4.

Повернем вал I на угол  $x_1$ , а вал II на угол  $x_2$ . Если  $x_1$  и  $x_2$  являются решением предложенной системы, то угол поворота вала 6 должен равняться  $A_1$ , а угол поворота вала 6 —  $A_2$ .

Очевидно, что если, наоборот, задать углы поворота валов 5 и 6 равными соответственно  $A_1$  и  $A_2$ , то валы I и II повернутся на углы, равные соответственно  $x_1$  и  $x_2$ , и, следовательно, таким путем можно, пользуясь этой кинематической схемой, решить систему уравнений.

Не представляет труда обобщить рассмотренную схему на случай произвольного числа уравнений. Никаких ограничений на коэффициенты уравнений при этом не накладывается. Важно лишь, чтобы определитель системы был отличен от нуля, так как в противном случае схема окажется заблокированной и, следовательно, нельзя будет задать отличные от нуля значения правых частей.

Достоинством рассмотренной механической схемы является высокая точность результатов, доставляемых ею. Эта точность определяется исключительно числом знаков, с которым набираются коэффициенты уравнений. Погрешности, обусловленные закручиванием валов и мертвым ходом передачи, можно сделать исчезающе малыми надлежащим выбором масштаба, т. е. большим числом оборотов участвующих в решении валов.

Существенным недостатком является сложность осуществления редуктора для установки коэффициентов. Например, при 3-декадном редукторе нужно иметь 12 передач и дифференциалов на каждый редуктор при трех различных типах передачи (1:1, 2:1, 4:1). Кроме того неизбежное трение

в механизмах, возрастающее вместе с числом уравнений, приводит к необходимости увеличения прочности валов и передач. Оба фактора накладывают некоторые ограничения на применимость подобной схемы для системы с большим числом уравнений, хотя определенную границу установить затруднительно.

Аналогом рассмотренной выше механической схемы является электрическая схема, в которой значения коэффициентов определяются передаточным числом трансформатора [Л. 7]. Как известно, идеальный трансформатор, у которого намагничивающий ток потери и рассеяние равны нулю, может рассматриваться как аналог жесткого рычага с отношением плеч равным отношению числа витков обеих обмоток трансформатора или зубчатой передачи с тем же передаточным числом. Пользуясь этими свойствами идеального трансформатора, составим схему для двух уравнений с двумя неизвестными<sup>3</sup>, показанную на рис. 3.

Передаточные числа трансформаторов I, II, III и IV выбраны в соответствии с коэффициентами предложенной системы уравнений, т. е. равны  $a_{11}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{12}$  и  $a_{22}$  (рис. 3). Первичные обмотки трансформатора, относящиеся к одной и той же переменной, соединены параллельно. Задав на этих обмотках некоторые напряжения  $x_1$  и  $x_2$ , получим на клеммах соединенных последовательно вторичных обмоток напряжения  $A_1$  и  $A_2$ . Обратное, если задать на клеммах вторичных обмоток напряжения  $A_1$  и  $A_2$ , то на первичных обмотках получим искомые напряжения  $x_1$  и  $x_2$ . Задавая напряжения раздельно — сначала  $A_1 = 1$  при  $A_2 = 0$ , а затем  $A_2 = 1$  при  $A_1 = 0$ , найдем элементы обратной матрицы, равные измеренным в обоих случаях напряжениям на «шинах»  $x_1$  и  $x_2$ . При этом следует иметь в виду, что напряжению следует приписать знак плюс, если оно в фазе с напряжением, приложенным извне ( $A_1$  и  $A_2$ ), и знак минус, если оно находится в противофазе.

Такова принципиальная схема прибора для решения системы алгебраических уравнений. Очевидно, что не представляет труда обобщить эту схему на случай произвольного числа уравнений<sup>4</sup>.

Нужно иметь в виду, что все рассуждения строго справедливы только для идеальных трансформаторов. В действительности всегда необходимо считаться как с намагничивающим током, так и с потерями и рассеянием. Влияние этих факторов сказывается тем сильнее, чем ближе к нулю определитель системы. При вычислении элементов обратной матрицы, как показано было выше, наложение прикладывается лишь к одной «строке» составленной из вторичных обмоток, в то время как клеммы остальных «строк» замкнуты накоротку. Мы имеем весьма разветвленную цепь, питаемую лишь из одного места. Ясно, что падение во всей цепи, отнесенное к приложенному напряжению, может составить значительную величину и сильно исказить результат. Сделать трансформатор «жестким» подобно зубчатым передачам в случае рассмотренной выше механической системы не представляется возможным.

<sup>3</sup> Схема составлена из двухобмоточных трансформаторов в соответствии с механической схемой рис. 2.

<sup>4</sup> Вместо двухобмоточных трансформаторов можно Маллоск<sup>у</sup> применить  $n$  трансформаторов с  $n + 1$  обмоткой на каждом.



Для  $A_2 = 0 \dots x_1 = \frac{3}{5} A_1$ .

Изобразим результат решения графически. Решение определяется абсциссой точки пересечения прямой  $y = x$  с прямой

$$y = -\frac{1}{5} A_1 + \frac{2}{3} x.$$

Итерационная схема для этого случая также показана на рис. 6 ломаной линией. Легко видеть, что, начав с произвольного значения  $x_1$ , мы, следуя итерационной схеме, всегда придем в точку пересечения обеих прямых. Процесс итерации сходится и схема с усилителями устойчива.

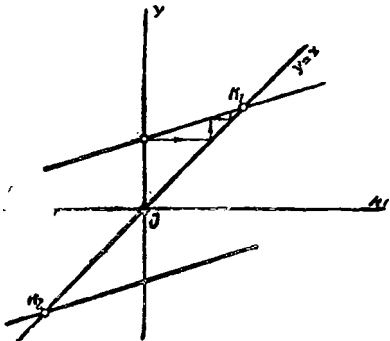


Рис. 6.

Нетрудно представить себе формально и механизм явления. Когда мы прикладываем некоторое напряжение  $A_1$  к клеммам первой строки (рис. 4), оно оказывается в первый момент целиком на входе усилителя. Как только появляется напряжение на шине  $x_1$ , изменяется и напряжение на входе усилителя. Если приращение этого напряжения *больше* напряжения, имевшего место в первый момент, то оно будет прогрессивно возрастать и в дальнейшем. Схема с усилителями оказывается в этом случае неустойчивой. Если же приращение напряжения на входе усилителя оказывается *меньше* напряжения первого момента, то схема устойчива и на шинах  $x_1$  и  $x_2$  установятся напряжения, численно равные корням системы.

Мы можем распространить результаты рассмотренного примера на общий случай системы из  $n$  уравнений. Вопрос, следовательно, сводится к сходимости итерационного процесса для схемы с усилителями по главной диагонали, т. е. для случая, когда система уравнений записана в виде (7). Известным из алгебры условиям сходимости итерации удовлетворяет не всякая система. Кроме того сходимость зависит и от порядка записи уравнений. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на применимость схемы с усилителями в качестве схемы прибора для решения системы алгебраических уравнений. Для универсального прибора такая схема, разумеется, непригодна, так как потребовалась бы значительная вычислительная ра-

бота по приведению предложенной системы к виду обеспечивающему сходимость итерации.

В тех случаях, когда сходимость обеспечена силу физической природы решаемой задачи и благодаря приведению системы к надлежащему виду, схема, подобная рассматриваемой выше может быть применена, но, разумеется, предпочтительнее отдать *компенсационной* схеме, к обладающей большей точностью и более прост

Таким образом введение усилителей вносит прибор, построенный на кинематическом принципе элементы, характерные для приборов, построенных на динамическом принципе. Одной и той же *системе уравнений* соответствуют *различные физические системы* в зависимости от порядка записи уравнения, причем часть из них неустойчива.

К тем же выводам можно, разумеется, прийти исследуя систему дифференциальных уравнений которой в действительности описывается поведение схемы с усилителями. При этом могут быть обнаружены дополнительные детали, связанные с возникновением автоколебаний. Поэтому проведенный анализ выявляет лишь условие „необходимо“ для устойчивости.

**Заключение.** Для построения приборов, механически решающих систему алгебраических линейных уравнений, могут быть использованы два принципа.

Приборы, построенные на динамическом принципе (модели), реализуются в виде электрических схем замещения реактивного  $n$  — полюсника и позволяют решать на расчетном столе переменного тока (при надлежащем преобразовании) любую систему совместных уравнений.

Из приборов, построенных на кинематическом принципе, наилучшим является по принципиальной схеме и точности прибор Новака, но практическая реализация его встречает серьезные трудности. Электрический аналог прибора Новака, предложенный Меллоком, весьма прост, но обладает ограниченной точностью. Кинематические схемы с усилителями в качестве универсальных приборов непригодны, а в тех частных случаях, когда они могут быть применены, уступают компенсационным схемам.

#### Литература

1. Л. И. Гутенмахер, Н. В. Корольков, В. А. Тафт. Электричество, № 4, 1945.
2. Л. И. Гутенмахер. Доклады АН СССР, т. 47, № 5, 1945.
3. Л. И. Гутенмахер. Известия ОН АН СССР, № 4, 1945.
4. H. B e d e. Z. angew. Math. Mechanik, стр. 213—233, 1937.
5. W. Thomson. Proc. of Royal Soc., 1876.
6. I. B. Wilbur. J. Franklin Inst., стр. 715, 1936.
7. M a l l o c k. R. R. M. Proc. Royal Soc. (London), стр. 457—483, 1933.



# Электрические модели для приближенного решения интегральных и интегродифференциальных уравнений

Кандидат техн. наук, доц. П. М. БЕЛАШ

Московский нефтяной институт

В статье на основе метода, предложенного в 1929 г. проф. С. А. Гершгориним и развитого проф. Л. И. Гутенмахером, строится электрическая модель (схема) для приближенного решения интегральных и некоторых интегродифференциальных уравнений; эта электрическая модель отлична от уже известных моделей для решения дифференциальных уравнений. В статье доказывается, что для решения интегральных уравнений с любыми ядрами применима одна и та же в принципе электрическая модель.

Указанный проф. С. А. Гершгориним в 1929 г. способ составления электрических моделей (сеток) для приближенного решения уравнения Лапласа был распространен в дальнейшем проф. Л. И. Гутенмахером [Л. 1] на основные виды уравнений математической физики. Этот метод как теоретически, так и практически может быть с успехом применен также для приближенного решения интегральных и интегродифференциальных уравнений. Ниже будет показано, что электрические модели интегральных уравнений конструктивно остаются неизменными для физических проблем, которые описываются вообще принципиально различными дифференциальными уравнениями. Для того чтобы не усложнить изложения, мы подробно рассмотрим принцип составления электрических моделей линейных интегральных уравнений для одномерных областей. Полученный способ без особого труда может быть распространен на области любого числа измерений.

Разобьем одномерную область  $ab$  на  $n$  равных интервалов величины  $h$  и потом каждую точку  $k$  области свяжем со всеми остальными точками области проводимостями  $hY_{ki}$ , где  $ik=1, 2, \dots, n$ , причем  $i \neq k$ . Кроме того проводимостями  $Y_k$  соединим узловые точки с нулевой точкой делителя напряжения  $OA$  (рис. 1) и к узлам схемы подадим токи  $I_k=f(x_k)$  от делителя напряжения  $OA$  через достаточно большие сопротивления. Будем считать, что проводимости  $Y_{ki}$  являются функциями двух точек, т. е.  $Y(x_k, t_i)=Y_{ki}$ , причем точку  $x$ , как это принято в анализе, назовем фиксированной точкой.

В результате составления такой схемы в узлах последней установится напряжение  $U(x)$ , являющееся функцией координаты  $x$ . Тогда на основе первого закона Кирхгофа для любой фиксированной точки  $x$  будем иметь следующее уравнение (в данном случае для узла 1):

$$-Y_1 U(x_1) + h \sum_{i=2}^{i=n} Y_{1,i} [U(t_i) - U(x_1)] + f(x_1) = 0, \quad (1)$$

$$i = 2, 3, \dots, n.$$

Устанавливаем проводимость стока  $Y_1$  такой, чтобы выполнялось условие

$$Y_1 = 1 - h \sum_{i=1}^{i=n} Y_{1,i}, \quad (2)$$

где  $h \sum_{i=1}^{i=n} Y_{1,i}$  включает горизонтальные проводимости, сходящиеся в узле 1, и кроме того величину  $Y_{11}=Y(x_1, x_1)$ .

Тогда уравнение (1) примет такой вид:

$$U(x_1) \left[ h \sum_{i=1}^{i=n} Y_{1,i} - 1 \right] + h \sum_{i=2}^{i=n} Y_{1,i} [U(t_i) - U(x_1)] + f(x_1) = 0 \quad (3)$$

или окончательно

$$-U(x_1) + h \sum_{i=1}^{i=n} Y_{1,i} U(t_i) + f(x_1) = 0. \quad (4)$$

В данном случае будет  $n$  таких уравнений, которые положены в основу теории линейных интегральных уравнений Фредгольма. Уравнение (4), написанное для любой фиксированной точки  $x$  в предположении, что  $n \rightarrow \infty$  или  $h \rightarrow 0$ , примет следующий вид:

$$-U(x) + \int_a^b Y(x, t) U(t) dt + f(x) = 0. \quad (5)$$

Таким путем нами показано, что, устанавливая на схеме рис. 1 проводимости  $hY_{ki}$  пропорциональными соответствующим значениям ядра, а проводимость стока в соответствии с формулой (2), можно получить приближенное решение интегрального уравнения Фредгольма с заданным параметром, в данном случае с параметром  $\lambda=1$ . В дальнейшем

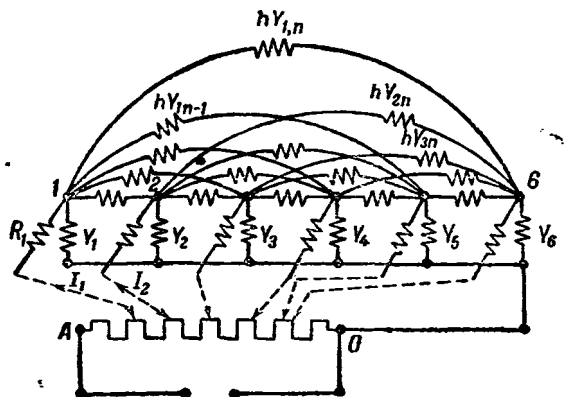


Рис. 1. Схема для решения интегральных уравнений с симметричными ядрами.

такие схемы будем называть „моделями интегральных уравнений“.

В практике может оказаться, что ядро  $Y(x, t)$  уравнения (5) в области  $ab$  является существенно положительным и если выполняется условие, вытекающее из равенства (2), а именно

$$Y_k = 1 - h \sum_{i=1}^{i=n} Y(x_k, t_i) > 0$$

или

$$\sum_{i=1}^{i=n} h Y(x_k, t_i) < 1,$$

то модель можно осуществить на одних чисто активных сопротивлениях. Во всех остальных случаях модель следует осуществлять на индуктивностях и емкостях.

Описанные модели также применимы для решения уравнений Фредгольма первого рода, некоторых интегральных уравнений с несимметричными регулярными ядрами, интегродифференциальных уравнений и некоторых интегральных уравнений с нерегулярными ядрами.

Наконец, как будет показано ниже, та же схема рис. 1 применима для решения уравнений Вольтерра, если в цепь горизонтальных проводимостей включить усилители с постоянными коэффициентами усиления.

Модели неоднородных интегральных уравнений Фредгольма первого рода. Если проводимость стока для любой точки  $k$  примем

$$Y_k = -h \sum_{i=1}^{i=n} Y_{ki}, \text{ где } i=1, 2, \dots, n,$$

то уравнение (1) примет такой вид:

$$h \sum_{i=1}^{i=n} Y_{ki} U(t_i) + f(x_k) = 0.$$

В предельном случае для любой фиксированной точки окончательно получим:

$$\int_a^b Y(x, t) U(t) dt + f(x) = 0,$$

что и требовалось показать.

Решение некоторых интегральных уравнений с несимметричными регулярными ядрами. В вопросах математической физики встречаются интегральные уравнения

$$U(x) + \int_a^b H(x, t) U(t) dt + f(x) = 0, \quad (6)$$

ядро которых несимметрично, т. е.  $H(x, t) \neq H(t, x)$ .

В тех случаях, когда ядро  $H(x, t)$  может быть представлено в виде произведения двух функций

$$H(x, t) = Y(x, t) \mu(t),$$

где  $Y(x, t) = Y(t, x)$ , т. е. функция симметрична, уравнение (6) может быть представлено так:

$$\mu(x) U(x) + \int_a^b Y(x, t) \mu(t) \mu(x) U(t) dt + \mu(x) f(x) = 0;$$

решение его можно осуществить на моделях разобранном выше способом.

**Решение интегродифференциальных уравнений на моделях.** Пусть имеется интегродифференциальное уравнение

$$U(x) = \int_a^b Y(x, t) \frac{dU(t)}{dt} dt$$

с заданными граничными условиями  $U(a) = U_1$ ,  $U(b) = U_2$ .

На основе формулы интегрирования по частям правая часть уравнения (7) может быть написана в следующем виде:

$$\int_a^b Y(x, t) \frac{dU}{dt} dt = U(t) Y(x, t) \Big|_{t=a}^{t=b} - \int_a^b Y'_t(x, t) U(t) dt.$$

Так как

$$U(t) k(x, t) \Big|_{t=a}^{t=b} = f(x)$$

представляет известную функцию, то уравнение (7) приобретает вид:

$$U(x) = - \int_a^b Y'_t(x, t) U(t) dt + f(x).$$

Решение полученного уравнения осуществляет описанным выше способом, если ядро  $Y'_t(x, t)$  симметрично или может быть приведено к симметричному.

Способ может быть применен для случая  $\frac{d^n U}{dt^n}$ .

Электрические модели интегральных уравнений Вольтерра. Как известно, ядро интегрального уравнения Вольтерра

$$U(x) = \int_a^x H(x, t) U(t) dt + f(x)$$

в области  $(ax)$  определяется следующим образом

$$H(x, t) = Y(x, t) \text{ для } t \leq x$$

и

$$H(t, x) = 0 \text{ для } t > x.$$

Схема модели принципиально остается той же, как на рис. 1, только в цепь горизонтальных проводимостей следует включить усилители с постоянным и равным коэффициентом усиления, как это показано на рис. 2.

Доказательство аналогично приведенному выше. Возможно дальнейшее упрощение схемы рис. 2. Поскольку напряжения на входе усилителей одного и того же узла, а также и напряжения на выходе равны, то совершенно очевидно, что усилители одного и того же узла можно заменить одним усилителем, выход которого соединяется со всеми остальными точками схемы, как показано на рис. 3. Этим собственно и решается принципиально вопрос о моделировании интегрального уравнения с несимметричным ядром, поскольку интегральное уравнение Вольтерра можно рассмат-

считать как частный случай уравнения Фредгольма резко выраженной несимметрией ядра<sup>1</sup>.

Решение интегральных и интегродифференциальных уравнений с нерегулярными ядрами. В описанных схемах можно получить приближенное решение интегральных и интегродифференциальных уравнений, ядра которых в точках  $x=t$  не ограничены. Для этого обратимся к исходному уравнению (3), которое в предельном случае предстает так:

$$U(x) \left[ \int_a^b Y(x,t) dt - 1 \right] + \int_a^b Y(x,t) [U(t) - U(x)] dt + f(x) = 0.$$

Это уравнение представляет известную вычислительную схему Л. В. Конторовича [Л. 2], которая исключает особенность в точке  $x=t$  благодаря наличию разности  $[U(t) - U(x)]$ . Это же вытекает из свойств всех рассмотренных схем. В некоторых случаях могут быть применены и другие способы исключения особенностей в точках  $x=t$ . Например, если рассматривать интегральное уравнение, ядро которого имеет форму

$$Y(x,t) = \frac{H(x,t)}{|x-t|^\alpha},$$

где  $H(x,t)$  — регулярная функция, то на основе метода Гильберта [Л. 3] можно получить решение для случая  $\alpha < \frac{1}{2}$ . Для этого заменяют данное

ядро  $Y(x,t)$  функцией  $Y_0(x,t)$ , равной всюду  $Y(x,t)$  кроме точек  $x=t$ , где  $Y_0(x,x) = 0$ . Это условие можно очень быстро осуществить на моделях. Для этого необходимо в выражении формулы (2) комбинацию  $Y(x,x)$ , входящую под знак суммы, принять равной нулю ( $hY_{kk} = 0$ ). Тем самым автоматически исключается особенность в точке  $x=t$ .

Следует упомянуть, что модели, имеющие явно обратную связь, не применимы для решения нере-

<sup>1</sup> После нашего сообщения на семинаре лаборатории Л. И. Гутенмахера указал на возможность применения его схем с усилителями для решения также и интегральных уравнений.

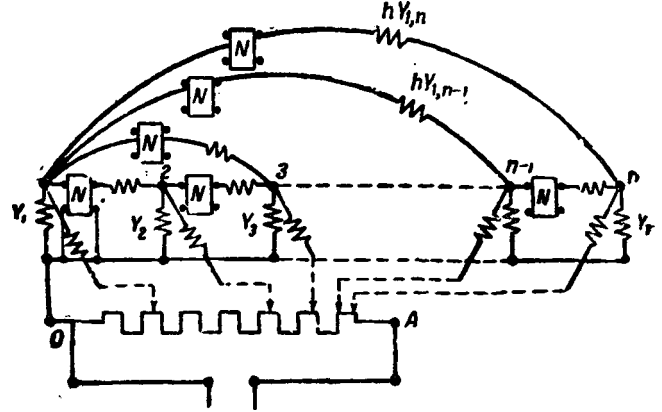


Рис. 2. Схема с направленной связью для решения уравнения Вольтерра.

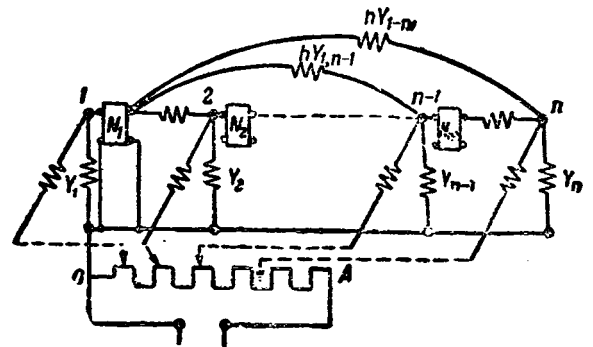


Рис. 3. Упрощенная схема с направленной связью для решения уравнения Вольтерра.

гулярных интегральных уравнений, хотя физически такая связь может быть осуществлена на моделях с усилителями (рис. 2 и 3).

Принцип рассмотренных схем таков, что во многих случаях неограниченность ядер в точках  $x=t$  исключается автоматически.

#### Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование. Изд. Академии наук СССР, 1943.
2. Л. В. Конторович. Математический сборник, т. 41, вып. 2.
3. И. И. Привалов. Интегральные уравнения, стр. 83. Изд. ОНТИ, 1935.

# Электромагнитные расчеты на интеграторе

Доктор техн. наук Л. И. ГУТЕНМАХЕР, инж. Л. Г. КОГАН, инж. И. Н. ПОПОВ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

В статье приведены результаты первого этапа работы по исследованию и расчету электромагнитных полей на электроинтеграторе. В ней показаны методы решения известных задач Роговского, Стивенсона и Парка, Рота и др., систематизированных в трудах Хэга.

На основе полученных результатов имеется возможность создать скоростные методы исследования и расчета электромагнитных полей, механических усилий и тепловых режимов работы аппаратов и машин.

В работах Л. И. Гутенмахера и Ю. Г. Толстова [Л. 1—6] был описан метод искусственного моделирования физических явлений при помощи многомерных цепей (сеток), составленных из сосредоточенных параметров  $R, L, C$ . Настоящая статья посвящена применению этого метода для расчета магнитных полей в электрических машинах и аппаратах, содержащих железо, и сравнению его с существующими методами электромагнитных расчетов, систематизированными в работах Хэга [Л. 7 и 8].

1. Методы построения сеточных областей и задания граничных условий<sup>1</sup>. При решении задач необходимо прежде всего выбрать на интеграторе сеточную область, которая заменяет исследуемую область поля. При этом желательно для увеличения точности решения использовать возможно большую часть сетки интегратора, так как погрешность уменьшается примерно пропорционально  $h^2$  (где  $h = \Delta x = \Delta y$ ). Поэтому следует обратить внимание на условия симметрии области и заданных на ней граничных условий. Если эти условия дают возможность определить, где находится изолинии векторного потенциала ( $A_z = \text{const}$ ) и линии тока

$\frac{\partial A_z}{\partial n} = 0$ , то можно выделить по этим линиям отдельные части заданной области, задавая на краях этих частей соответствующие граничные условия. Там, где проходят изолинии, необходимо замкнуть накоротко узловые точки и задать им определенное напряжение ( $U = \text{const}$ ), а по линиям тока установить двойное сопротивление.

Приведем пример. На рис. 1а показано поле рассеяния в броневом трансформаторе в трактовке Роговского (Хэг, стр. 265<sup>2</sup>).

По условиям задачи нетрудно определить, что линии индукции нормальны осям симметрии  $O_e - O_e$ , где  $l = 0, 1, 2 \dots 6$ , и поэтому вдоль этих осей  $\frac{\partial A_z}{\partial n} = 0$ . Следовательно, для решения задачи Роговского достаточно воспроизвести на интеграторе только часть окна трансформатора, выделенную на рис. 1а пунктиром и отдельно показанную на рис. 1б.

Если катушки I и II одинаковы (рис. 1в), то, как известно, линия индукции ( $A = \text{const}$ ) направлена вдоль оси симметрии  $S - S$  (рис. 1в). Следовательно, при этом условии равенства размеров катушек можно уменьшить вдвое рассматриваемую область, задавая по линии  $S - S$  на модели постоян-

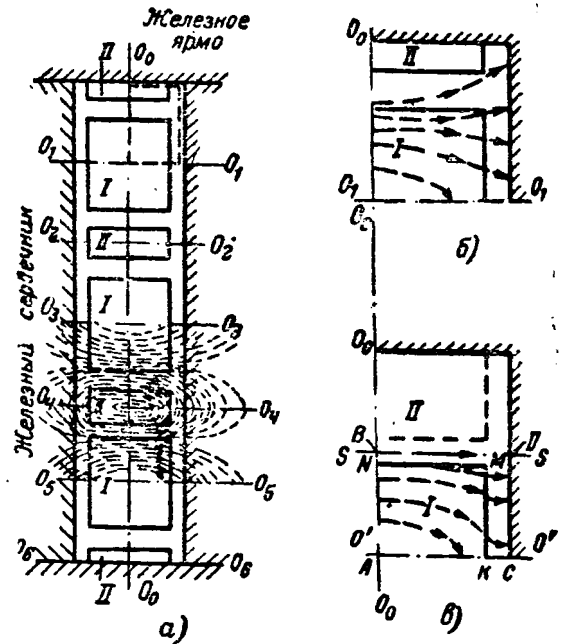


Рис. 1.

ное по величине напряжение  $U = \text{const}$ . Таким образом остается наложить выбранную область  $ABDC$  на сетку интегратора, приняв определенную константу подобия. Наложение можно осуществить, например, способами, показанными на рис. 2а и 2б. По аналогии с обозначениями Т- и П-образных схем соединения четырехполюсников назовем схему рис. 2а П-образной, а схему рис. 2б I-образной. Схемы отдельных элементов, из которых составлены модели, изображены соответственно на рис. 2в и 2г. Истоки задаются в узловые точки сетки, которые на рис. 2а показаны сплошными точками.

В соответствии со свойствами П-образной схемы, по контуру  $AKMN$  (кроме угловых точек  $A, K, M$  и  $N$ ) истоки задаются вдвое меньшими, а в узловые точки  $A, K, M$  и  $N$  четверо меньшими, чем истоки в узловые точки внутри этого контура.

Таким образом для решения задачи Роговского необходимо выделить на сетке прямоугольную область  $ABDC$ , задать в указанные узловые точки истоки и установить по краям этой области следующие граничные условия:

По сторонам  $AC, AB$  и  $CD$  сопротивления должны быть поставлены вдвое больше внутренних.

В узловых точках на стороне  $BD$  необходимо подвести одно напряжение  $U = \text{const}$ .

<sup>1</sup> Приняты те же допущения и ограничения, что и в книге Хэга [Л. 8].

<sup>2</sup> Номера страниц указаны по книге Хэга [Л. 8].

величины напряжений, которые появляются при этих условиях в сетке, будут соответствовать результатам решения задачи Роговского. На интеграторе можно определить непосредственно изолинии. Эта задача была решена на интеграторе. Результаты измерений практически совпали с данными расчета.

**Задача ж.** Катушка из двух слоев тока на одной из двух плоско-параллельных поверхностей железа (стр. 166).

**Задача з.** Большое число шин прямоугольного сечения, равномерно распределенных в воздушном зазоре между двумя параллельными плоскостями железа (стр. 253).

**Задача и.** Поле линейного тока в пазах бесконечно большой глубины (стр. 167).

**Задача к.** Поле рассеяния у основания выступающего полюса (стр. 170).

**Задача л.** Поток рассеяния между шунтовыми обмотками электрических машин (стр. 251 и 268).

**Задача м.** Поля рассеяния в броневых трансформаторах (стр. 265).

**Задача н.** Поля рассеяния в стержневых трансформаторах (стр. 258 и 274).

Условия решения этих задач на интеграторе отличаются только граничными условиями и тем, что истоки задаются в различные узловые точки одной и той же сеточной области.

Для задания краевых условий в задачах а, б, в, г, е и з используются линии симметрии и то обстоятельство, что на некотором расстоянии от провода линии индукции представляют собой почти нормали к поверхностям железа. Поэтому можно ограничить область моделирования этими линиями и вдоль них замкнуть сопротивление сетки коротко (рис. 3).

В задачах д и ж воздушный зазор справа от

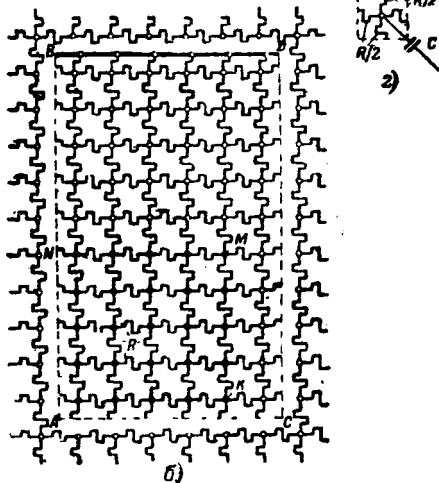
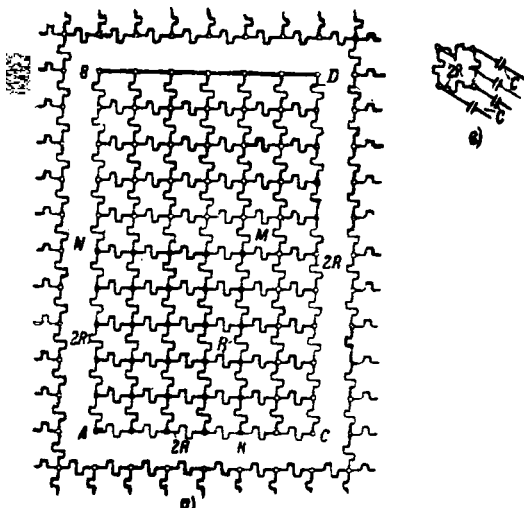


Рис. 2.

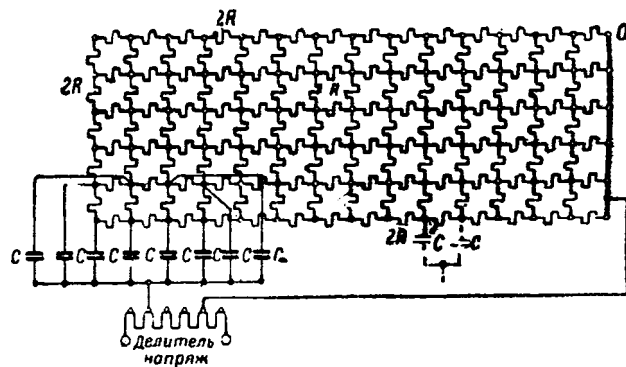


Рис. 3.

Покажем далее, как все задачи, систематизированные в книге Хэга, могут быть решены на электроинтеграторе. Для этого объединим различные задачи в 3 группы.

**Группа 1.** Прямолинейный токнесущий провод (или катушка) в воздушном зазоре между стенками железа бесконечно большой проницаемости.

**Задача а.** Линейный ток в середине между двумя плоско-параллельными поверхностями железа (стр. 146).

**Задача б.** Линейный ток не в середине между двумя плоско-параллельными поверхностями железа (стр. 155).

**Задача в.** Линейный ток на одной из двух плоско-параллельных поверхностей железа (стр. 158).

**Задача г.** Слой тока на одной из двух плоско-параллельных поверхностей железа (стр. 163).

**Задача д.** Катушка на одной из двух плоско-параллельных поверхностей железа (стр. 160).

**Задача е.** Периодически распределенные витки на одной из двух плоско-параллельных поверхностей железа (стр. 162).

истоков замещается сеткой на возможно большем расстоянии от части области, занятой истоками (рис. 3, пунктир).

Для задач и, к, л, м различные граничные условия задаются на сеточной области, показанной на рис. 2а.

**Задача н** решается как задача с обмоткой внутри области, замкнутой со всех сторон железом (т. е. броневой трансформатор), если сделать те же допущения, как у Хэга, т. е. пренебречь слабым полем у наружной стороны сердечника.

**Группа 2.** Магнитное поле прямолинейного проводника при различных формах сечения.

**Задача а.** Проводник круглого сечения (стр. 238).

**Задача б.** Проводник прямоугольного сечения (стр. 243, 248).

**Задача в.** Проводник в виде тонкой пластинки (стр. 245).

**Задача г.** Проводник с сечением в виде равносностороннего треугольника (стр. 250).

**Задача д. Проводник эллиптического сечения** (стр. 250).

Все эти задачи также решаются на электроинтеграторе. Выберем на сетке интегратора область, соответствующую сечению проводника так, чтобы эта область заняла наименее возможную часть сетки, не искажая формы сечения.

На достаточно большом расстоянии от „сечения проводника“ изолинии практически почти не зависят от формы его и представляют собой концентрические окружности.

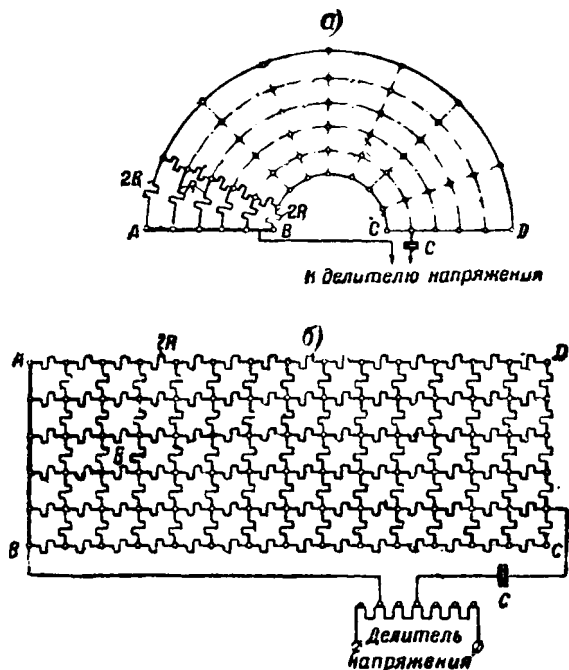


Рис. 4.

Замкнем по такой окружности вокруг „проводника“ сопротивления сетки (на возможно большем расстоянии от „сечения“) и зададим на эту окружность значение векторного потенциала, определенного расчетом, считая, что проводник имеет круглое сечение. На расстоянии, в два-три раза более близком к „сечению“, чем внешняя окружность, определим изолинию, а затем, увеличив соответственно масштаб, построим эту изолинию так, чтобы она стала внешней и охватила большую часть поля интегратора. Увеличивая подобным образом масштаб несколько раз, можно занять „проводником“ почти всю сеточную область интегратора и получить возможность изучать поля вблизи проводника и внутри него при найденных на интеграторе граничных условиях [Л. 4].

В тех задачах, где рассматриваются проводники с относительно большой проницаемостью по сравнению с  $\mu=1$ , по контуру проводника задаются напряжения  $U=const$ .

Группа 3. Магнитное поле линейных токов или слоев тока в воздушном промежутке, ограниченном двумя коаксиальными круговыми цилиндрами из железа (стр. 186—207).

Большой класс задач, подходящих под это определение, легко решается применением цилиндрических координат. Описание методики применения криволинейных координат для решения задач на интеграторе дано в работе Л. И. Гутенмахера [Л. 1].

На рис. 4а показана одна из задач этой группы, магнитное поле одного прямолинейного проводника (стр. 198), а на рис. 4б—выбор области и заданные граничные условия на прямолинейной сетке интегратора с применением цилиндрических координат. Небольшое усложнение по сравнению с прямыми координатами вносится только тем, что численная величина истоков в случае цилиндрических координат зависит от координат точек, которые задаются эти истоки.

Этими тремя, легко моделируемыми группами охватываются в основном все приведенные у Хэга задачи.

Ниже приводятся результаты решения двух задач, имеющих у Хэга, и одной с некоторыми усложнениями (по сравнению с аналогичной задачей у Хэга).

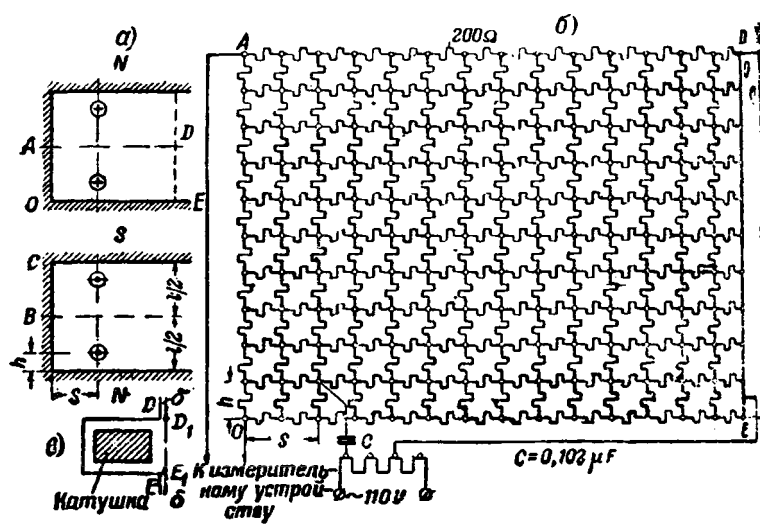


Рис. 5.

**2. Решение задач. Задача № 1. Определение поля рассеяния у основания выступающего полюса** (стр. 170—172).

На рис. 5а показано междуполюсное расстояние между последовательными полюсами для „развернутой“ динамомашины с явно выраженными полюсами. Ось машины нормальна к плоскости чертежа, и размер машины в этом направлении предположен неограниченным. Сердечники полюсов параллельны между собой и простираются от ядра (слева) вправо до бесконечности. Мы приняли, что железо ядра и сердечника имеет неограниченную большую проницаемость. Пока примем, что каждый сердечник возбуждается одним „витком“, состоящим из прямого и обратного проводов, параллельных, бесконечно длинных, несущих ток в  $i$  абсолютных единицах (Хэг, стр. 170—171).

Учитывая, что ось  $AD$  является осью симметрии, моделируем на интеграторе область  $OADE$  (рис. 5б). Все сопротивления внутри области устанавливаем по  $100 \Omega$ , а по границам области по  $200 \Omega$ . Погрешность в установке реостатов примерно находится в пределах  $\pm 3\%$ . Питание сетки производится от сети переменного тока  $110 \text{ V}$  через делитель напряжения. Емкость, через которую задавался исток,  $C=0,102 \mu\text{F}$ . Принято  $l=20$  реостатов. Координаты истока  $h, s$  изменялись.

На рис. 6а приведены кривые  $\Phi; i=f\left(\frac{s}{l}\right)$  при

$\delta = 0, 0,05; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25$ , построенные по формуле Хэга<sup>3</sup>, и нанесены точки, полученные решением задачи на интеграторе. Как видим, эти точки совпадают. На рис. 65 приведены кривые, построенные по той же формуле, и нанесены точки, полученные на интеграторе при задании истоков

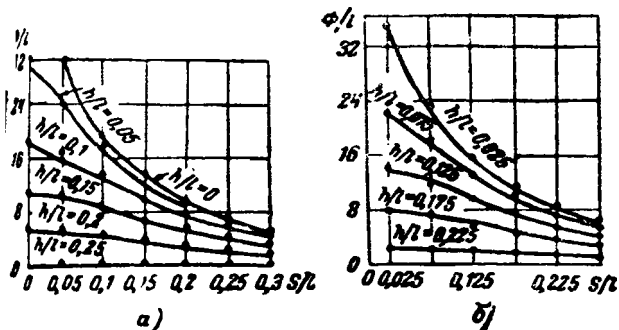


Рис. 6.

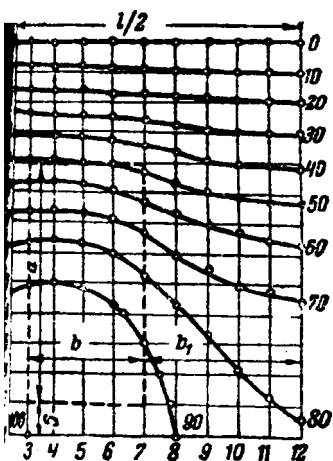


Рис. 7.

набираемая на интеграторе область — та же, что и для задачи № 1 (рис. 5б). Различие заключается только в соотношении сторон  $AD$  и  $AO$  и в количестве точек, в которые задаются истоки. Снятые на интеграторе изолинии показаны на рис. 7.

Совершенно ясно, что рис. 7 может изображать поле рассеяния не только от катушек возбуждения в междуполюсном пространстве, но и от обмотки, вложенной в глубокий паз, если согласиться с ... не совсем верным<sup>4</sup>... предположением Хэга (стр. 273), что «на уровне отверстия паза индукционные линии проходят через паз прямолинейно и нормально к его стенкам<sup>4</sup>». Насколько верно это предположение, видно из решения задачи № 3.

Задача № 3. *Определение поля рассеяния в пазах машин с учетом междужелезного пространства* (рис. 5в). Так как величина междужелезного пространства весьма мала по сравнению с размерами паза и выступа, можно считать, что линии индукции в междужелезном пространстве  $\delta$  прямолинейны и нормальны к железным плоскостям.

$$\frac{1}{4} \Phi_{A=0} = \ln \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi s}{l} + \cos \frac{2\pi h}{l}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi s}{l} - \cos \frac{2\pi h}{l}} \right]$$

Следовательно, зазоры  $\delta$  являются только дополнительными (но относительно весьма значительными) сопротивлениями для линий индукций. Поэтому они могут быть заменены на модели дополнительными сопротивлениями, через которые должны быть поданы истоки в точки  $D$  и  $E$ . При этом  $D$  и  $D'$  и соответственно  $E$  и  $E'$  сливаются и в

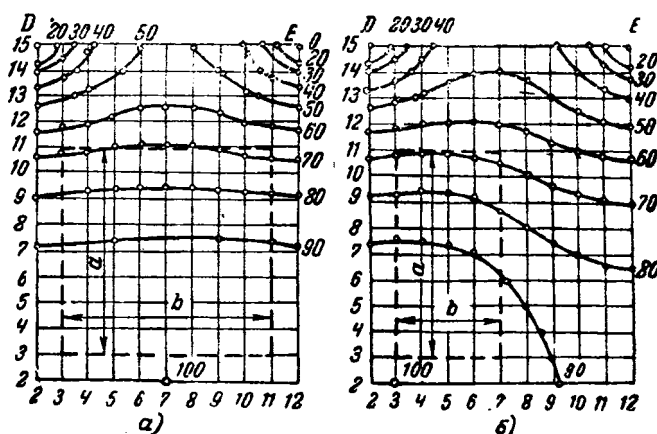


Рис. 8.

отличие от рис. 5б, где сопротивления по линии  $DE$  замкнуты накоротко, сопротивления по линии  $DE$  набираются идентично с остальными тремя линиями, т. е. по 200  $\Omega$ . Кривые поля, снятые на интеграторе для этого случая, показаны на рис. 8а и 8б.

Как видно из результатов решения, допущение Хэга (задача Рота) не является верным для неглубоких пазов.

3. *Оценка погрешности решения.* Погрешности решения задач на интеграторе в основном складываются из погрешностей разностного метода, погрешностей в установке параметров модели, задания истоков и граничных условий. Погрешности измерения компенсационным способом сравнительно весьма мала и ею можно пренебречь. Оценка погрешности в общем случае получается из сравнения результатов решения данной задачи при вариации шага разностей  $\Delta x$  и  $\Delta y$  и условий задания истоков, а также напряжений и токов по контуру области.

Изменяя число элементов модели в  $n_1, n_2, n_3$  раз, можно оценить влияние шага разности по результатам получаемых при этом результатов решения

$$U_1(x, y), U_2(x, y), U_3(x, y).$$

Практически можно считать, что задачи по определению векторного потенциала, систематизированные Хэгом, решаются на существующем в ЭНИИ<sup>5</sup> интеграторе с погрешностью, не превышающей 3%.

#### Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование. Изд. Академии наук СССР, 1943.
2. Л. И. Гутенмахер. Доклады Академии наук СССР, т. XXVII, № 3, 1940.
3. Л. И. Гутенмахер. Электричество, № 5, 1940.
4. Л. И. Гутенмахер. Журнал технической физики, т. XII, вып. 2—3, 1942.
5. Ю. Г. Толстов. Известия ОТН Академии наук СССР, вып. 7—8, 1944.
6. Ю. Г. Толстов. Журнал технической физики, т. XII, вып. 10, 1942.
7. В. Нагье. Methodes analytiques graphiques et experimentales. Comptes rendus du Congrès international d'électricité Paris, 1932.
8. В. Хэг. Электромагнитные расчеты, Госэнергоиздат, 1934.

# Проблема высокочастотного транспорта

Доктор техн. наук, проф. А. А. ПИСТОЛЬКОРС

*В статье рассматривается проблема высокочастотного транспорта как с технической, так и с экономической точек зрения. Приводятся соображения о месте этого вида транспорта в системе городского транспорта и о направлениях, в которых следует вести разработку проблемы. Печатается в порядке обсуждения.*

За последние два года в советской технической и научно-популярной литературе появился ряд статей, посвященных высокочастотному бесконтактному транспорту и работам в этой области доктора техн. наук Г. И. Бабата [Л. 1, 2, 3, 4]. Благодаря этим статьям и ряду успешных демонстраций идея нового вида транспорта получила у нас широкое распространение.

Мысли о беспроводной передаче энергии и в частности для целей транспорта высказывались неоднократно уже с начала текущего столетия; первая четкая формулировка идеи высокочастотного транспорта принадлежит Леблану, сделавшему в 1922 г. во Французской Академии наук сообщение на тему: «Об электрификации железных дорог при помощи переменных токов повышенной частоты» [Л. 5]. Однако предложение Леблана касалось лишь рельсового транспорта.

Кроме сообщения Леблана новых работ, посвященных рассматриваемой проблеме, в иностранной технической литературе, насколько нам известно, не появлялось.

В Советском Союзе вопрос о реализации бесконтактного высокочастотного транспорта впервые был поставлен автором. В 1938 г. им была опубликована статья [Л. 6], в которой расчетами обосновывалась возможность бесконтактной передачи мощностей, необходимых безрельсовому высокочастотному транспорту, рассматривались детали его выполнения и возникающие при этом задачи и ставился вопрос о применении его в условиях нашего народного хозяйства.

В том же году по инициативе и под руководством автора при одном из научно-исследовательских институтов была организована комплексная бригада специалистов для разработки вопросов, связанных с реализацией высокочастотного транспорта. Бригада детально рассмотрела эту техническую проблему и провела подробное технико-экономическое исследование вопроса. Основные выводы этой работы будут изложены дальше.

В начале 1939 г. результаты работы бригады обсуждались в Комиссии радиосвязи при Академии наук СССР под председательством доктора техн. наук, проф. И. Г. Кляцкина при участии представителей Наркомхоза РСФСР. Несмотря на интерес, вызванный работой, предложения автора о постройке опытной линии высокочастотного транспорта этой комиссией поддержаны не были.

В 1940 г. Всесоюзный угольный институт (ВУГИ) заключил с Ленинградским институтом инженеров связи соглашение на разработку системы бесконтактной шахтной электровозной откатки (для шахт с наличием взрывчатых газов). В связи с тем, что работы велись в области низких и в частности звуковых частот, они в значительной мере проводились в Ленинградском электротехническом

институте им. Ленина (ЛЭТИ), при участии члена корреспондента Академии наук СССР В. П. Волгодина в качестве консультанта. Начавшаяся в 1941 г. война прервала эти работы.

Новый этап в развитии проблемы высокочастотного транспорта начался с того момента, когда в это дело включился доктор техн. наук Г. И. Бабат, впервые продемонстрировавший в 1943 г. движущийся экипаж, питаемый токами высокой частоты.

В 1944 г. на станкостроительном заводе им. Орджоникидзе, в Москве им была испытана линия высокочастотного транспорта протяжением 300 м, работающая на частотах порядка 30–80 кГц.

Успешные демонстрации Г. И. Бабата, а также большая работа, проведенная им по популяризации идеи нового вида транспорта, приблизили нас к реализации опытной линии высокочастотного транспорта. В настоящее время в Киевском политехническом институте, под руководством доктора техн. наук, проф. С. И. Тетельбаума, ведется разработка уже отдельных принципиальных вопросов, в зависимости от разрешения которых будет решаться вопрос о постройке опытной линии в Киеве. Мы считаем, что наступило время уточнить направления, в которых следует вести разработку проблемы высокочастотного транспорта. Этому вопросу и посвящается настоящая статья.

Основания для расчета системы высокочастотного транспорта. Основные элементы системы высокочастотного транспорта к настоящему времени можно считать уже выкристаллизовавшимися. Это, с одной стороны, — питающая сеть с системой высокочастотных подстанций, с другой, — экипаж со своим электротехническим и вспомогательным оборудованием. Экипаж должен быть снабжен приемной антенной, в которой питающая сеть наводит э. д. с.  $E$ , пропорциональную току в сети  $I_1$ , угловой частоте  $\omega$  и коэффициенту взаимной индукции  $M$  между сетью и приемной антенной

$$E = j\omega M I_1.$$

Коэффициент  $M$  меняется в зависимости от положения экипажа по ширине улицы. Для различных положений он может быть вычислен, пользуясь разработанной автором теорией электрически связанных линий [Л. 7, 8].

Ток в приемной антенне при настройке ее на резонанс будет

$$I_2 = \frac{E}{r_2} = j \frac{\omega M I_1}{r_2},$$

где  $r_2$  — активное сопротивление цепи приемной антенны, состоящее из сопротивления собственной антенны  $r_A$  (вредное сопротивление) и сопротивления полезной нагрузки  $r_n$ .



Обозначим через  $\eta_A$  к. п. д. приемной антенны;

$$\eta_A = \frac{r_n}{r_n + r_A} = \frac{r_n}{r_2}.$$

Полезная мощность, отбираемая экипажем от нее, будет

$$P_2 = I_2^2 r_n = \frac{\omega^2 M^2 I_1^2}{r_A} \eta_A (1 - \eta_A).$$

Величину максимальной мощности, которая должна быть таким образом отобрана, мы можем определить, разделив пиковые мощности существующих двигателей экипажей городского транспорта к. п. д. всего приемного электрооборудования на высокочастотном питании; как увидим далее, величина должна быть взята порядка 60—70%. Таким путем получим: для легковой машины  $P_2 = 50$  kW, для грузовой машины  $P_2 = 100$  kW и для экипажа типа троллейбуса  $P_2 = 150$  kW, т. е. довольно значительные мощности.

Задавая размеры экипажа и его предельное сопротивление от питающей линии, мы тем самым задаем  $M$ . Следовательно, при заданном к. п. д. приемной антенны  $\eta_A$  и токе в питающей линии  $I_1$  отбираемая экипажем мощность определяется отношением  $\frac{\omega^2}{r_A}$ .

Задачей конструирования приемной антенны является получение минимально возможного ее сопротивления. Когда такое сопротивление достигнуто, для обеспечения отбора заданной мощности приемной антенне приходится идти на повышение частоты. Таким образом частота тока, которым питается сеть, будет зависеть от предельных отношений и размеров экипажа, отбираемой им мощности и заданного к. п. д. приемной антенны. Но кроме того при определении частоты должны быть приняты во внимание и потери в питающей сети. Видимому, оптимальные частоты должны лежать в пределах 100—1000 kHz.

Рассмотрим теперь более подробно частные задачи, возникающие при реализации высокочастотного транспорта отдельно для передающей и приемной части.

**Проблемы питающей системы.** Проблемы питающей системы в основном сводятся к рациональному устройству питающей сети, устройству подстанций и борьбе с вредными влияниями сети.

За недостатком места не имеется возможности остановиться подробно на всех перечисленных проблемах. Поэтому в отношении подстанций следует отметить лишь то, что к генераторам высокой частоты должны быть предъявлены требования возможно более высокого к. п. д. при непрерывно меняющейся нагрузке и все это — в условиях больших мощностей, исчисляемых сотнями и тысячами ватт. Для дальнейших ориентировочных подсчетов, учитывая состояние техники современных импульсных генераторов, можно принять к. п. д. подстанции равным 70%.

Что касается вредных влияний питающей сети, то сюда следует отнести влияние электромагнитного поля этой сети на установку слабого тока и в частности на радиоприемники, а также на здоровье людей и животных, попадающих в зону воздействия его. На наш взгляд эта проблема не является принципиальной. Она должна решаться примени-

тельно к намеченному типу питающей сети. Несомненно, что средства для защиты электрослаботочных установок и здоровья людей могут быть найдены. Необходимый для этого объем работы может быть определен только в результате экспериментального исследования, которое единственно и может выяснить, насколько основательны высказываемые в этом отношении подчас чрезмерные опасения.

Центральной проблемой в рассматриваемой группе вопросов следует признать проблему рационального устройства питающей сети. Сеть эта мыслится в виде системы параллельных двухпроводных линий, подвешенных на высоте 4—5 м над землей или зарытых в землю непосредственно у ее поверхности. В этой проблеме встречается ряд требующих своего разрешения вопросов, одним из которых является создание в сети одинакового подлине распределения тока. Сама же проблема возникает потому, что без специальных мероприятий в питающей линии будет устанавливаться синусоидальное распределение тока. В качестве мероприятия, выравнивающего ток, обычно рекомендуется применение соответственно рассчитанных конденсаторов, включаемых в линию через четверть волны. Однако это довольно дорогое мероприятие, так как конденсаторы должны выдерживать напряжение порядка 15—20 kV, а число их при короткой волне должно быть велико.

Следует указать, что равномерное поле вдоль линии может быть получено и другими способами и в частности оригинальным способом доктора техн. наук, проф. М. С. Неймана, имитирующим бегущую волну в линии.

Наиболее существенным является вопрос о снижении потерь в питающей линии, которая в отличие от современных троллейбусных линий должна все время находиться под током, если только не будет предусмотрено приспособлений, автоматически управляющих током в линии в зависимости от наличия пользующихся ею экипажей. Основными потерями следует считать не джоулевы потери в проводах линии, а потери за счет токов, наведенных в окружающих линию проводниках и в частности в земле. Работы, проводимые сейчас Г. И. Бабат, ориентируются на укладку питающей линии в землю. Этот вариант представляется очень заманчивым, так как он устраняет неудобную воздушную проводку и позволяет до предела приблизить приемную антенну (рамку) к питающим проводам, в случае невысоких—индивидуальных—экипажей. Однако потери в такой линии будут в несколько раз больше, чем в воздушной; чтобы снизить их, необходимо тщательно проработать устройство дорожного покрытия, вводя туда диэлектрики с малыми потерями. Необходимо также выяснить влияние атмосферных осадков (дождя, снега) на величину этих потерь. Однако, как будет видно далее, потери энергии в системе высокочастотного транспорта не являются единственным решающим фактором с точки зрения его рентабельности; поэтому в известных пределах можно пойти на их увеличение по сравнению с потерями при существующих видах электротранспорта, если это дает существенные эксплуатационные преимущества.

Приводимый в дальнейших ориентировочных подсчетах к. п. д. питающей сети 0,9 может быть

отнесен только к воздушной сети, при условии одновременного использования ее достаточным количеством экипажей или при наличии, как уже указывалось выше, устройств, автоматически управляющих током в ней в зависимости от наличия нагрузки.

Перейдем теперь к рассмотрению другой группы вопросов, связанных с оборудованием экипажа.

**Оборудование экипажа.** Элементами оборудования экипажа высокочастотного транспорта являются: 1) приемная антенна (рамка); 2) высокочастотная цепь между антенной и выпрямителем; 3) выпрямитель для токов высокой частоты; 4) двигатель постоянного тока.

Управление отбором энергии или, иначе говоря, скоростью движения может быть осуществлено в высокочастотной цепи очень изящным способом — путем регулировки связи, что исключает необходимость применения при пуске поглощающих сопротивлений.

В экипажах, совершающих рейсы не по определенным маршрутам, например, легковых и грузовых машинах, важным элементом явится также вспомогательный двигатель или источник энергии, обеспечивающий передвижение экипажей вне радиофицированных магистралей. Совершенно очевидно, что не только все дворы и проезды, но и все переулки и улицы оборудовать питающими линиями нерационально.

Устройство антенны и высокочастотных контуров не является проблемой. Наши современные возможности позволяют обеспечить удобный отбор и регулировку мощности при очень высоком к. п. д. — порядка 90—95%. Зато с выпрямителем для высокочастотного транспорта дело обстоит явно неблагоприятно. Наиболее экономичные ионные выпрямители (газотроны, ртутные выпрямители), применяемые для выпрямления 50-периодного тока, при работе на высокой частоте оказываются непригодными. Весьма опасным явлением, ограничивающим применение ионных приборов в режиме высокочастотного выпрямления, является катодное распыление анода в непроводящую часть периода при обратном напряжении. Ионно-электронная плазма, оставшаяся от проводящей части периода при высокой частоте (малой длительности полупериода), не успевает полностью рассеяться и под влиянием обратного напряжения дает поток ионов, бомбардирующих и распыляющих отрицательно заряженный анод. Любой материал в той или иной мере подвержен этому явлению при любом газе, наполняющем выпрямитель. Вещество, распыляющееся с анода, оседает на стенках баллона и вызывает поверхностную проводимость. Анод же сам быстро изнашивается. Кандидат техн. наук А. Г. Александров, проработавший вопрос о выпрямителе для высокочастотного транспорта, предложил два варианта ионных приборов с ртутным анодом, в которых вредное влияние указанного распыления парализуется, но это предложение требует еще экспериментальной проверки.

Электронные же выпрямители (кенотроны) неприемлемы потому, что ввиду большого внутреннего падения напряжения они оказываются экономичными лишь при высоких напряжениях и требуют применения неудобных и менее надежных высоковольтных двигателей постоянного тока.

Проделанный А. Г. Александровым ориенти-

ровочный расчет показал возможность создать специальный кенотрон на выпрямленное напряжение 1 000 В и ток до 50 А; при этом его к. п. д. оказался равным 68%. Сейчас в связи с успехом электровакuumной техники появилась возможность значительно снизить падение напряжения внутри кенотрона и повысить его к. п. д. до 80—90%. Однако в дальнейших подсчетах мы сохранили величину к. п. д. для кенотрона равной 70%, чтобы выяснить, что можно получить даже в этом худшем случае.

Принципиально очень желательно было бы применение селеновых выпрямителей, не требующих расхода энергии на накал, предварительного прогрева или пуска и весьма простых в эксплуатации. Однако помимо вопроса о допустимости их применения с точки зрения значительного увеличения веса экипажа неясным остается вопрос влияния их емкости на вентильное действие при высокой частоте.

Таким образом мы видим, что вопрос о выпрямителе для высокочастотного транспорта является еще не разрешенным и требует основательной проработки в соответствующих научно-исследовательских институтах электропромышленности.

Другим важным вопросом является вопрос о вспомогательном двигателе. Вопрос этот был проработан инж. А. Х. Зильберталем, который исходил из энергизации лишь трети улиц большого города (Москва, Ленинград). При этом для индивидуальных экипажей была допущена пониженная скорость при подъезде (15 км/ч); максимальное расстояние подъезда определилось в 1 км. Потребные мощности оказались равными 10 кВт для легковой машины и 25 кВт — для грузовой; сравнились три варианта: аккумуляторная батарея, бензиновый двигатель с механической передачей и бензино-электрический генератор.

Вспомогательный агрегат дает увеличение веса легковой машины на величину от 200 кг (бензиновый двигатель) до 300—350 кг (аккумуляторы) (для грузовой машины эти цифры должны быть по крайней мере удвоены). Таким образом увеличение веса доходит до 15—20% веса машины с грузом. При этом с точки зрения эксплуатационных преимуществ на первом месте оказывается бензино-электрический агрегат, а на последнем — аккумуляторная батарея. В отношении веса и стоимости на первом месте стоит бензиновый двигатель.

Перейдем теперь к технико-экономическим показателям высокочастотного транспорта.

**Технико-экономические показатели высокочастотного транспорта.** Наиболее полно различные виды транспорта могут быть охарактеризованы цифрами следующих технико-экономических показателей: 1) скорость сообщения и скорость поездки; 2) надежность, регулярность и маневренность (для массового транспорта); 3) капиталовложения; 4) себестоимость эксплуатации; 5) сводный экономический показатель (представляющий собой ту же себестоимость с надбавкой определенного процента от суммы капиталовложений).

Не останавливаясь на анализе первых двух групп показателей, отметим лишь, что по скорости сообщения и скорости поездки высокочастотный электробус стоит несколько выше троллейбуса и автобуса, а по остальным показателям он несколько

превосходит троллейбус. Капиталовложения для окочастотного транспорта, естественно, получаются выше, чем для современных видов транспорта, однако решающее значение имеют не они, а себестоимость эксплуатации.

Себестоимость эксплуатации складывается из следующих основных элементов: 1) расходы по движению; 2) расходы по ремонту и содержанию транспортных средств; 3) расходы по энергоснабжению; 4) расходы по эксплуатации постоянных устройств.

Рассмотрим подробнее себестоимость эксплуатации экипажа типа троллейбуса (высокочастотного электробуса), причем воспользуемся цифрами материалов из отчета упомянутой ранее бригады специалистов.

Расходы по движению состоят из расходов по содержанию водителя, организации сбора платы, а также из расходов по регулированию движения. Расходы эти для троллейбуса и электробуса одинаковы и могут быть приняты равными 1,53 коп. на пассажиро-километр.

Расходы по ремонту и содержанию подвижного состава по произведенным подсчетам (включая амортизацию) составляют для троллейбуса 35 коп. на пассажиро-километр.

Для электробуса эта цифра возрастает до 47 коп. при ионных и до 1,67 коп. при кенотронных выпрямителях за счет необходимости смены последних.

При подсчете стоимости электроэнергии полезно сопоставить цифры к. п. д. для троллейбуса и электробуса.

Таблица 1

Данные в к. п. д. для троллейбуса и электробуса

	Троллейбус	Электробус	
		Ионный выпрямитель	Кенотрон
станция . . . . .	0,92	0,70	0,70
ния . . . . .	0,90	0,90	0,90
боры управления . . . . .	0,90	0,95	0,95
рямитель . . . . .	—	0,90	0,70
игатель . . . . .	0,88	0,86	0,86
результативный к. п. д.	0,66	0,46	0,36

Отсюда следует, что если для троллейбуса фактический расход энергии переменного тока составляет 1,5 kWh на машино-километр, то для троллейбуса он будет равен соответственно 2,1 и 2,7 kWh. Переходя на пассажиро-километры и учитывая амортизационные начисления, получим следующие цифры для троллейбуса и обоих вариантов электробуса: 0,88; 1,21 и 1,58 коп.

Путевые расходы, включающие расходы по содержанию и ремонту дорожной одежды проезжей части и питающей сети (подразумеваемой воздушной в обоих случаях), могут быть приняты одинаковыми и вместе с амортизацией равными 0,22 коп. на пассажиро-километр. Окончательный результат выводится в сводной таблице, в которую для сравнения включены также соответствующие данные по автобусу (при стоимости 1 kg бензина 5 коп.).

Вид транспорта	Движение	Подвижной состав	Энергия	Путь	Итого коп.
Троллейбус . . . . .	1,53	1,35	0,88	0,22	3,98
Электробус с ионным выпрямителем . . . . .	1,53	1,47	1,21	0,22	4,43
Электробус с кенотроном . . . . .	1,53	1,67	1,58	0,22	5,00
Автобус . . . . .	1,53	1,60	2,66	0,16	6,04

Эта таблица позволяет сделать два интересных вывода: 1) по себестоимости эксплуатации электробус занимает промежуточное место между троллейбусом и автобусом, что вполне соответствует его промежуточным техническим свойствам; 2) относительно низкий к. п. д. системы высокочастотного транспорта сам по себе не является решающим фактором, а должен учитываться, с одной стороны, на фоне остальных преобладающих расходов эксплуатации и, с другой,—на фоне преимуществ, даваемых новым видом транспорта.

Себестоимости эксплуатации обычной и высокочастотной легковой и грузовой машин оказываются примерно одинаковыми, однако для суждения о рациональности перевода их на высокую частоту одного этого показателя недостаточно. Здесь должны быть приняты во внимание другие соображения, к которым мы и переходим.

**Место высокочастотного транспорта в народном хозяйстве и перспективы его применения.** Чтобы определить место высокочастотного транспорта среди прочих видов городского и междугороднего транспорта и ориентироваться в возможных перспективах его применения, необходимо иметь в виду следующее. Высокочастотный транспорт есть вид электрического транспорта и как таковой дает экономический эффект, заключающийся в том, что он позволяет заменить привозное высококачественное топливо, и в частности бензин, местной электрической энергией.

Эта основная экономическая характеристика электрического транспорта дает нам возможность объективно подойти к оценке перспектив индивидуального (немаршрутизированного) транспорта, т. е. легковой и грузовой высокочастотной машины.

Дело в том, что ту же задачу замены привозного топлива местным транспортная техника решает и другими путями; достаточно указать, например, на газогенераторные автомобили, получившие во время войны широкое распространение у нас и за границей. За последнее время в местностях, богатых природными или промышленными газами, появились автомобили, работающие на сжатом газе. При сравнении высокочастотных индивидуальных экипажей с указанными автомобилями мы должны признать, что преимущество оказывается на стороне последних. Недостатками высокочастотных экипажей со вспомогательным агрегатом является не только значительный вес и сложность оборудования, но и главным образом небольшой радиус свободной поездки, постоянная привязанность к питающей сети. Авария последней вызывает автоматический выход из строя и инди-

видуальных экипажей. Вот почему надо признать нерациональным развитие техники высокочастотного транспорта в сторону обслуживания индивидуальных экипажей.

Нам кажется, что успех этой отрасли высокочастотного транспорта теснейшим образом связан с развитием техники аккумуляторного дела. Лишь легкие аккумуляторы, позволяющие совершать далекие свободные поездки, в соединении с высокочастотной сетью, обеспечивающей зарядку аккумуляторов на ходу, позволят удовлетворительно разрешить проблему электрификации индивидуального транспорта. Пойдет ли техника по этому пути или она даст нам новые концентрированные виды топлива для транспорта, покажет будущее.

Совсем иначе обстоит дело в отношении маршрутизированного высокочастотного транспорта, использующего только лишь электрифицированные улицы. Здесь высокочастотный транспорт будет обладать несомненными преимуществами перед троллейбусом, вполне оправдывающими некоторое неизбежное увеличение стоимости проезда, и в этом направлении разработка системы высокочастотного транспорта нам представляется вполне своевременной и весьма желательной. Но кроме применения в коммунальном хозяйстве высокочастотный транспорт может получить распространение и в ряде отраслей промышленности, на что указывает хотя бы уже отмеченная инициатива Всесоюзного угольного института (ВУГИ) в деле разработки высокочастотного электровоза для шахтной откатки. Вот почему нашей задачей является дальнейшая популяризация идеи высокочастотного транспорта и, в частности, среди работников промышленности с целью выяснить возможные объекты его применения в новых областях.

Переходя к вопросу о месте высокочастотного транспорта в системе городского транспорта, мы, повидимому, не встретим возражений, полагая, что он призван заменить собой троллейбус. Его нельзя сравнивать ни с трамваем, который продолжает оставаться пока наиболее экономичным видом городского транспорта, ни с автобусом, с которым он не может состязаться в отношении маневренности. Высокочастотный электробус явится тем пределом, к которому стремится в процессе усовершенствования питаемый извне безрельсовый электрический транспорт, в настоящее время представленный троллейбусом. Обладая большей свободой маневрирования по ширине улицы, он улучшает возможности обгона по сравнению с троллейбусом. Ликвидируя опасность соскакивания токоприемников, высокочастотный электробус устраняет необходимость замедления при проходе пересечения питающих проводов с другими или на закруглениях. Таким образом высокочастотный транспорт может обеспечить максимум того, что можно требовать от безрельсового электрического транспорта, не имеющего аккумуляторов.

Заметим попутно, что с точки зрения реализации чисто транспортных преимуществ маршрутизированного бесконтактного электротранспорта по сравнению с троллейбусом безразлично, где будет находиться питающая сеть — под землей или в

воздухе. Поэтому при проработке вопроса об оптимальной линии едва ли рационально усложнять задачу требованием применения именно подземной сети. Преимущества, даваемые этой сетью для индивидуальных экипажей, для маршрутизированного транспорта отпадают. Переход от воздушной к подземной проводке может мотивироваться в основном только требованиями эстетического порядка. Между тем воздушная сеть дает значительно лучший к. п. д. и меньшее вредное влияние, проще по устройству и обслуживанию и во много раз дешевле подземной. Поэтому, на наш взгляд, задача перевода высокочастотного транспорта на подземную питающую сеть должна быть отнесена ко второй очереди.

Очертив таким образом границы применения возможности высокочастотного транспорта, мы должны со всей четкостью и определенностью поставить вопрос о необходимости предварительного разрешения двух основных из указанных выше частных проблем: проблемы выпрямителя и проблемы питающей сети, без чего нельзя серьезно говорить о проектировании опытной линии высокочастотного транспорта.

Для правильного решения этих задач работающих в Киевском политехническом институте и Энергетическом институте Академии наук СССР недостаточно. Нужно, чтобы в их решении приняли активное участие соответствующие отраслевые или заинтересованные научно-исследовательские организации, и нужно во всяком случае провести обсуждение вопросов высокочастотного транспорта в нашей технической печати; с привлечением же электриков, так и транспортников и работников коммунального хозяйства.

Все сомнения, пожелания и указания должны быть высказаны именно сейчас, в период предварительной проработки проблемы. В частности, должна быть внесена ясность в вопрос о подземной или воздушной питающей сети.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что проблема высокочастотного транспорта в целом является весьма современной и успешное разрешение ее возможно только при использовании наиболее современных знаний и последних достижений высокочастотной техники. Оно немислимо также без активного участия в этом деле наиболее квалифицированных специалистов в области радиотранспорта. Задачей советской общественности является добиться именно такого делового и конкретного разрешения проблемы.

#### Литература

1. Г. И. Бабат. Электричество, № 5—6, 1944.
2. Г. И. Бабат и В. С. Лукошков. Электричество, № 5, 1945.
3. Г. И. Бабат. Техника молодежи, № 12, 1944.
4. Г. И. Бабат. Газета „Труд“, № 52, 3 марта 1945.
5. M. Leblanc. Comptes Rendus de l'Académie Sciences, 2<sup>e</sup> semestre, 176, pp. 196—200, № 4, 1922.
6. А. А. Пистолькорс. Электричество, № 10, 1944.
7. А. А. Пистолькорс. Научно-технический сборник по электросвязи Ленинградского института инженеров связи, № 16, 1936.
8. А. А. Пистолькорс. Электрически связанные линии—докторская диссертация. Ленинградский институт связи, 1941 (рукопись).

# Электромобили

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

*В статье рассматривается развитие и современное состояние электромобильного транспорта. Определяется эффективность электромобиля и производится сравнение его с автомобилем. Рассматриваются основные схемы электромобилей и дается оценка различным типам аккумуляторных батарей. Намечаются первоочередные задачи советского электромобилестроения.*

Вопрос развития и широкого внедрения электромобилей в городской транспорт неразрывно связан с экономией жидкого горючего. Поэтому вопросы электромобилестроения, которым у нас в настоящее время не уделялось должного внимания, имеют большое народнохозяйственное значение.

Принято считать, что электромобили не экономичны вследствие значительного мертвого веса и быстрого к. п. д. аккумуляторов. Однако анализ конструкций современных электромобилей показывает высокую степень использования материалов, достигаемую благодаря значительному облегчению отдельных конструктивных элементов. Это облегчение связано с отсутствием вибраций, присущих двигателям внутреннего сгорания, и с меньшими ходовыми скоростями электромобиля по сравнению с автомобилем.

**Развитие электромобилей.** Приоритет в деле применения электрической энергии для питания экипажей принадлежит русскому академику Б. С. Якоби [Л. 1], использовавшему еще в 1838 г. гальванические элементы в сочетании с электроприводом, для приведения в движение лодки на р. Неве.

Первые сухопутные электромобили были построены в том же 1838 г. Дэвидсоном и усовершенствованы Пэджем в 1851 г. На рис. 1 представлен электромобиль выпуска 1899 г.

До 1919 г. развитие электромобилей в Европе и США шло крайне медленно, причем в Европе появились лишь единичные электромобили.

После 1919 г. количество электромобилей начинает заметно возрастать.

В середине 1941 г. в США насчитывается уже 22 000 электромобилей, в Англии — около 6 000, в Германии — 10 000, в Швейцарии — 3 000, во Франции — 1 000. Значительное распространение получают электромобили также и в Италии.

Номенклатура типов электромобилей, применяемых в различных странах, весьма многообразна. Они находят почти повсеместное применение для работ по очистке улиц, в виде уборочных машин, машин для сбора и вывозки мусора и машин особого назначения (вспомогательные пожарные машины, вышки для ремонта контактной сети, машины со сварочными агрегатами для ремонта трамвайных путей, машины для обслуживания выставок и аэродромов, машины для ремонта водопровода, канализации и кабельных сетей). Широко применяются экипажи и для обслуживания торговой сети: для доставки хлеба, мяса, молока, овощей и других продуктов. Известно также применение почтовых электромобилей и электромобилей для щинской помощи. В промышленности же находят себе применение тяжелые грузовые электрокары с кабиной для водителя и электротягачи.

Грузоподъемность современных грузовых электромобилей составляет от 250 до 7 000 кг.

Наибольшее распространение получил в Англии электромобиль полугрузового типа грузоподъемностью 450—750 кг, с аккумуляторной батареей емкостью от 130—290 Ah при напряжении 60 V. Эти электромобили оборудуются тяговыми двигателями мощностью около 4 kW и развивают максимальную скорость 40—48 km/h, при радиусе действия на одну зарядку от 65—до 95 km. В Англии в последнее время нашли широкое распространение маломощные миниатюрные пассажирские электромобили, примером конструктивного оформления которых может служить электромобиль марки Cleco (рис. 2).

Двухместные легковые электромобили развивают скорость 64—67 km/h при радиусе действия 72—80 km, что далеко еще не является пределом. По данным Automobile Engineer [Л. 2] широкое использование легких металлов и пластмасс в конструкциях легковых электромобилей позволяет довести их радиус действия до 128—160 km при скорости 80 km/h.

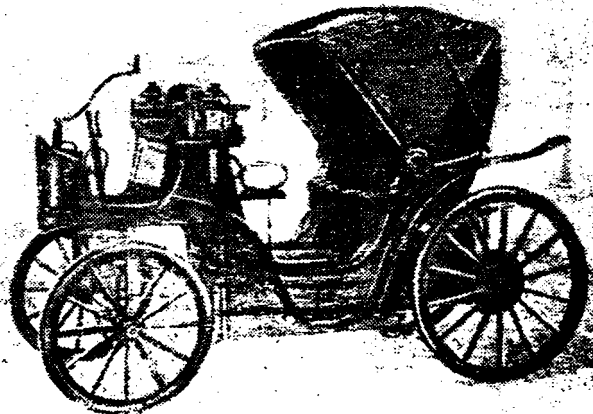


Рис. 1. Легковой автомобиль выпуска 1899 г.

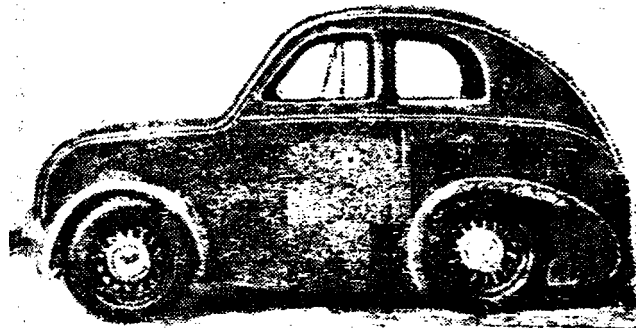


Рис. 2. Современный малогабаритный легковой автомобиль.

Недавно в Англии Министерством военного транспорта утвержден тип стандартного электро-мобиля, разработанного Electric Vehicles Association [Л. 3], грузоподъемностью 1 t. Стандартный электро-мобиль оборудуется тяговым двигателем мощностью 5,9 kW, питаемым от аккумуляторной батареи емкостью 224 Ah при напряжении 85 или 120 V, и развивает скорость в 22,5 km/h при радиусе действия 67 km.

Ряд английских фирм уже приступил к массовому производству серий стандартных электро-мобилей с повышенными эксплуатационными показателями. Так, например, электро-мобили фирмы Morrisson, оборудованные аккумуляторной батареей емкостью 161 Ah, обладают радиусом действия в 97 km и развивают скорость 34 km/h [Л. 4].

За последнее время практикуется переделка бензиновых легковых автомобилей в электро-мобили. Так, в Англии был переделан трофейный автомобиль Opel-Cadett [Л. 5], на котором был установлен тяговый электродвигатель мощностью 4,4 kW, питаемый от аккумуляторной батареи емкостью 144 Ah при напряжении 60 V, а в США был переделан на электро-мобиль автомобиль Chevrolet [Л. 6].

Следует отметить, что все почтовые перевозки (свыше 5 000 машин) и значительная часть такси в крупных городах Германии были переведены на электро-мобильный транспорт. Нехватка жидкого топлива заставила немцев сделать попытки применения электро-мобилей и в оборонной технике, свидетелем чего являются захваченные войсками II Прибалтийского фронта сухопутные самоходные торпеды, представляющие собой танкетки, несущие заряд взрывчатого вещества. Каждая из гусениц сухопутной торпеды приводится в действие от стартерного электродвигателя Bosch мощностью 2 500 W. Питание двигателей осуществляется от аккумуляторной батареи напряжением 24 V. Управление двигателями происходит с помощью силовых контакторов, включаемых через промежуточное реле телефонного типа, которое приводится в действие от четырех намагниваемых на барабан проводов. Скорость электроторпеды—20 km/h; радиус действия—4 km.

Тяжелые грузовые электро-мобили вместимостью 10—12 m<sup>3</sup>, применяемые во Франции, оборудуются тяговым двигателем 4—5 kW и питаются от аккумуляторной батареи емкостью 500 Ah при напряжении 80—160 V, развивая скорость 6—8 km/h. В Лионе известно применение электро-буса на 60 пассажиромест, с радиусом действия в 94 km, при скорости сообщения 17 km/h [Л. 7].

**Эффективность электро-мобиля.** Для сравнения степени использования материалов в электро-мобилях и для сопоставления их с автомобилями автором вводится понятие *коэффициента использования материалов электро-мобиля*, представляющее отношение полезного груза  $G_1$  к весу всей механической и электрической части электро-мобиля  $G_c$  и аккумуляторной батареи  $G_b$ .

$$K = \frac{G_1}{G_c + G_b}$$

Анализ показателей современных грузовых электро-мобилей, приведенных в табл. 1, показывает, что в среднем коэффициент использования материалов грузовых электро-мобилей может быть

Тип машины	Грузоподъемность, t	Коэффициент использования материалов
Грузовой электро-мобиль . . . . .	5,0	0,9
Грузовой автомобиль Я-5 . . . . .	5,0 <sup>1</sup>	1,05
Грузовой автомобиль Studebaker . . . . .	5,0 <sup>1</sup>	1,1
Грузовой электро-мобиль Cleco . . . . .	1,5 <sup>2</sup>	0,71
Грузовой автомобиль ГАЗ-АА . . . . .	1,5	0,9
Легковой электро-мобиль . . . . .	0,3	0,32
Легковой автомобиль КИМ . . . . .	0,3	0,35
Легковой электро-мобиль, переделанный из автомобиля Opel-Cadett . . . . .	0,3	0,24

принят на 15—20% ниже, чем у современных автомобилей. Энергетический к. п. д. электро-мобилей невысок—он составляет всего 11%, однако при приведенном энергетическом балансу топлива электро-мобиль оказывается почти в пять раз выгоднее бензинового автомобиля<sup>1</sup>.

Эксплуатация электро-мобиля обходится на 32—40% дешевле автомобиля [Л. 2]. По подсчетам английских специалистов [Л. 9] в Англии из числа 2 350 000 автомобилей 305 000 обслуживают перевозки с малым пробегом, составляющим от 20 до 100 km в день. Замена этих автомобилей электро-мобилем может дать значительную годовую экономию жидкого топлива, достигающую 700 000 [Л. 10].

Сравнение же электро-мобиля с газогенераторным автомобилем (грузоподъемность 2,5 t) показывает, что коэффициент использования материалов последнего составляет  $K=0,72$  против  $K=0,71$  для электро-мобиля той же грузоподъемности. По энергетическому балансу электро-мобиль оказывается на 23 % выгоднее газогенераторного автомобиля<sup>2</sup>.

**Преимущества и недостатки электро-мобиля**  
*Преимущества электро-мобиля* перед автомобилем: простота оборудования и управления; высокие пусковые ускорения (до 1,5 m/sec<sup>2</sup>); отсутствие вредных выхлопных газов, отравляющих воздух; экономия жидкого топлива; экономия смазки; экономия покрышек, изнашивающихся меньше, чем у автомобиля, вследствие меньших тормозных путей и меньших скоростей; бесшумность хода; отсутствие коробки скоростей; спокойный, свободный от вибраций ход; пожаробезопасность; долговечность (срок службы электро-мобилей достигает 10—20 лет); выгодность при езде с частыми остановками и пусками, так как в отличие от автомобиля электро-мобиль не потребляет энергии на остановках. *Недостатки электро-мобиля:* ограниченный радиус действия; необходимость специальных зарядных устройств; необходимость перевозки аккумуляторной батареи.

<sup>1</sup> При определении энергетического к. п. д. и сравнении расхода топлива и электроэнергии принималось, что электро-мобиль расходует 75 Wh/tkm, а автомобиль 0,05 kg/tkm жидкого топлива. Калорийность бензина принята 10 000 Cal/kg. В качестве эквивалента твердого и жидкого топлива принята малость по данным проф. Н. Некрасова [Л. 8], что из твердого топлива методом гидролиза можно получить 150 kg жидкого топлива.

<sup>2</sup> При сопоставлении принято, что газогенераторный автомобиль расходует около 0,16 kg/tkm березовой сухой щепы, калорийностью 4 900 Cal/kg, что соответствует 0,123 kg условного топлива.

**Основные схемы и электрооборудования электромобилей.** Преимущественное распространение электромобилей находят одномоторные схемы с бесщеточными двигателями. Ввиду низкого напряжения (60—160 В), тяговые двигатели, как правило, выполняются без добавочных полюсов. Изредка (Франция) применяются компаундные двигатели в схемах с рекуперативным торможением, используемым для подзарядки аккумуляторов. В Германии встречается применение коллекторных двигателей с катушками возбуж-

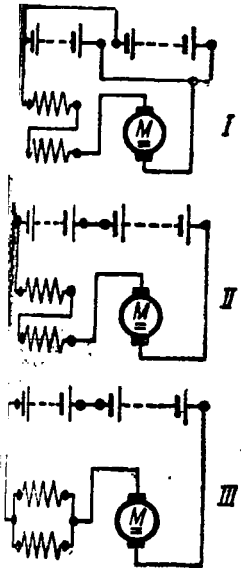


Рис. 3б. Принципиальная схема электрического торможения электромобиля.

Рис. 3а. Принципиальная схема управления электромобилем на трехходовых позициях контроллера.

дения, расположенными в одном остоле. Принципиальная схема трехступенчатого управления электромобилем с серийным двигателем представлена на рис. 3а. Часто употребляются четырехполюсные двигатели, каждый из полюсов которых имеет по две катушки возбуждения, позволяющие на последней позиции контроллера получить ослабление поля двигателя путем параллельного включения частей обмоток возбуждения. Принципиальная схема электрического торможения электромобиля представлена на рис. 3б.

Изменение направления вращения двигателя осуществляется реверсивным переключателем.

Управление токами значительной силы требует аппаратуры исключительно надежного исполнения. Контактное управление на электромобилях, как правило, не применяется. Здесь используется главным образом система непосредственного управления, например, с помощью барабанно-рычажных контроллеров *Crompton and Parkinson* с масляным демпфированием, исключающих возможность быстрых включений.

**Аккумуляторная батарея.** Для приведения в движение электромобиля применяются: кислотные и щелочные аккумуляторы. Современные типы аккумуляторов обладают значительным весом (30—60 кг/кВт). Минимально возможный вес кислотного аккумулятора составляет 10 кг/кВт [Л. 11].

Срок службы современных тяговых кислотных аккумуляторов составляет 3—5 лет, что соответствует в самом благоприятном случае 90—1 500 циклам разрядов, тогда как срок службы щелочных аккумуляторов достигает 10—12 лет.

Щелочные аккумуляторы по сравнению с кислотными, допускают большие разрядные токи. К недостаткам же щелочных аккумуляторов следует отнести большое внутреннее сопротивление, обуславливающее резкое понижение напряжения при нагрузке.

Кривые зависимости емкости от времени разряда представлены на рис. 4; кривая 1 относится к щелочным, а кривая 2 — к кислотно-свинцовым

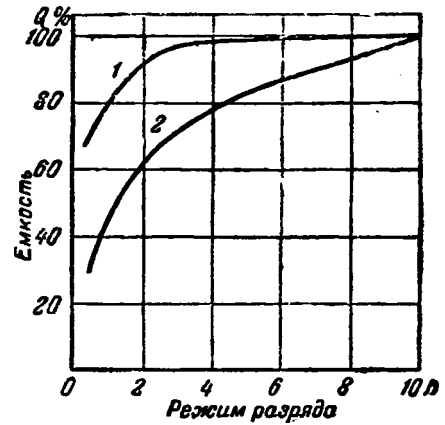


Рис. 4. Кривые зависимости емкости аккумуляторной батареи от времени разряда. 1—для щелочных аккумуляторов; 2—для кислотно-свинцовых аккумуляторов.

аккумуляторам. Длительная эксплуатация аккумуляторов допускается при токе, соответствующем 4, а в исключительных случаях 3-часовому режиму разряда [Л. 12, 13].

Коэффициент полезного действия по мощности кислотных аккумуляторов составляет 75—85%, а щелочных 60—75%. Электролит кислотных аккумуляторов замерзает при температуре — 65° С, а щелочных уже при — 30° С. При низких температурах емкость кислотных аккумуляторов снижается примерно на 1% на каждый градус С, против стандартной температуры (+30° С), при которой указывается номинальная емкость.

Основные данные, характеризующие некоторые типы выполненных аккумуляторов, приводятся в табл. 2.

В Англии и США находят распространение кислотные и щелочные аккумуляторные батареи. В Германии же почти исключительно применялись кислотные аккумуляторы.

**Зарядные устройства** могут быть выполнены как бензоагрегаты; мотор-генераторы; умформеры; электронно-ионные преобразователи; электромеханические вибрационные преобразователи; сухие селеновые или купроксные выпрямители.

Коэффициент полезного действия современных зарядных устройств достигает 70—75%. Для небольших зарядных устройств в Швейцарии хорошо себя зарекомендовало применение селеновых выпрямителей [Л. 14].

Для ускорения процесса зарядки, осуществляемой автоматически, практикуется применение конструкций электромобилей, предусматривающих взаимозаменяемость аккумуляторных батарей. Предпосылкой возможности такой замены является стандартизация типов аккумуляторных батарей.

Таблица 2

Тип	Наименование аккумуляторной батареи	Емкость при 6 h разряде, Ah	Напряжение на одну банку, V	Запас энергии одной банки, kWh	Относительный вес, kg/kWh
10—АФА SGO-50	Тяговая с поверхностными пластинами кислотно-свинцовая	300	2	0,6	103
5 АФА—КУ	Тяговая, кислотно-свинцовая с решетчатыми пластинами	333	2	0,67	40,7
T-1 Greenwood and Batley Ltd.	Тяговая панцирная Exid Iron Clad	207	2	0,41	47,0
Greenwood and Batley Ltd	Щелочная Edison Ni—Fe	225	1,2	0,27	33,8
Greenwood and Batley Ltd	Щелочная Ni—Fe с цельностальным корпусом	300	1,2	0,36	47
НКМ-100 ЭТТ-250	Щелочная Ni—Fe	100	1,2	0,12	52,5
	Тяговая, кислотно-свинцовая, панцирная	250	2	0,5	57,4
6—СТЭ-144 Bergmann	Тяговая, стартерная	117	2	0,234	47,0
	Тяговая, кислотно-свинцовая с решетчатыми пластинами	300	2	0,6	37,5

По эксплуатационным данным расход энергии на одну зарядку электромобиля в среднем составляет 12 kWh.

**Механическая часть электромобиля.** Несущей конструкцией электромобиля, так же как и у автомобиля, является рама, которая выполняется, однако, предельно облегченной сварной конструкции. В качестве примера можно привести электромобиль, у которого вся рама состоит из расположенной по главной оси цельнотянутой трубы с приварными к ней спереди и сзади несущими траверсами для кузова и осей с приводом. Рама электромобиля грузоподъемностью 0,45 t весит всего 52 kg [Л. 15]. Для передачи вращающего момента тягового двигателя на ведущие оси применяется карданный вал или двухступенчатая зубчатая передача с косым зубом. Передаточное число берется равным от 10 до 30, что позволяет применять быстроходные тяговые двигатели со скоростью вращения порядка 2000 об/мин. Известно применение двигателей — близнецов, смонтированных вместе с коробкой зубчатой передачи, непосредственно у ведущих колес.

**Советские электромобили.** Широкое развитие получили в СССР применяемые для внутризаводского электротранспорта родственные электромобилю — электрокары. Собственно электромобили были построены лишь в виде опытных конструкций. Так, в 1934 г. Московским энергетическим институтом им. Молотова по инициативе проф. В. Е. Розенфельда был оборудован электромобиль на базе грузового шасси 3-t автомобиля ЗИС-5. Этот электромобиль грузоподъемностью 2 t вследствие полного использования деталей автомобиля отличался значительным весом (около 4 t). Делались также попытки создания электромобиля заводом «Динамо» им. Кирова.

Интересны в этой области работы по установке аккумуляторных батарей на двухэтажных со-

ветских троллейбусах ЯТБ-3, предназначенных для маневровой работы. Испытания показали [Л. что радиус действия такого троллей-электробуса при использовании аккумуляторной батареи с терного типа емкостью 144 Ah, при напряжении 48 V, составил 2,7 км при скорости движения около 3 км/ч. Естественно, что такая низкая скорость движения и малый радиус действия позволили использовать эту машину только для маневровой работы.

В 1944 г. во II троллейбусном парке по инициативе инж. Ефремова, Марковникова и Пана был построен грузовой троллей-электромобиль, оборудованный аккумуляторной батареей щелочного типа НКМ-100, емкостью 100 Ah, при напряжении 250 V. Испытания троллейного электромобиля, проведенные тяговой лабораторией МЭИ, показали, что скорость машины достигает 20 км/ч при радиусе действия 30—40 км. Грузоподъемность подобного троллей-электромобиля составляет 2,5 t. Применение без изменений существующей конструкции троллейбусов ЯТБ-4 обусловило чрезвычайно низкий коэффициент использования материалов ( $K=0,25$ , вместо 0,7 для электромобилей той же грузоподъемности).

**Задачи советского электромобилестроения.** Широкое развитие электромобилестроения за границей, а также положительный опыт эксплуатации советского внутризаводского аккумуляторного транспорта, наряду с опытной эксплуатацией ряда выполненных конструкций советских электромобилей, свидетельствуют о необходимости начать подготовку к серийному выпуску электромобилей нашей промышленностью.

При проектировании серий электромобилей следует сразу отказаться от попыток приспособления к электромобилю в большинстве случаев тяжелых автомобильных конструкций. Электромобиль должен быть специально сконструирован и рассчитан с учетом предельных усилий, возникающих в эксплуатации, и соответствующих скоростей его движения. Механическая часть электромобиля должна быть предельно облегчена. В электрической части электромобиля желательно применение компактного двигателя, обеспечивающего возможность плавной регулировки скоростей, путем изменения поля шунтовой обмотки. В части аккумуляторных батарей необходимо обеспечить возможность для внедрения в эксплуатацию электромобилей, оборудованных щелочными аккумуляторными батареями. Наряду с ними должны применяться также электромобили с вполне надежными кислотно-свинцовыми панцирными аккумуляторными батареями. Однако перед электропромышленностью стоит задача увеличения срока службы и снижения веса батарей этого типа.

В первую очередь могла бы быть переведена на электрическую тягу некоторая часть экипажей, обслуживающих перевозки грузов в черте города, также машин для поливки, мытья, очистки улиц и вывозки мусора, машин для выемки писем, доставки посылок и других почтовых операций, для развозки хлеба, молока и прочих продуктов питания, для профилактического ремонта контактной сети, водопровода и канализации, для развозки горючего и т. д. Далее на электромобильный транспорт могла бы быть переведена часть таксо-



ного парка. Здесь должны будут найти бесспорное применение миниатюрные четырехместные электро-мобили типа Cleco Electric Vehicle Ltd., [Л. 17], по внешней конфигурации несколько напоминающие автомобили КИМ, но отличающиеся предельно обреченной конструкцией механической части.

При создании серий советских электромобилей следует применить максимальную стандартизацию унификацию деталей, в частности аккумуляторных батарей, которые должны быть взаимозаменяемы.

В части зарядных устройств должны быть разработаны автоматические простые и надежные в работе конструкции с селеновыми выпрямителями.

Электромобиль не может претендовать на полную замену автомобиля. Однако имеется ряд вполне определенных видов внутригородских перевозок, для которых совместными усилиями Наркомата электропромышленности и Наркомата среднего машиностроения при непосредственном участии Наркомата коммунального хозяйства должны быть созданы современные и экономичные электромобили, способствующие оздоровлению воздуха социалистических городов и дающие весьма ощутимую экономию жидкого топлива.

1. Jaćobi. Phyl. Mag., p. 161—165, vol. XV, 1839.
2. G. H. Fletcher. M. Vickers. Gaz., № 328, 1940.
3. El. Vehicle Ass. National Standard Vehicle, Electrician, p. 15, № 3423, 1944.
4. New Battery Vehicles. El. Rev., p. 657, № 3519, May 1945.
5. A. Lamm. El. Vehicles, p. 120—123, Dec. 1942.
6. El. World. News Issue, v. 120, № 3, 1943.
7. J. Thomas. Génie Civil, № 14, 15, v. CXVI, 1940.
8. Н. Некрасов. Заменители нефтепродуктов. Гостехиздат, 1943.
9. Automobile Engineer. Electric Transport, Annual Extra Number, № 1, 1943.
10. H. G. Wilson. Traction Batteries. El. Review, p. 183, № 3247, 1940.
11. Ю. М. Галкин. Электрические аккумуляторные автомобили. Изд. НККХ РСФСР, 1938.
12. Н. Н. Ламтев. Аккумуляторная техника и электрооборудование автомобилей. Электричество, № 10—11, 1939.
13. H. Blume. Elektrofahrzeuge, ATZ, S. 610—615, № 28, 1938.
14. G. F. Ruegg. Neuzeitliche Ladestationen für Elektrofahrzeuge. Bull. ASE, S. 487—492, № 21, 1940.
15. G. H. Fletcher. Battery Driven Road Vehicles. El. Vehicles, p. 62—64, № 273, 1940.
16. Ю. М. Галонен. Экспериментальное исследование троллейбусов. Электричество, № 5, 1940.
17. El. Review, p. 177—188, 16 Febr. 1940.

## Принципы гашения электрической дуги сжатым воздухом

Кандидат техн. наук **Е. М. ЦЕЙРОВ**

*Всесоюзный электротехнический институт*

*В статье дается сопоставление ряда типов дугогасящих устройств высоковольтных воздушных выключателей и вскрывается их физическая сущность. На основании сравнительного рассмотрения указывается система, обеспечивающая наиболее рациональное действие.*

Выключатели с воздушным дутьем находят все более и более широкое применение в заграничных электрических системах. Они строятся на любые напряжения и в состоянии разорвать ток короткого замыкания предельной величины. Преимущества воздушных выключателей перед масляными — общеизвестны. В основном это полное отсутствие опасности пожара или взрыва (при отключении тяжелого короткого замыкания), во много раз меньший вес, малое собственное время действия, отсутствие дорогостоящего соленоидного привода и пр.

Главной частью воздушного выключателя, как и всякого другого, является его гасительная камера — устройство, где производится решающая операция: гашение мощной электрической дуги. Если оставить в стороне историю развития гасительных камер с воздушным дутьем и сосредоточить внимание только на устройствах, применяемых ныне, то можно их разделить на две самостоятельные группы.

Первая группа — камеры, у которых ось потока воздуха, производящего гашение, параллельна оси положительного столба дуги; это так называемые «камеры с продольным дутьем».

Вторая группа — камеры, где поток воздуха перпендикулярен оси дуги; это «камеры с поперечным дутьем». В свою очередь камеры продольного дутья по принципу их устройства следует разделить на три основных типа.

Первый тип камер характеризуется со сплошными контактами и дуговым промежутком, частично находящимся в области сжатого воздуха, а частично при атмосферном или близком к нему давлении. Такими камерами снабжены выключатели фирмы AEG и некоторые выключатели с шунтирующим сопротивлением.

Ко второму типу относятся камеры со сплошными контактами и дуговым промежутком, целиком находящимся в области сжатого воздуха (предложены фирмой GEC).

Наконец, к третьему типу относятся камеры с полыми контактами, служащими в качестве выхлопных труб и дуговым промежутком, целиком находящимся в области сжатого воздуха (применяются различными фирмами).

Своеобразную, но не самостоятельную группу образуют те камеры, у которых при размыкании контактов, в цепь, последовательно с дугой, вводится активное сопротивление, облегчающее

гашение последней. Любое из указанных выше устройств может быть снабжено таким сопровложением после некоторых конструктивных дополнений, существенно меняющих общую конструкцию камеры, но вносящих мало изменений в принцип гашения дуги, используемый для данной камеры.

Рассмотрим устройство и принцип действия гасительных камер продольного дутья указанных трех типов, находящих широкое применение в выключателях высокого напряжения 110—220 кВ.

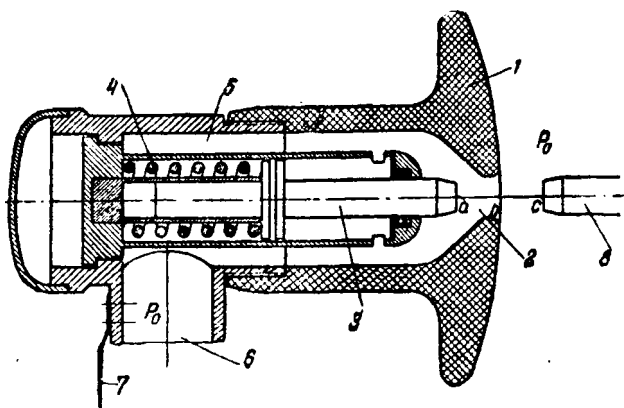


Рис. 1.

Камера первого типа представлена на рис. 1. В принципе она состоит из полрой головки 1 с выхлопным отверстием 2, изготовленной из органического, достаточно дугостойкого материала; подвижного контакта 3 со своим пневматическим механизмом 4, состоящим в свою очередь из цилиндра, поршня и спиральной пружины, удерживающей контакт в крайнем правом положении; металлической конструкции 5, составляющей вместе с головкой 1 собственно камеру — сосуд, наполняемый сжатым воздухом через фланец 6, и неподвижного контакта 8. На рисунке подвижный контакт 3 находится в положении, соответствующем моменту гашения дуги. Во включенном же положении подвижный контакт выдвинут из выхлопного отверстия и находится в торцевом соприкосновении с неподвижным контактом, создавая таким образом непрерывную металлическую цепь от одного линейного вывода 7 до другого — контакта 8. Гашение дуги и, следовательно, выключение цепи производится путем подачи в камеру сжатого воздуха через воздуховод 6. При этом подвижный контакт отходит от неподвижного, а, возникающая между ними, дуга гасится потоком воздуха, текущим через выхлопное отверстие наружу.

Истечение воздуха из камеры подчинено обычным законам истечения газа и картина распределения давления воздуха и его скорости вдоль ее оси камеры может быть представлена кривыми рис. 2. Согласно законам истечения газов из простых (нерасширяющихся) сопел давление у устья выхлопного отверстия 2 составляет 0,528 от давления  $P_0$ , имеющего место в резервуаре, а скорость истечения  $C$  там же достигает критического значения  $C_{кр}$ , которое, вообще говоря, зависит от температуры газа; в частности для холодного воздуха ( $t=0^\circ\text{C}$ )  $C_{кр}=302$  м/сек. В области, где струя вытекающего воздуха смешивается с внешней средой, т. е. согласно рис. 1 справа от устья отверстия 2, продолжается еще некоторое увеличение скорости

струи, сопровождаемое, однако, резким падением давления вдоль ее оси до величины внешнего давления. Этот процесс расширения происходит хаотично вследствие смешения струи с внешним воздухом. Кроме того увеличение скорости происходит лишь в непосредственной близости от выходного отверстия, при удалении же от него скорости струи резко падает вследствие вовлечения в нее все новых и новых количеств внешнего воздуха получающих ускорение за счет энергии струи.

Эти процессы оказывают существенное влияние

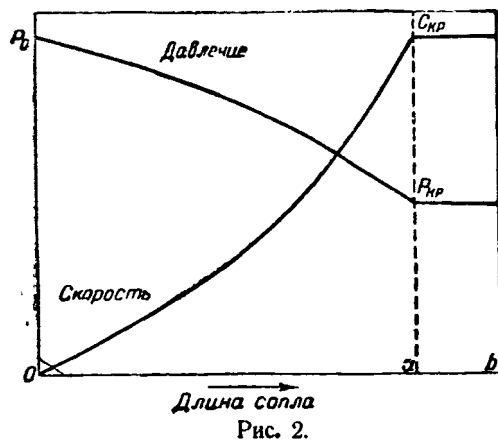


Рис. 2.

на гасящую способность камеры, ибо дуговой промежуток находится в двух областях: области  $ab$  рис. 1 — высокого давления и области  $bc$  — низкого, атмосферного давления. Кроме того эти две области характеризуются и различными скоростями движения масс воздуха. Первая область обладает высокой скоростью течения, вторая — сравнительно небольшой.

В момент, когда ток проходит через нуль, в дуговом промежутке перестает выделяться энергия, вследствие чего происходит рассеивание, распад дугового столба. Этот процесс распада, т. е. охлаждения и деионизации объема, занятого ранее дугой, будет протекать значительно быстрее в первой области, благодаря: а) большой скорости истечения, влекущей за собой энергичный вынос раскаленных и ионизированных частиц воздуха, а также интенсивное внедрение холодного воздуха в среду, ранее занятую дугой, что приводит к быстрому охлаждению таковой, и б) высокому удельному весу холодного воздуха, способному, следовательно, воспринять значительные количества тепла, что также способствует быстрому охлаждению.

Во второй области процесс распада дугового столба по тем же причинам будет происходить очевидно, во много раз слабее, тем более, что эта область непрерывно в течение бестоковой паузы подпитывается горячим и ионизированным воздухом из выхлопных отверстий. Если же учесть, что диэлектрическая прочность воздуха в сильной степени зависит от величины его сжатия, повышаясь с ростом давления, то станет ясным, что главная роль в гашении дуги приходится на область  $ab$ , т. е. область высокого давления, которая должна выдержать почти всю величину восстанавливающегося напряжения. С первого взгляда может показаться, что поскольку главная роль в гашении играет часть  $ab$  дугового промежутка, то увеличить разрывную мощность камеры, скажем, увеличить при прочих равных условиях раз-

ваемого напряжение можно путем дальнейшего сдвигания контактов. Такое суждение ошибочно, в чем нетрудно убедиться.

В самом деле, передвижение контакта влево (рис. 1) приведет к увеличению части  $ab$  дуги и, следовательно, к увеличению той массы раскаленного и ионизированного воздуха, которая должна уйти в течение бестоковой паузы выброшена через выхлопное отверстие, а так как расход воздуха в данном случае остается прежним, ибо ни его параметры, ни сечение выхлопного отверстия не изменились, то, естественно, что температура дугового промежутка и степень его ионизации в момент прохождения тока через нуль (вернее в течение бестоковой паузы) будет выше, чем ранее при меньшей длине  $ab$ .

В итоге процесс восстановления диэлектрической прочности дугового промежутка при излишнем углублении подвижного контакта не только не улучшается, а, наоборот, ухудшается, в связи с тем разрывная способность камеры после достижения максимума, соответствующего определенному положению контакта, также падает. Опыты в этом направлении, выполненные за границей и повторенные у нас, неопровержимо показывают, что после определенного предела дальнейшее передвижение контакта вглубь камеры приводит сначала к ухудшению ее гасительных качеств, а затем даже к отказу в гашении.

В качестве меры повышения гасительных свойств описываемого устройства, при сохранении неизменными давления воздуха в камере и его расхода может служить удлинение цилиндрической части выхлопного отверстия 2. Действительно, если в выхлопное отверстие встроить цилиндрическую трубку определенной длины, то она, по существу, никак не изменит процесс истечения воздуха из камеры (если, конечно, пренебречь потерей напора на трение). Расход воздуха сохранится, а скорость его истечения и его давление по всей длине трубки будут такими же, как и при входе в нее. Следовательно, пристраивая к выходному отверстию камеры такую цилиндрическую трубку, сохраняют неизменными все дугогасительные свойства камеры и последовательно с дуговым промежутком  $ab$  вводят столб сжатого воздуха определенной длины. Последний, обладая более высокой диэлектрической прочностью, сравнительно с воздухом атмосферного давления, при прочих равных условиях в состоянии принять на себя часть величины восстанавливающегося напряжения в момент гашения дуги, что приводит к увеличению разрывной мощности описываемой камеры.

Эксперимент подтверждает сказанное. Однако и здесь доминирующую роль в гашении дуги будет попрежнему играть область дугового промежутка, прилегающая непосредственно к подвижному контакту, где охлаждение и деионизация происходят наиболее интенсивно. Вся остальная часть дугового промежутка будет иметь относительно невысокую диэлектрическую прочность, так как за то ничтожное время, которое длится бестоковая пауза как в выходном отверстии камеры, так и в пристроенной трубке, температура воздуха не успевает достаточно снизиться.

Большое влияние на работоспособность камеры оказывает, естественно, величина давления воздуха, применяемого для гашения. Повышение газа-

щей способности камеры с ростом давления воздуха в ней происходит, с одной стороны, за счет увеличения расхода последнего через выхлопные отверстия и улучшения его охлаждающих свойств в связи с возросшим удельным весом, а с другой, — за счет повышения его диэлектрических свойств. Однако нельзя забывать, что повышение давления воздуха выше 20—25  $\text{kg/cm}^2$  связано уже со значительными конструктивными затруднениями: применением сложных компрессоров, устройством особо прочных резервуаров, трубопроводов, клапанов и т. д. Кроме того диэлектрическая прочность воздуха при электродах, приближающихся по форме к контактам выключателя, сильно растет с ростом давления примерно до 6—8  $\text{kg/cm}^2$ ; при дальнейшем повышении давления рост прочности становится более медленным. Вероятно поэтому в современных конструкциях воздушных выключателей давление воздуха не превышает 20—25  $\text{kg/cm}^2$ .

Вопрос о наиболее рациональной величине давления воздуха не является полностью ясным и нуждается в изучении.

Обобщая сказанное о работе данной гасительной камеры, приходим к следующим выводам:

а) В гашении дуги принимает участие, по существу, не весь дуговой промежуток между торцами контактов, а только часть его, заключенная в изоляционном футляре 1 (рис. 1).

б) Работа камеры сильно зависит от положения подвижного контакта: излишнее углубление последнего может служить причиной плохой ее работы или даже отказа в действии.

в) Направление потока воздуха (производящего гашение), обдувающего подвижный контакт и как бы открывающего дугу от последнего, приводит к тому, что наивысшая скорость восстановления диэлектрической прочности относится к области, непосредственно примыкающей к торцу контакта, служащего дуговым электродом. Таким образом эта электрически наиболее дееспособная область подвергается воздействию металлической поверхности, раскаленной дугой, что может снизить ее качества как диэлектрика. Кроме этого при данном направлении потока воздуха дуговой промежуток, как это указывалось в зарубежной печати, насыщается парами металла, что опять-таки понижает его диэлектрические качества.

г) Футляр 1 (рис. 1) изготавливается из органического материала (и не может быть иным), мало стойкого в отношении высоких температур, и в то же время именно стенки этого футляра направляют поток сильно раскаленного дугой воздуха, что неизбежно приводит к его разрушению.

д) Контактная рабочая поверхность как подвижного, так и неподвижного контактов служит в то же время и дугонесущей поверхностью, что приводит к ее обгоранию и окислению. Последнее сильно ухудшает нормальную работу контактов.

е) Разрывная мощность камеры зависит главным образом от размеров выхлопного отверстия, т. е., в сущности, от величины расхода воздуха, а также от давления воздуха в камере к моменту гашения дуги.

Таковы характерные особенности данного типа камер.

Второй тип является логическим развитием первого. Принципиальное устройство камеры показано

на рис. 3. Здесь 6 — собственно камера с коническим соплом, из дугостойкого летучего (органического материала) (например, фибры); 1 — неподвижный контакт; 3 — подвижный контакт; 4 — поршень, приводящий контакт в движение; 8 — цилиндр поршня; 12 — пружина подвижного контакта; 9 — специальный клапан, препятствующий свободному выходу воздуха из камеры. Работает камера следующим образом.

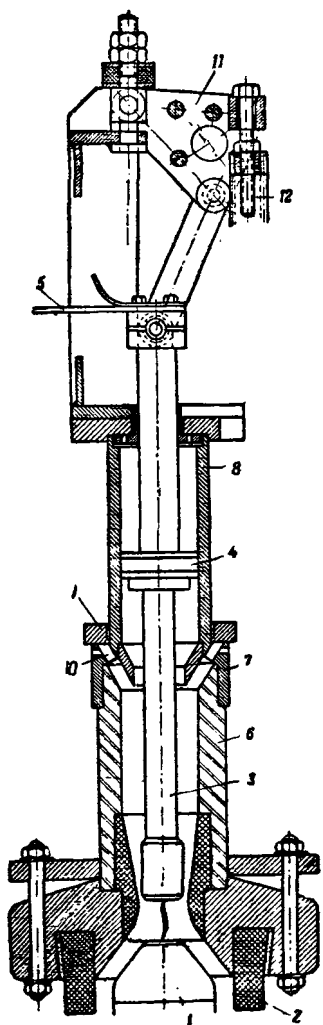


Рис. 3.

мент размыкания возникает электрическая дуга, удлиняющаяся с ходом подвижного контакта. Пружины клапана 9 отрегулированы таким образом, что последний открывается лишь при величине давления, равного примерно половине давления воздуха в резервуаре. Так как величина критического давления при давлении  $P_0$  сжатого воздуха в резервуаре равна  $0,527 P_0$ , то, очевидно, что скорость истечения и, следовательно, расход воздуха через отверстие сопла не уменьшаются по сравнению с истечением прямо в атмосферу, несмотря на то, что в камере имеется значительное противодавление. После того как между контактами будет достигнуто расстояние, достаточное для гашения, поток воздуха, текущий через клапан 9, разрушает положительный столб дуги и приводит к ее гашению в момент прохождения тока через нуль.

Основное отличие этого устройства от описанного выше заключается в том, что здесь весь дуговой промежуток заключен в атмосфере сжатого

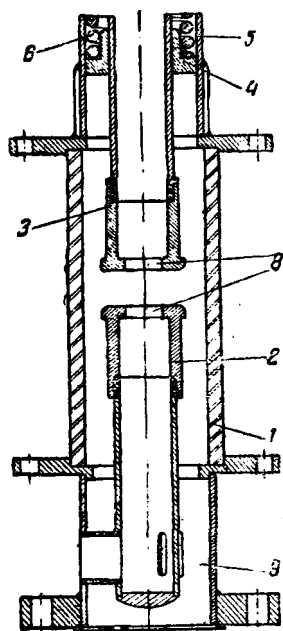


Рис. 4.

С помощью специального оперативного устройства внутренняя полость камеры заполняется сжатым воздухом, под действием которого при определенной величине его давления поршень 4 приходит в движение и увлекает за собой подвижный контакт 3, отрывая его от неподвижного контакта 1. В момент

воздуха, что бесспорно повышает дугогасительные свойства камеры. Вторым ее характерным моментом является большой объем (за счет диаметровой части камеры, где горит дуга, вследствие чего здесь скорость воздуха значительно ниже, чем входного отверстия сопла. В данном устройстве можно разбить на две части: часть, находящуюся в области сопла, где имеют место большая скорость истечения и сравнительно высокое давление и часть, находящуюся в камере, за соплом, где имеют место малая скорость и относительно меньшее давление ( $\sim 0,5 P_0$ ). Таким образом и в данном устройстве диэлектрическая прочность дугового промежутка восстанавливается в течение бес-токовой паузы, неравномерно по его длине. Очевидно, что рост диэлектрической прочности будет идти более быстро в области с большей скоростью истечения и большего давления, т. е. у сопла 9, и более медленно в цилиндрической части камеры. Значительная часть восстанавливающегося напряжения ложится опять-таки на первую область так же, как и в предыдущем типе. Но в данном устройстве эта часть дугового промежутка несколько разгружается за счет длины последнего в цилиндрической части камеры.

Если говорить о недостатках устройства, то они во многом сходны с недостатками камеры первого типа. В нем опять-таки контактные поверхности служат и дугогасительными, а органический материал, составляющий собственно камеру, неизбежно приходит в соприкосновение с раскаленным воздухом. Наиболее благоприятная в смысле скорости восстановления диэлектрической прочности область дугового промежутка примыкает к торцу неподвижного контакта, раскаленного дугой и служащего вследствие этого ионизирующим источником. Эта же область насыщается парами металла, внесенными в нее потоком воздуха, обдувающего неподвижный раскаленный контакт.

Разрывная мощность камеры зависит в основном от степени расхода воздуха через выхлопное отверстие и величины его давления. Следует отметить также, что полная длина дугового промежутка определяется не столько его электрическими параметрами, сколько газодинамическими соображениями, так как расстояние между контактами должно быть настолько большим, чтобы дуговой промежуток свободно омывался потоком воздуха. Последнее обстоятельство вызывает своеобразные конструктивные трудности, связанные с необходимостью быстрого раздвижения контактов на сравнительно большое расстояние, что имеет место и в первом типе.

Третий тип значительно отличается от предыдущих двух. Его гасительная камера в схематическом изображении представлена на рис. 4. Здесь: 1 — собственно камера, представляющая цилиндр из бакелизированной бумаги, она служит в качестве сосуда, наполняемого сжатым воздухом, и в то же время в качестве изоляции между подвижным и неподвижным контактами, которые после гашения дуги находятся под полным рабочим напряжением электрической сети; 2 — полый неподвижный контакт; 3 — полый подвижный контакт; 4 — поршень, управляющий движением контакта; 5 — цилиндр поршня; 6 — спиральная пружина, возвращающая контакт в исходное положение и

...спечаивающая достаточное количество жатые; — выхлопные отверстия полых контактов, через которые происходит истечение сжатого воздуха в атмосферу; 9 — патрубок, необходимый для на- лнения камеры сжатым воздухом.

Механический процесс работы камеры не от- лится от описанного выше. Процесс же гашения происходит иначе. Непосредственно после размыка- ния контактов и возникновения на них электриче- кой дуги последняя, подчиняясь направлению по- ка воздуха, вытекающего в атмосферу через внутреннюю полость трубчатых контактов, сду- ается с рабочих поверхностей контактов внутрь юб. Таким образом электродами для дуги служат внутренние поверхности контактов.

Поток воздуха, проникая в кольцевую шель между торцами контактов, разделяется на два по- ка, один, текущий вниз, а другой — вверх. Этим создаются условия, сходные с таковыми в первых двух типах, но при наличии у них не одного раз- рыва, а двух. Короче говоря, в последнем устрой- стве благодаря особенностям потока воздуха один разрыв обладает гасящей способностью двух обы- чных (при сплошных контактах). Наибольшая ско- рость восстановления диэлектрической прочности будет относиться уже не к области, соприкасаю- щейся с контактами, а как раз наоборот, к обла- сти, лежащей между контактами.

Следовательно, она полностью защищена как от воздействия на нее раскаленного электрода, так и от попадания в нее металлических паров. Камера полыми контактами имеет следующие характер- ные особенности: а) один разрыв при полых кон- тактах равноценен, по крайней мере с точки зре- ния газодинамики, двум при сплошных контактах; б) область дугового промежутка, имеющая воз- можность наиболее энергично восстановить прису- щую ей при нормальных условиях диэлектрическую прочность, не находится в соприкосновении с рас- каленной металлической поверхностью и не насы- щается парами металла, что повышает ее гасящую способность; в) рабочая поверхность контактов лишь в минимальной степени подвержена разру- шающему действию дуги, так как последняя быст- ро сдувается с этой поверхности; г) органическая изоляция полностью устраняется как конструктив- ный элемент, направляющий поток воздуха раска- ленного дугой; д) расстояние между контактами определяется исключительно диэлектрическими ка- чествами промежутка и может быть взято мини- мальным. Это последнее обстоятельство благоприятно влияет на гашение дуги, ибо с уменьшением длины дугового промежутка снижается объем рас- каленного воздуха, подлежащего охлаждению и удалению из камеры.

Простое сравнение описанных выше трех ти- пичных камер приводит к убеждению о значитель- ных преимуществах именно последнего типа, т. е. камеры с полыми контактами.

Камеры с поперечным дутьем имеют также свои конструктивные разновидности, однако прин- цип гашения дуги сохраняется во всех конструк- циях неизменным.

На рис. 5 показано в общих чертах устройство гасительной камеры поперечного дутья. Здесь: 1 — корпус гасительной камеры, изготовленный из изо- лирующего материала; 2 — неподвижный контакт; 3 — подвижный контакт; 4 — изолирующие, попе-

речные относительно друг друга; 5 — место впуска сжатого воздуха. Как видно из рисунка, поток воздуха направлен не вдоль контактов, как было ранее, а поперек и, сле- довательно, дуга как бы перерезывается. Гашение дуги, в сущности, происходит так же, как и при продольном дутье. Положительный столб дуги по- током воздуха частично прижимается к попереч- ным пластинам, а частично загоняется в полость между пластинами, изгибаясь в своеобразную зиг- загообразную петлю. В момент прохождения тока через нуль этот положительный столб рассеивает- ся; объем, занимаемый ранее дугой, восстаноавли-

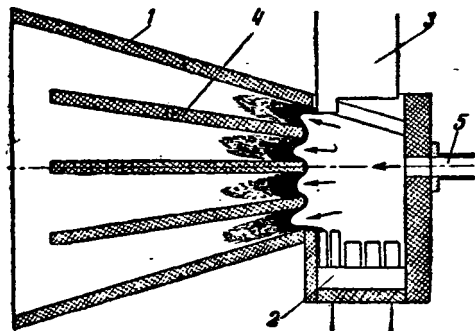


Рис. 5.

вает присущую ему диэлектрическую прочность и в состоянии выдержать напряжение сети. Харак- терным в данном случае является то, что скорость процесса восстановления диэлектрической прочно- сти совершенно одинакова по всей длине положи- тельного столба, так как любой его участок нахо- дится в совершенно одинаковых газодинамических условиях.

Естественно, что гасящая способность подобной камеры будет выше, чем при продольном дутье. Сравнимая поперечное дутье с продольным, уста- навливаем следующее: а) процесс восстановлениа диэлектрической прочности той области, которая была занята дугой, идет равномерно по всей ее длине и в этом смысле поперечное дутье значитель- но совершеннее продольного; б) электрическая дуга, горящая между контактами, растягивается по- током воздуха и изгибается в виде зигзага, таким образом ее положительный столб сильно удлиняет- ся сравнительно с расстоянием между контактами, что увеличивает общую величину восстанавливаю- щейся диэлектрической прочности дугового проме- жутка; в) благодаря первым двум факторам гася- щие способности камеры поперечного дутья на- столько высоки, что становится возможным приме- нять значительно более низкое давление воздуха, чем в случае продольного дутья.

Все это относится к бесспорным преимущест- вам и достоинствам поперечного дутья. Конструк- тивное же осуществление этого принципа наталки- вается на серьезные затруднения. В основном — это необходимость ставить на пути движения элек- трической дуги и раскаленного последней потока воздуха изолирующие преграды. Кроме того необ- ходимость направлять поток воздуха перпендику- лярно движению контактов резко увеличивает по- перечные по отношению к положению токоведущих частей размеры гасительной камеры, делая ее гро- моздкой.

Очевидно, что эти затруднения заставляют на- высочайших напряжениях (35—220 kV) применять

почти исключительно продольное дутье, оставляя поперечное дутье для более низких напряжений.

Принцип действия гасительных камер с так называемым «шунтирующим сопротивлением» представлен на рис. 6. Гасительная камера в последнем случае имеет два промежутка  $A$  и  $B$ , из которых один зашунтирован омическим сопротивлением.

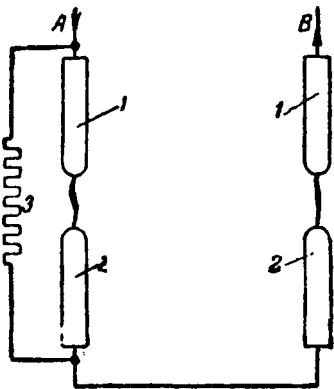


Рис. 6.

Дуги, горящие между контактами 1 и 2, в смысле воздействия на них восстанавливающегося напряжения находятся не в одинаковых условиях.

Благодаря шунтирующему сопротивлению как скорость восстанавливающегося напряжения, так и абсолютная его величина на промежутке  $A$  будет ниже, чем при обычных условиях.

Вследствие этого облегчается распад дугового столба и гашение дуги на промежутке  $A$ . При этом дуга, горящая на промежутке  $B$ , оказывается включенной последовательно с омическим сопро-

тивлением, которое ограничивает ток, текущий по дуге, и резко уменьшает сдвиг фаз между током и напряжением сети.

Оба последние фактора дают возможность в особых трудностях погасить дугу и на промежутке  $B$ . Очевидно, что камера, снабженная таким сопротивлением, становится малочувствительной к параметрам сети в смысле присущих последним скоростей восстановления напряжения. В это главное преимущество камеры с шунтирующим сопротивлением.

Камера эта не свободна и от недостатков. Прежде всего следует отметить, что гасящее устройство камеры должно быть таким же мощным, как и при отсутствии сопротивления, ибо как том, так и в других случаях оно должно справиться с гашением первоначальной мощной электрической дуги. Следовательно основное устройство упрощается, а наоборот, дополнительно к нему пристраивается устройство для гашения дуги, соединенной последовательно с сопротивлением.

Вводится также новый и достаточно ответственный элемент: шунтирующее сопротивление.

При конструктивном решении гасящего устройства эти недостатки настолько велики, что применение гасительных камер с шунтирующим сопротивлением пока еще очень ограничено.

## Переходные процессы в квадратичной системе Леонарда

Кандидат техн. наук, доц. М. Г. ЧИЛИКИН

Московский энергетический институт им. Молотова

*Статья содержит основные формулы, описывающие переходные процессы в квадратичной системе Леонарда, и показывает, что формулы переходных режимов для простой системы Леонарда, известные в настоящее время по работам других авторов, могут быть получены из более общих формул, справедливых как для простой, так и для квадратичной системы.*

*В статье кроме того приводится сравнение работы простой и квадратичной систем Леонарда.*

В системах Леонарда для реверсивных электроприводов, выполняемых различными заводами и проектирующими организациями, обмотка возбуждения генератора, питающего приводный двигатель, в свою очередь питается обычно от вспомогательного генератора постоянного тока (возбудителя). В том случае, когда напряжение последнего остается неизменным, а регулирование тока возбуждения главной машины осуществляется путем изменения параметров ее цепи возбуждения, система носит название ординарной или простой (рис. 1).

В так называемой квадратичной или каскадной системе Леонарда регулирование тока возбуждения

генератора происходит в результате изменения параметров цепи возбуждения возбудителя (рис. 2). Впервые квадратичная система возбуждения применялась в полуавтоматических схемах, где для обеспечения требуемой скорости переходных процессов необходимо было всемерно облегчить труд оператора, дать ему возможность манипулировать более легким контроллером. В дальнейшем такая система выполнялась многими иностранными фирмами и в высокоавтоматизированных схемах. В последнее время для некоторых установок выполняется каскадная система возбуждения генератора при наличии дополнительной системы подвозбуждения (амплидин).

Представляет поэтому интерес исследовать переходные процессы двигателя в квадратичной системе возбуждения и сравнить их с таковыми же при простой системе возбуждения, достаточно изученными к настоящему времени.

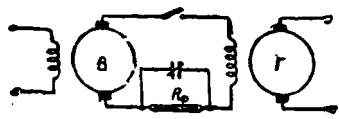


Рис. 1.

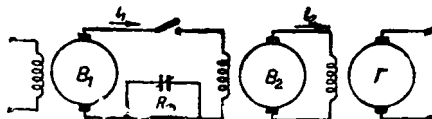


Рис. 2.

Наибольший интерес представляют два фактора, имеющие решающее значение в работе реверсивного привода и определяющие в конечном счете производительность установки. Первый из них — время разбега двигателя до основной скорости вращения, а второй — максимальный толчок пускового тока в якорной цепи. Значение последнего лимитирует степень загрузки двигателя по условиям безыскровой коммутации на коллекторе машины и влияет, естественно, на потери и нагрев генератора и двигателя.

Как известно, при наличии системы Леонарда пуск и увеличение скорости вращения рабочего двигателя достигается постепенным увеличением напряжения генератора, питающего рабочий двигатель. При этом имеют место следующие явления.

После включения обмотки возбуждения генератора Леонарда на постоянное напряжение ток в ней благодаря наличию самоиндукции цепи возбуждения не сразу достигнет своего установившегося значения. Также не сразу возрастет магнитный поток генератора, а следовательно, и э. д. с. генератора.

Это обстоятельство для приводов длительного режима работы несущественно. Напротив, при применении генератора, питающего, например, рабочий двигатель реверсивного привода, время, в течение которого ток возбуждения и э. д. с. питающего генератора достигнут установившегося значения, имеет первостепенное значение, так как этим определяется производительность установки.

Для ускорения процессов пуска и реверса применяются специальные схемы и способы. Мы рассмотрим только наиболее распространенные схемы, форсирование процесса в которых происходит благодаря шунтированию на время пуска добавочного омического сопротивления, включенного либо в цепь возбуждения генератора Леонарда [простая схема (рис. 1)], либо в цепь его возбуждителя [квадратичная схема (рис. 2)].

Можно показать, что формулы, описывающие переходные процессы в простой схеме и известные по работам других авторов<sup>1</sup>, могут быть получены из более общих уравнений, написанных для квадратичной схемы.

**Основные уравнения.** Определим вначале закон нарастания тока возбуждения  $i_2$  генератора  $\Gamma$  (рис. 2), для чего необходимо решить систему двух уравнений:

$$\alpha U_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}, \quad (1)$$

$$U_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (2)$$

Здесь  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения первичного и вторичного контуров возбуждения;

$R_1, R_2, L_1, L_2$  — омические сопротивления и индуктивности этих контуров;

$i_1$  и  $i_2$  — мгновенные значения первичного и вторичного тока возбуждения.

Решение уравнения (1) относительно тока имеет следующий вид:

$$i_1 = \alpha I_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right), \quad (3)$$

где  $\alpha = 1 + \frac{R\phi}{R_1}$  — коэффициент форсировки;

$I_1 = \frac{U_1}{R_1}$  — установившееся значение тока в первичной цепи;

$T_1 = \frac{L_1}{R_1}$  — электромагнитная постоянная времени этой же цепи.

Положив, далее, что напряжение возбудителя  $B_2$  пропорционально току возбуждения этого возбудителя, т. е. что  $U_2 = i_1 \cdot k$ , где  $k = \text{const}$ , можем написать:

$$U_2 = \alpha I_1 k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (4)$$

После интегрирования уравнения (4) и соответствующих подстановок получим:

$$i_2 = \alpha I_2 \left[ \frac{T_2}{T_2 - T_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) - \frac{T_1}{T_2 - T_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \right], \quad (5)$$

где  $I_2 = \frac{I_1 k}{R_2}$  — установившееся значение тока во вторичной цепи;

$T_2 = \frac{L_2}{R_2}$  — электромагнитная постоянная времени этой же цепи.

Равенство (5) является общим как для квадратичной, так и для простой схем.

Действительно, для простой схемы (см. рис. 1) мы должны положить  $T_1 = 0$ , что при подстановке в равенство (5) дает:

$$i_2 = \alpha I_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \quad (5a)$$

Перейдем теперь к нахождению закона изменения скорости вращения двигателя во время пуска.

Обозначим через  $\beta$  отношение электромагнитных постоянных ( $\beta = \frac{T_2}{T_1}$ ). В связи с этим уравнение (5) примет вид:

$$i_2 = \alpha I_2 \left[ \frac{\beta}{\beta - 1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) - \frac{1}{\beta - 1} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{T_2}}\right) \right]. \quad (6)$$

Полагая, как и прежде, что между током возбуждения и э. д. с. главного генератора существует прямолинейная зависимость, можем написать:

$$e = \alpha E \left[ \frac{\beta}{\beta - 1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) - \frac{1}{\beta - 1} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{T_2}}\right) \right]. \quad (7)$$

Уравнение электрического равновесия в главной цепи машин имеет вид:

$$e = C_e n + i R_0. \quad (8)$$

Мы ограничимся рассмотрением пуска двигателя вхолостую, т. е. при  $M_c = 0$ , так как наличие

<sup>1</sup> Д. П. Морозов, Теория электропривода реверсивных станков. Изд. Москва, МЭИ, 1937.

статического момента не внесет принципиальных изменений в общую картину нестационарного процесса. В этом случае уравнение движения привода может быть написано так:

$$C_m i = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (9)$$

В последних равенствах:

$R_0$  — суммарное сопротивление цепи „генератор—двигатель“;

$n$  — скорость вращения двигателя;

$GD^2$  — маховой момент привода, приведенный к валу двигателя;

$C_e$  и  $C_m$  — коэффициенты э. д. с. и момента двигателя, определяемые конструктивными и электрическими параметрами двигателя.

Совместным решением уравнений (7), (8) и (9) определится интересующая нас функция  $n=f(t)$ :

$$\frac{\alpha E}{(\beta-1)C_e} \left[ \beta \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \left( 1 - e^{-\frac{\beta t}{T_2}} \right) \right] = \\ = n + \theta \frac{dn}{dt}, \quad (10)$$

где  $\theta = \frac{GD^2 R_0}{375 C_e C_m}$  — электромеханическая постоянная

привода.

Разделив правую и левую части равенства (10)

на  $\theta$  и введя  $C = \frac{\alpha E}{(\beta-1)C_e \theta}$ , получим

$$\frac{dn}{dt} + \frac{n}{\theta} = C \left[ \beta \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \left( 1 - e^{-\frac{\beta t}{T_2}} \right) \right].$$

После интегрирования и несложных преобразований получим:

$$n = \frac{\alpha n_0}{\beta-1} \left[ \beta \left( 1 - \frac{T_2}{T_2-\theta} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \right. \\ \left. - \left( 1 - \frac{T_2}{T_2-\beta\theta} e^{-\frac{\beta t}{T_2}} \right) - b\theta e^{-\frac{t}{\theta}} \right]. \quad (11)$$

Здесь  $n_0$  — пограничная скорость вращения двигателя:  $n_0 = \frac{E}{C_e}$ , а коэффициент

$$b = \beta \left( \frac{1}{T_2-\beta\theta} - \frac{1}{T_2-\theta} \right).$$

Равенство (11) является общим для квадратичной и простой схем. Для простой схемы  $\beta = \frac{T_2}{T_1} = \infty$ , так как в этом случае  $T_1 = 0$ . Подстановка в формулу (11)  $\beta = \infty$  дает закон изменения скорости вращения двигателя для простой схемы:

$$n = \alpha n_0 \left[ \frac{T_2}{T_2-\theta} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \frac{\theta}{T_2-\theta} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) \right] \quad (11a)$$

Найдем теперь закон изменения тока в якорной цепи генератора при пуске двигателя вхолостую.

С этой целью продифференцируем уравнение

(11) и подставим значение  $\frac{dn}{dt}$  в уравнение (9):

$$C_m i = \frac{GD^2}{375} \frac{\alpha n_0}{\beta-1} \left[ \beta \left( \frac{1}{T_2-\theta} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{T_2-\beta\theta} e^{-\frac{\beta t}{T_2}} \right) + \right. \\ \left. + b e^{-\frac{t}{\theta}} \right].$$

Приняв во внимание, что  $\frac{GD^2 R_0}{375 C_e C_m} = \theta$  и  $\frac{C_e n_0}{R_0} =$

$= \frac{E}{R_0} = I_k$ , получим искомое выражение:

$$i = \alpha I_k \theta \frac{\beta}{\beta-1} \left( \frac{1}{T_2-\theta} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{T_2-\beta\theta} e^{-\frac{\beta t}{T_2}} + \right. \\ \left. + \frac{b}{\beta} e^{-\frac{t}{\theta}} \right). \quad (12)$$

Здесь  $I_k$  — ток короткого замыкания цепи „генератор—двигатель“.

Для простой схемы, т. е. при  $\beta = \infty$ , получим

$$i = \frac{\alpha I_k \theta}{T_2-\theta} \left( e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{\theta}} \right). \quad (12a)$$

Если в уравнение (12) ввести  $m = \frac{T_2}{\theta}$ , то оно примет следующий вид:

$$i = \alpha I_k \frac{\beta}{\beta-1} \left( \frac{1}{m-1} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{m-\beta} e^{-\frac{\beta t}{T_2}} + \right. \\ \left. + \frac{T_2 b}{m\beta} e^{-\frac{mt}{T_2}} \right).$$

В практике мощных электроприводов значения  $m = \frac{T_2}{\theta}$  варьируют в пределах  $m = 40 \div 80$ . При

значениях  $m > 10$  последним членом в правой части равенства возможно пренебречь. В этом случае упрощенное выражение для тока якорной цепи получит вид:

$$i = \alpha I_k \frac{\beta}{\beta-1} \left( \frac{1}{m-1} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{1}{m-\beta} e^{-\frac{\beta t}{T_2}} \right). \quad (13)$$

Воспользовавшись последним, определим величину броска пускового тока. Равенство (13) показывает, что ток якорной цепи при пуске двигателя, нарастая от нуля, проходит в некоторый момент времени через максимальное свое значение. Этот момент времени  $t_m$  может быть определен по общему правилу нахождения максимума функции:

$$t_m = \frac{T_2}{\beta-1} \ln \frac{\beta(m-1)}{m-\beta}.$$



Подставив значение  $t_m$  в равенство (13), найдем максимальное значение пускового тока в якорной цепи.

$$i_{\max} = aI_{\kappa} \frac{\beta}{\beta-1} \left[ \frac{1}{m-1} e^{-\frac{1,1 \beta(m-1)}{m-\beta}} - \frac{1}{m-\beta} e^{-\frac{\beta \ln \frac{\beta(m-1)}{m-\beta}}{\beta-1}} \right].$$

После некоторых преобразований получим окончательно:

$$i_{\max} = aI_{\kappa} \frac{\theta}{T_1 - \theta} \left( \frac{T_1 - \theta}{T_2 - \theta} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}}. \quad (14)$$

Выражение для максимума тока при пуске по простой схеме не может быть получено непосредственно из уравнения (14) вследствие сделанного выше допущения. Оно имеет вид<sup>2</sup>

$$i_{\max} = aI_{\kappa} \left( \frac{\theta}{T_2} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - \theta}}. \quad (15)$$

Сравнение простой и квадратичной схем.

Анализ выражений для токов возбуждения генератора ( $i_2$ ) в простой и квадратичной схемах приводит к заключению; что при прочих равных условиях время нарастания тока возбуждения до заданного значения, а следовательно, и время разбега двигателя, будет больше в случае применения квадратичной схемы.

Для качественного сравнения этих схем положим, что электромагнитные постоянные возбуждителя в генераторе равны  $T_2 = T_1 = T$ . В таком случае уравнение (5) после раскрытия неопределенности преобразуется в следующее:

$$i_2 = aI_2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - aI_2 \frac{t}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (16)$$

Последнее равенство позволяет сделать вполне определенный вывод относительно влияния первичной обмотки возбуждения на процесс нарастания тока по вторичной обмотке возбуждения. Как и следовало ожидать, квадратичная схема в сравнении с ординарной приводит к увеличению времени нарастания тока возбуждения в обмотке генератора.

Для удобства сравнения максимальных значений пускового тока в простой и квадратичной схемах выразим прежде всего пусковой пик тока в относительных единицах, введя следующее обозначение:

$$j = \frac{i_{\max}}{I_{\kappa}}$$

Если допустить, далее, что показатель степени уравнения (15) равен единице, что для мощных приводов дает сравнительно малую погрешность<sup>3</sup>, то уравнение (15) значительно упрощается:

$$j = \alpha \frac{\theta}{T_2}. \quad (17)$$

<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> В приводах типа прокатных реверсивных станков обычно  $\theta = 0,04 \div 0,06$  сек, а  $T_2 = 2 \div 4$  сек.

Последнее выражение можно было получить и из уравнения (14), сделав указанное выше допущение и положив кроме того  $T_1 = 0$ .

Равенство (17) указывает на нецелесообразность чрезмерного уменьшения электромагнитной постоянной цепи возбуждения генератора  $T_2$ , так как последнее, как это теперь совершенно ясно, вызовет соответственно повышение броска тока в якорной цепи. Здесь, как это часто встречается в технике, выявляется существенное противоречие: для ускорения процесса разбега двигателя нужно стремиться к возможному уменьшению электромагнитной постоянной  $T_2$ , но для уменьшения броска тока в якорной цепи следует выбирать ее возможно большей.

Как в том, так и в другом случае величина постоянной привода  $\theta$  играет отрицательную роль и ее значение необходимо иметь возможно меньшим.

Рассмотрим более подробно вопрос о влиянии  $T_2$  и  $\theta$  на бросок пускового тока.

Если в уравнении (11) положить  $\theta = 0$ , то оно примет следующий вид:

$$n = an_0 \left[ \frac{\beta}{\beta-1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \frac{1}{\beta-1} \left( 1 - e^{-\frac{\beta t}{T_2}} \right) \right].$$

Сравнивая последнее выражение с уравнением (7), дающим закон нарастания э. д. с. генератора, мы приходим к выводу, что в этом предельном случае ( $\theta = 0$ ) закон изменения э. д. с. генератора и скорости вращения двигателя при пуске один и тот же. Таким образом э. д. с. генератора в любой момент времени пуска уравновешивается э. д. с. двигателя (последняя при неизменном потоке двигателя пропорциональна только скорости его вращения), благодаря чему ток в цепи двигателя равен нулю.

Если же  $\theta \neq 0$ , то из сравнения выражения (7) и (11) видно, что скорость вращения двигателя, а следовательно, и его э. д. с. отстают благодаря наличию маховых масс привода от нарастания э. д. с. генератора, что и вызывает соответственно появление некоторого тока в цепи „генератор—двигатель“, идущего на покрытие инерционного момента. Очевидно, что величина максимума этого тока будет зависеть от степени наибольшего во время пуска „расхождения“ между кривыми э. д. с. генератора и э. д. с. двигателя. Если отношение  $\frac{T_2}{\theta} = m$

велико, то отставание э. д. с. двигателя от э. д. с. генератора будет относительно малым и соответственно максимум тока в якоре будет тоже мал. При малых соотношениях  $\frac{T_2}{\theta} = m$  значение максимума пускового тока, наоборот, будет сравнительно большим.

При любом заданном  $\theta$  нужно стремиться к равномерному ведению процесса нарастания э. д. с. генератора, так как в этом случае нарастание скорости вращения двигателя будет в каждый данный момент пуска больше совпадать со скоростью нарастания напряжения на зажимах двигателя.

Дальнейшее сопоставление простой и квадратичной схем проведем, задавшись предварительно некоторыми параметрами электропривода. Положим,

что время разбега двигателя до основной скорости вращения задано равным  $t_0 = 1$  сек. и электро-механическая постоянная привода  $\theta = 0,04$  сек. Значения этих величин относятся к приводу стандартного блюминга.

Выясним теперь, как будет меняться величина максимального тока в главной цепи, в зависимости от электромагнитных постоянных первичной и вторичной цепей возбуждения квадратичной схемы.

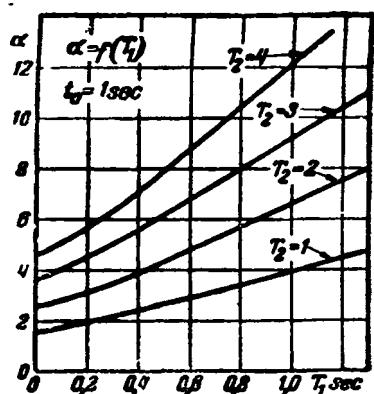


Рис. 3.

Предварительно прибегнем к промежуточному построению функции  $\alpha = f(T_1; T_2)$ . Для этого можно воспользоваться формулой (11).

Построенное по этой формуле семейство кривых  $\alpha = f(T_1)$  для четырех значений  $T_2$  приведено на рис. 3. Точки кривых, лежащие на оси ординат, показывают значения коэффициентов форсировки для простой схемы, в то время как все остальные точки кривых соответствуют квадратичной схеме.

Эти кривые дают представление о потребном увеличении коэффициентов форсировки с возрастанием величин электромагнитных постоянных как первичной, так и вторичной цепей возбуждения.

В соответствии с формулой (14) относительный бросок тока в главной цепи определится равенством:

$$j = \frac{\alpha\theta}{T_1 - \theta} \left( \frac{T_1 - \theta}{T_2 - \theta} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}}$$

Подставляя в последнее выражение различные значения  $T_1$  и  $T_2$  и соответствующие им значения  $\alpha$  из кривых рис. 3, получим искомую функцию  $j = f(T_1; T_2)$ , представленную на рис. 4 семейством кривых.

Как видно из этого рисунка, только в одном из четырех вариантов, а именно, при  $T_3 = 1$  (случай для простой схемы как раз нежелательный), максимум тока в квадратичной схеме в некоторых значениях  $T_1$  будет меньше, чем в схеме простой. Во всех остальных случаях ( $T_1 = 2, 3$  и  $4$  сек.) квадратичная схема дает увеличение броска тока при любых значениях  $T_1$ .

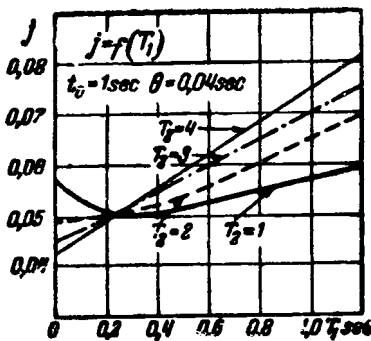


Рис. 4.

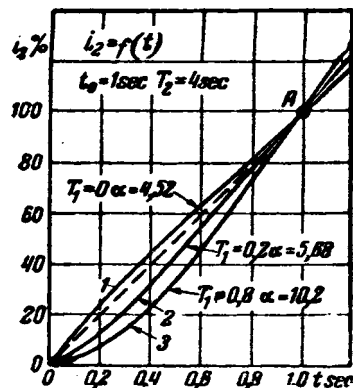


Рис. 5.

Таким образом применение квадратичной схемы при заданном времени разбега двигателя ведет к увеличению броска тока в главной цепи в сравнении с ordinarily схемой.

Последнее обстоятельство объясняется искажением кривой нарастания тока возбуждения, которое вносится наличием электромагнитной инерции второго контура.

Это утверждение иллюстрируется кривыми рис. 5 дающими зависимость  $i_2 = f(t)$  для различных значений  $T_1$ , когда  $T_2 = 4$  сек и  $t_0 = 1$  сек.

На этом рисунке пунктиром показана прямая  $O-A \left( \frac{di_2}{dt} = \text{const} \right)$ . Согласно сказанному ранее ведение процесса по этой прямой было бы наиболее благоприятным.

Из приведенных на рисунке кривых ближе всех к прямой оказывается кривая 1, соответствующая простой схеме ( $T_1 = 0$ ). Кривая 2 ( $T_1 = 0,2$  сек) отклоняется от прямой уже значительно больше, чему соответствует больший бросок тока в главной цепи „генератор—двигатель“. Еще более неравномерной оказывается кривая 3 ( $T_1 = 0,8$  сек).

## Во Всесоюзном научном инженерно-техническом обществе энергетиков

Участие ВНИТОЭ в газификации Ленинграда. ВНИТОЭ имеет активное участие в деле содействия газификации Ленинграда. Входящий в состав общества Комитет газификации руководимый инж. Г. С. Вольпе, разработал конкретный план участия общества в газификации Ленинграда.

Для выполнения этого плана организован ряд бригад, в которые входят специалисты по производству, распределению и использованию газа и по газовой аппаратуре, из числа работников промышленности, профессорско-преподавательских и научных работников, объединенных обществом. К участию в работах для комплексного разрешения вопросов привлечены также специалисты по другим отраслям техники, связанные с газификацией, как, например, сварщики, литейщики, котельщики, металлурги, архитекторы и др.

Комитет газификации установил также контакт с вузами (Ленинградский политехнический институт, Химико-биологический институт, Инженерно-экономический институт и др.) по вопросу организации подготовки специалистов по газовому делу.

Ввиду того что вопросами газификации занимаются во многих городах СССР—Москве, Киеве и др., ВНИТОЭ установило контакт со своими отделениями, находящимися в этих городах, начавшими работу раньше Ленинграда. ВНИТОЭ сочло целесообразным в конце года созвать совещание по газификации городов. Оргкомитетом (председатель Н. И. Сажков) разработан план, который вносится в ближайшее время на утверждение.

В Ленинградском отделении НИТОЭ. Ответственный секретарь ЛОНИТОЭ В. Н. Швецов на заседании Оргбюро сделал доклад о работе Ленинградского отделения общества. В прениях по докладу высказались член-корр. Академии наук СССР, проф. М. А. Шателен, член-корр. Академии наук СССР, проф. М. П. Костенко, проф. В. Н. Шретер, инж. А. С. Румянцев, инж. Г. О. Левит.

Оргбюро одобрило деятельность Ленинградского отделения. Предложено принять решительные меры к укреплению и развертыванию деятельности секции промэнергетики и увеличению роста ленинградской организации за счет энергетиков промпредприятий.

Оргбюро указало на необходимость усиления работы в области повышения квалификации членов общества, путем широкой организации публичных лекций, технических дискуссий, общественных просмотров проектов, семинаров по различным вопросам энергетики.

Оргбюро предложило уделять должное внимание основным вопросам ленинградской энергетики: газоснабжению, теплофикации, гидроэнергостроительству, сельской электрификации. В числе других предложений — систематическое печатание работ членов ЛОНИТОЭ в «Энергетическом сборнике», в центральных энергетических журналах; развертывание работы по экономии тепловой и электрической энергии на ленинградских предприятиях, всемерная популяризация конкурса на лучшее предложение по экономии электроэнергии.

В Азербайджанском отделении НИТОЭ. Для сказания практической помощи промышленным предприятиям города Баку правление АЗНИТОЭ взяло на себя выполнение работы по испытанию и проверке заземляющих устройств, а также оказание технической помощи в разработке обоснованных удельных норм расхода электроэнергии, повышении коэффициента мощности и экономии электроэнергии.

В текущем году силами членов АЗНИТОЭ помимо составления истории развития энергетики города Баку проведены следующие научно-исследовательские работы: закончены исследования коррозионности двух кабелей на восьми участках бакинской городской электросети, определена коррозионность почвы на строительной площадке трубопрокатного завода, завершено исследование пластинчатых трубчатых воздухоподогревателей.

Для оказания технической помощи молодежи правление АЗНИТОЭ организовало курсы по повышению квалификации связистов системы АЗЭНЕРГО без отрыва от производства. К преподаванию привлечены высококвалифицированные специалисты по связи.

АЗНИТОЭ создан комитет научно-технической пропаганды под председательством проф. Б. П. Альбицкого.

*Инж. А. С. РУМЯНЦЕВ  
Зам. председателя ВНИТОЭ*

## Харьковский электротехнический институт

Харьковский электротехнический институт (ХЭТИ) возник в 1930 г. из электротехнического факультета Харьковского технологического института. Число студентов ХЭТИ, возрастая из года в год, к началу Отечественной войны достигло 1300 чел. Всего же с 1922 г. факультет, а затем институт выпустил свыше 1700 инженеров-электриков. Профессорско-преподавательские кадры института насчитывали перед войной в своем составе 14 профессоров (в том числе 2 академика и 8 докторов наук), 38 доцентов (в том числе 26 кандидатов наук) и 62 других научных работников.

Институт располагал многочисленными, богато оборудованными лабораториями и кабинетами, которые с удобством были размещены в большом новом, специально построенном здании (описание лабораторий и кабинетов ХЭТИ см. журнал «Электричество», № 16, 1937 г. и № 5, 1941 г.). По богатству и разнообразию оборудования особенно выделялись лаборатории: электрических машин, высоких напряжений, пускорегулирующей и релейной аппаратуры. Незадолго перед войной было закончено сооружение крупнейшего уникального генератора импульсов с напряжением 8,4 млн. В относительно земли.

Немцы разграбили и разрушили лаборатории института. В последние дни своего хозяйничанья в Харькове они взорвали главное здание института, а затем подожгли его. Общий

ущерб, нанесенный институту, определяется в сумме 43 млн. руб. Из всей площади помещений в 19418 м<sup>2</sup>, которой располагал до войны ХЭТИ, уцелело всего 4612 м<sup>2</sup>.

Институт, как целое, не удалось эвакуировать; профессора и преподаватели института исполняли свой долг перед Родиной в рядах Красной Армии (проф. О. Б. Брон, доценты-кандидаты наук Борщов А. П., Агриник С. И., Бабаков П. А., директор института Столяров Д. В. и др.) или на оборонных заводах. Ряд профессоров и преподавателей института погиб во время войны (академик В. М. Хрущов, доктор физико-матем. наук А. М. Эфрос, доцент А. М. Данилевский и др.). 17 октября 1943 г. ХЭТИ возобновил учебные занятия. Довольно быстро удалось восстановить лаборатории физики, химии, деталей машин, соприкосновения материалов, оборудование которых, к счастью, сохранилось в значительной своей части. Большую помощь Харьковскому электротехническому институту в самые трудные дни его существования оказал Московский орден Ленина энергетический институт им. Молотова, предоставивший свои лаборатории для работы студентов ХЭТИ. Ко второй годовщине освобождения Харькова (23 августа 1945 г.) число студентов ХЭТИ достигло 450 чел. на дневном отделении и 40 чел. на вечернем.

Профессорско-преподавательские кадры, в основной своей части, уже возвратились в институт и наряду с учебными занятиями и работой по восстановлению института возобновили также свою научную деятельность. Тематика института сейчас теснейшим образом увязана с практическими задачами, стоящими перед промышленностью Украины в условиях восстановления.

Кафедры электроаппаратостроения (зав. кафедрой проф. Б. Ф. Вашура) и электропривода (зав. кафедрой проф. Р. Л. Аронов) по поручению завода ХЭМЗ разрабатывают теоретические и экспериментальные основания для проектирования серий контакторов постоянного тока. По этой теме проф. Р. Л. Аронов уже закончил первый раздел «Выбор основных исходных размеров (геометрия серии контакторов)». Далее, определены условия минимальной передачи удара контактов на ось вращающихся частей (исполнители: проф. Б. Ф. Вашура и аспирант И. С. Солодуха). Аналитически исследовано и экспериментально проверено влияние ударов контактов на их вибрацию (проф. Б. Ф. Вашура и аспирант И. С. Солодуха).

Проф. Б. Ф. Вашура подготовил к печати работу по комбинированным характеристикам шунтовых двигателей, в которой дан анализ характеристик, получаемых при включении сопротивлений последовательно с якорем и шунтировании якоря добавочным сопротивлением.

Кафедра электрических машин (зав. кафедрой проф. Г. И. Штурман) совместно с кафедрой электропривода завершила обработку материалов по теории и практике магнитофугальных двигателей и синхронных магнитофугальных генераторов. Подготовлена для сборника научно-исследовательских работ ХЭТИ серия статей, в которых подытожены прерванные войной теоретические и экспериментальные исследования научных работников ХЭТИ, посвященные созданию нового типа электромоторного привода для нефтяной промышленности. Среди этих статей наибольший интерес представляют: «Теория и практика индукционных машин с дугowymi и плоскими статорами» проф. Г. И. Штурмана, «Основы проектирования диаграммы работы быстроударных механизмов при несвязанных и связанных изменениях частоты и напряжения» проф. Р. Л. Аронова и «Характеристики трехфазного асинхронного двигателя со спрямленным или дугowym статором» Г. И. Штурмана и Р. Л. Аронова.

Проф. Р. Л. Аронов показал возможность путем небольших переделок схемы ХЭМЗ для автоматического управления пилы прокатного стана 750 повысить его производительность и исключить ряд комбинаций, вызывающих аварии при недомотрах манипулятора. Другой работой, выполненной проф. Р. Л. Ароновым, является анализ схемы гашения поля генераторов, предложенной Рюденбергом. Установлены неточности, допущенные Рюденбергом при анализе этой схемы, и затруднения, возникающие при ее применении.

Кафедра передачи электрической энергии (зав. доц. Фертик С. М.) совместно с кафедрой электрических машин, продолжая многолетнее довоенные исследования покойного ака-

демьяка В. М. Хруцова, разработала по заданию комбината «Челябинскуголь» конструкцию механического выпрямителя на 100 А и 300 В для питания постоянным током шахтной электровозной откатки (исполнители: доценты М. М. Аришанский и С. М. Фертик). Испытания выпрямителя в лаборатории и в условиях опытной эксплуатации на одной шахте «Челябинскугля», проведенные ХЭГИ совместно с экспериментально-производственной станцией комбината «Челябинскуголь», дали положительные результаты. Выпрямитель устойчиво работал на толчкообразную нагрузку, допуская перегрузку до 80%.

Кафедрой передачи энергии по договору с Харьковэнерго была исследована возможность передачи энергии по системе «Два провода — земля» (руководитель темы — доц. А. Л. Вайнер). Доц. А. Л. Вайнер и С. М. Фертик обработали материалы производившихся перед войной экспериментальных исследований заземлителей при стекании с них импульсных токов большой силы. Результаты работ широко использованы при составлении соответствующего раздела «Руководящие указания по защите от перенапряжений электрических установок 3 кВ и выше» технического отдела НКЭС СССР (изд. 1945 г.).

Доц. С. М. Фертик обработал неопубликованные экспериментальные исследования по деформации блуждающих волн очень высокого напряжения в линии 110 кВ.

Кафедра центральных электрических станций (зав. проф. А. Л. Матвеев) разработала методику расчета перспективных нагрузок по коммунально-бытовому погреблению электроэнергии в городах. В результате работы составлены нормы оптимального потребления электроэнергии для целей электрификации жилых помещений. Кроме того проф. А. Л. Матвеев завершил свои теоретические и экспериментальные исследования по нормированию электропотребления. В основу своего аналитического метода определения удельного расхода электроэнергии при работе на металлорежущих станках проф. А. Л. Матвеев положил работу резания, отнесенную на единицу объема металла, снятого режущим инструментом. Метод энергетического нормирования по объему снимаемого режущим инструментом металла получил практическое подтверждение на заводах Урала и Москвы.

Уже к первой годовщине освобождения Харькова в институте была проведена первая научно-техническая конференция, в которой участвовали также инженерно-технические работники энерго- и электропромышленности Харькова.

Правительство высоко оценило работы, проведенные коллективом института по восстановлению родного города, и в связи с первой годовщиной освобождения Харькова наградил орденами профессоров ХЭТИ Б. Ф. Вашуру, А. Л. Матвеева и М. И. Сахарова.

Дальнейшие успехи в деле скорейшего восстановления Харьковского электротехнического института на данном этапе зависят в значительной мере от того, как скоро будет восстановлен главный корпус института.

*Кандидат техн. наук, доц. П. И. БАРУ*

## К научно-техническому совещанию по следящему электроприводу

В начале 1946 г. в Москве Институтом автоматики и телемеханики Академии наук СССР созывается научно-техническое совещание по следящему приводу. Совещание продлится 4—5 дней. На современной стадии автоматизации производственных, транспортных и других процессов следящий привод имеет исключительно важное значение. Он применяется для автоматического контроля и измерения ряда физических величин, для копирования на металлорежущих станках, для управления нажимными устройствами валков прокатных станов, для стабилизации судов жироскопами, для управления рулями судов, для наводки артиллерийских орудий, для стабилизации самолетов и танков, для управления прожекторами и т. д. Совещание имеет целью рассмотреть современное состояние теории и практики следящего привода и задачи его развития и усовершенствования на ближайший период. Обсуждению будут подвергнуты следующие электроприводы, гидроприводы и электрогидроприводы. Будет проанализировано состояние теории следящего приво-

да как контактно-релейного типа, так и с непрерывным управлением при восстанавливающем моменте. Будут рассмотрены способы подхода к решению задач устойчивости следящего привода с использованием метода самовозбужденных колебаний Найквиста.

Ряд докладов будет посвящен конкретным задачам следящего привода в морском деле, в авиации, в станкостроительной промышленности. Совещание должно наметить основные пути ближайших теоретических и экспериментальных исследований в области следящего привода. Подобное широкое совещание по данному вопросу будет первым. Оно будет способствовать взаимной увязке работ, проводящихся в этой области различными организациями и отдельными лицами. Ввиду специфичности и относительной новизны вопроса все доклады будут заслушиваться на пленарных заседаниях. Отдельных секций не будет. Всего намечено к постановке от 35 до 40 докладов.

*Доктор техн. наук, проф. В. К. ПОПОВ*

# Электротехника и электрохозяйство за границей

## ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМ

Анализ несчастных случаев в электроосветительных и электросиловых хозяйствах США. *Edison El. Inst. Bull.*, № 319—322, 327—330 и 333—334, т. 12, № 10, 1944.

Комитет по борьбе с травматизмом Электротехнического института им. Эдисона (ЕЕИ) осенью 1944 г. подвел итоги своим работам и дал подробный анализ несчастных случаев, происшедших за 1941, 1942 и 1943 гг. по данным 278 электроосветительных и электросиловых предприятий. Классификация всех несчастных случаев, происшедших за три года, дана в табл. 1.

Таблица 1

Классификация несчастных случаев за 1941—1943 гг. в электроосветительном и электросиловом хозяйстве США

Род несчастного случая	Место происшествия	Количество несчастных случаев		
		1941 г.	1942 г.	1943 г.
Электрический удар или ожоги	Работа на воздушной линии электропередачи, расположенной на столбах . . .	52	50	41
	То же на земле . . . . .	14	5	10
	То же на деревьях . . . . .	3	0	1
	То же на крышах зданий . . . . .	1	1	0
	Работа с кабелями, проложенными под землей . . . . .	0	1	1
	Работа на станциях, подстанциях и на высоковольтном оборудовании . . . . .	17	24	28
	В разных других местах . . . . .	3	0	0
Итого . . . . .		90	81	81
Процент к общему числу несчастных случаев за отчетный период . . . . .		74,4	66,9	69,1
Падение	Работа на линии, на столбах или на лестнице . . . . .	8	6	5
	Воздушная проводка на деревьях . . . . .	0	0	3
	На паровых электростанциях . . . . .	1	7	5
	На гидростанциях . . . . .	1	1	0
	На подстанциях . . . . .	0	3	1
	В других местах . . . . .	1	2	0
Итого . . . . .		11	19	14
Процент к числу несчастных случаев за отчетный период . . . . .		9,1	15,7	12,0
Общее количество зарегистрированных случаев . . . . .		134	128	122
Число актов, представленных для анализа . . . . .		121	121	117

последствиями за этот год увеличилось. Из отчета Комитета и представленных докладов видно, что большинство случаев травматизма произошло с линейными монтерами на линиях передачи и монтерами электростанций и подстанций.

При анализе травматизма выявлено шесть основных причин: 1) работа близ незащищенного проводника, находящегося под напряжением; 2) работа без резиновых перчаток; 3) работа на оборудовании высокого напряжения без применения резиновых защитных приспособлений (коврики, покрывала, галоши); 4) работа без надлежащей изоляции или защиты вторичной цепи (или заземления), когда они расположены так, что рабочий своим телом может создать короткое замыкание; 5) отсутствие обеспечения мероприятий, дающих возможность приступать к работе при невключенной системе, или при включении напряжения во время работы; 6) при отсутствии ограждения опасного места работы.

Докладчик инж. Стюарт утверждает, что часто даже высококвалифицированные работники работают близ незащищенных проводников, находящихся под напряжением, без принятия надлежащих мер охраны себя от соприкосновения, надеясь на свой опыт и на свою осторожность. Между тем, по мнению докладчика, совершенно очевидно, что вне зависимости от квалификации и степени осторожности при продолжительной работе близ голых проводников под напряжением в конце-концов может произойти неожиданный случай (падение, проскальзывание, затмение в глазах, необдуманный посплук и др.), и тогда человек коснется голого проводника.

Большое число случаев травматизма с линейными монтерами произошло при работе их на столбах линии передач. Из общего числа 117 случаев травматизма в 1943 г. на линейных монтеров падает 60 случаев, т. е. 51,3%, при этом около 80% из них относятся к случаям падения монтеров со столбов из-за потери точки опоры во время работы на столбе, что в Америке называют специальным термином «cut out». Потеря точки опоры монтера на столбе происходит по следующим причинам: а) неудовлетворительное состояние столба; б) ненадежное устройство траверз и проводов на столбе; в) несоответствие производственной одежды монтера; г) неправильная завязка когтей или дефекты в когтях; д) неумелый подъем на столб и спуск монтера. Большое число несчастных случаев происходит по первой причине. Скользящая поверхность столбов, большая сучковатость, сильно поврежденная поверхность следами когтей, местное загнивание и др. были причинами травматизма с линейными монтерами, как об этом доложил инж. Берман.

Большой интерес представляет рассмотрение травматизма с точки зрения величины напряжения. В табл. 2 сопоставле-

Таблица 2

Напряжение, V	Количество несчастных случаев
115—230	3
285	1
1 300—2 400	17
2 400—4 400	18
4 400—8 000	9
8 000—15 000	8
19 000—33 000	3
33 000—44 000	7
66 000—70 000	1
70 000—132 000	1
Неизвестно	7
Итого . . . . .	81

Хотя общее число несчастных случаев в 1943 г. по сравнению с 1941 г. незначительно упало, однако по мнению докладчика Комитета инж. Креэ число случаев с тяжелыми

ны все случаи, происшедшие за 1913 г., с ожогами и электрическими ударами и распределены в зависимости от величины напряжения.

Как видно из таблицы, четыре случая произошли при низком напряжении. Из них один случай произошел в душевой комнате со стальными стенами, другой — при работе на вторичной цепи, когда внезапно была обесточена первичная цепь, третий — сомнительный случай и четвертый — при реверсии выключателя нейтрали, когда монтер залез выше безопасного пространства для вытирания трензальтеров, находящихся под напряжением 285 В.

Из анализа всех несчастных случаев, происшедших за 1943 г., видно, что большинство несчастных случаев явилось следствием нарушения установленных правил техники безопасности при работах на электротехнических установках высокого напряжения.

В итоге своей работы Комитет рекомендовал институту изменить условия выдачи премии за проведение мероприятий по технике безопасности, рекомендовав выдавать премии: а) при условии выработки миллиона человеко-часов или больше без возникновения несчастных случаев на предприятиях с числом рабочих больше 100, и б) при условии выработки 500 000 чел.-час или больше без несчастных случаев на предприятиях с числом рабочих меньше 100 чел.

Кандидат техн. наук В. А. ИЗЪЮРОВ

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

A. G. Vaughan-Lee, W. Halcrow, S. B. Doukin. Гидроэлектростанция в устье р. Северн для использования энергии морских приливов. *Civil Engineering, June 1944; El. News and Engineering, 15 Dec. 1944 и др.*

Для Англии с ее ограниченными речными гидроэлектростанциями и специфическими географическими условиями представляет существенный интерес техническое использование огромных ресурсов энергии, сосредоточенной в морских приливах. Уже в 1918—1921 гг. так называемый Комитет гидроэнергоресурсов представил ряд проектных разработок по данной проблеме. Ввиду проявленного тогда технического скептицизма вопрос об использовании приливной энергии был надолго отложен. В 1925 г. был создан Комитет по исследованию этой проблемы, выпустивший в 1933 г. подробно разработанный доклад по схеме приливной гЭС на р. Северн. Основные проектные вопросы схемы сейчас вновь освещаются в английской энергетической печати.

Ниже изложены краткие данные по схеме, приведенные в ряде опубликованных на эту тему статей и в докладе, специально составленном для Министерства энергетики и топлива.

Плотины приливной гидроэлектростанции проектируются сооружением в створе Инглиш Стокс, в устье реки, имеющем около 3,2 км ширины. Здесь же (в теле плотины) будут расположены щиты и гидротурбины. На гребне плотины намечен железнодорожный виадук и шоссе. Дорога.

В первой схеме 1920 г. мощность всей установки предполагалась в 370 MW, получаемых от 400 турбин с переменной скоростью вращения, присоединенных к генераторам постоянного тока по 970 kW. Затем электрическую энергию предполагалось преобразовать в переменный ток и трансформировать до 66 kV для последующей передачи.

Ввиду переменной располагаемой мощности гЭС проектировалась передача около  $\frac{2}{3}$  мощности в Тинтерн на р. Виек насосной станции, которая накачивала бы воду в водохранилище Треллак Гранж (около 150 м над уровнем моря). Отсюда вода могла бы быть использована в часы отсутствия мощности гЭС посредством специально сооруженных турбин.

Схема, разработанная в 1933 г., отличается от предыдущего проекта значительным повышением суммарной мощности гЭС (до 796 MW), а также уменьшением числа турбин (до 72) и большей компактностью сооружений. Число напорных плотин уменьшено с двух до одной. Кроме того должна быть сооружена защитная дамба длиной около 1200 м со шлюзованным каналом для судоходства.

В последнем докладе, представленном Министерству энергетики и топлива (1944 г.), число турбин уменьшено до 32 по 25 MW каждая. На гЭС запроектирована установка турбин Каплана, наиболее приспособленных к условиям приливной гЭС. Турбины размещены двумя группами по 16 единиц, причем каждые 4 агрегата присоединяются к одной цепи линии передачи через общий повысительный трансформатор.

С 1927 г. производились испытания специально построенной модели гидроустановки для определения эффекта схемы

и водохранилища на величину и время наступленияливной волны, напор, движущие насосов и др.

Показатели эффективности представляются в следу величинах: полная стоимость схем, включая погашение тала, — 37,73 млн. фунтов стерлингов. Запроектированная насосно-водохранилищная система, необходимая для выработки энергии, стоит дополнительно около 12 млн. фунтов стерлингов.

В упомянутом докладе сооружение гидроэлектростанции отвергнуто как дорогое и неэффективное мероприятие. Считается возможным использовать колеблющуюся расходуемую мощность гЭС в крупной энергосистеме Англии (Гр.

Годовая выработка гидроэнергии составляет около 2,2 млрд. kWh, из которых около 10% энергии теряется вследствие трудностей покрытия графиков нагрузки и неоптимального использования турбинного стока. Таким образом от энергии потребителям оценивается кругло в 2 млрд. kWh, что дает экономию около 1 млн. t угля, или около 2 млн. фунтов стерлингов. За вычетом годовых издержек по схеме экономия составляет около 376 тыс. фунтов стерлингов.

Схема Севернского барража усилено выдвигается в последнее время как одно из мероприятий борьбы с безработицей в послевоенные годы. Строительство в течение 7—8 лет может занять от 4 до 8 тыс. рабочих.

Кандидат техн. наук Б. Л. ЭРЛИХМА

## АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА

Ed. Sinclair Smith. Техника автоматического управления. *Mc Graw Hill Book Co, New York, 367 стр., 131 рис. 1944, стоимость 4 доллара.*

Вопросы автоматического контроля, управления и регулирования в современной технике имеют исключительное значение. В книге использован более чем двадцатилетний опыт работы автора по автоматическим регуляторам в основном механического типа. Рецензируемая книга является в существе первой книгой на английском языке, посвященной рассматриваемому вопросу в широком разрезе. В основе своей она имела курс, прочтенный автором в институте Pratt в 1942 г. Автор книги — организатор и председатель секции промышленных приборов и регуляторов ASME. Он широко использует свой опыт по решению задач автоматического регулирования в авиационном и военном деле. Рассмотрены производятся на конкретных конструкциях без аналогии.

Книга состоит из 7 основных глав (158 страниц) и 5 физико-математических добавлений (200 страниц). Первая небольшая вводная глава дает общую характеристику условий регулирования.

Вторая глава посвящена терминологии по регулируемым системам. Здесь затрагивается общая терминология, связанная с процессами регулирования (точность, запаздывание, мертвая зона и т. д.), рассматриваются основные принципы регулирования, влияние расположения автоматических измерителей и типы регуляторов. В главе третьей разбираются особенности прерывистого регулирования, двухпозиционного, непрерывного регулирования, основанного на методе компенсации, и некоторая специфика переходных режимов в этих системах.

Четвертая глава касается типичных применений гидро регуляторов.

В последних трех главах автор дает краткий математический анализ процессов регулирования, рассматривает вопросы чувствительности, точности, максимальной ошибки, условия колебаний и возможности их успокоения. Процессы рассматриваются в условиях различной структуры схем регулирования.

В части физико-математических добавлений автором кратко излагаются вопросы, важные для процессов автоматического управления и регулирования. Заметим, что в большинстве современных сложных по заданному режиму схем автоматизированного электрпривода процессы управления часто сливаются с процессами регулирования.

Прежде всего рассмотрены различные методы решения алгебраических уравнений высоких степеней.

Далее кратко излагаются основы высшей математики, необходимые для решения вопросов автоматического управления и регулирования: теория функций комплексного переменного, преобразования Лапласа, интеграл Фурье, операционный метод и специальные функции.

Следует отметить, что подобные краткие математические добавления к специальным монографиям, на наш взгляд

яется весьма полезными и целесообразными для инженерной общественности. Американская литература уже неоднократно использует этот удобный способ пропагандирования и распространения математического аппарата, необходимого для решения задач автоматического управления и регулирования.

Доктор техн. наук, проф. В. К. ПОПОВ

H. Herwald. Вопросы конструирования следящего электропривода. *El. Eng.*, стр. 871—876, № 12, 1944.

Автор, являющийся работником фирмы Westinghouse, рассматривает основные решения уравнений движения следящего привода с пропорциональным моментом. Решения отсылаются в операционной форме, причем указывается, что схема Леонарда с обратной связью для следящего электропривода является наиболее простым типом управления. Автор использует указания Таблина в неопубликованном меморандуме 17 г. о подобии проблем автоматического управления и проблем конструирования усилителей, разработанных Ньютоном (Bell System Technical Journal, стр. 126—147, т. XI, 1932) Локсом (там же, стр. 1—18, январь, 1934).

Автор делит следящий привод замкнутого цикла на три элемента: 1) следящая система; 2) аппаратура управления; 3) исполнительный двигатель. При этом имеют место уравнения:

$$E(p) = i(p) - O(p), \quad (1)$$

$$C(p) = f_c(p) \cdot E(p), \quad (2)$$

$$O(p) = f_0(p) [C(p) + C_0(p)], \quad (3)$$

где  $p$  — оператор. В приведенных равенствах  $E(p)$  — ошибка рассогласования;  $i(p)$  — задаваемое положение;  $O(p)$  — положение работки как функции времени;  $C(p)$  — функция времени, характеризующая способ управления исполнительным двигателем;  $f_c(p)$  — возмущающее усилие;  $f_0(p)$  и  $C_0(p)$  — соответствующие функции аппаратуры управления и исполнительного двигателя. Совместное решение (1), (2) и (3) дает для величины рассогласования равенство

$$E(p) = \frac{i(p) - f_0(p) \cdot C_0(p)}{1 + f_0(p) f_c(p)}. \quad (4)$$

К настоящему времени с некоторыми допущениями и приближениями дан ряд решений уравнения (4). Если при конструировании следящего привода в дальнейшем делать те же допущения, то нужда в новых решениях отпадает. Эти решения оказываются пригодными независимо от рода регулируемых параметров и определяют как устойчивость системы, так и угол рассогласования (отклонение регулируемой величины).

При рассмотрении углового положения механизма  $\theta$  и уравнения движения исполнительного двигателя

$$J \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + C \frac{d \theta_0}{dt} + T_0(t) + F_0(t) = T_c(t)$$

где  $\theta_0$  — угол отработки;  $J$  — приведенный момент инерции привода с механизмом;  $C$  — коэффициент, характеризующий вязкое трение исполнительного элемента;  $T_0(t)$ ,  $F_0(t)$  и  $T_c(t)$  — соответственно моменты кулонового трения, внешней нагрузки и аппаратов управления, как функции времени и при скорости задания  $W_i(t)$

$$\theta(p) = \frac{(Jp + C) W_i(p) + T_0(p) + F_0(p)}{Jp^2 + Cp + f_c(p)}. \quad (4)$$

Рассматривая угол рассогласования для  $f_c(p) = \text{const} = K$  при  $T_0(p) = F_0(p) = 0$  и  $W_i(p) = W_i$ , автор получает из (4) угол рассогласования в покое

$$\theta_{ss} = \frac{C W_i}{K},$$

при условии  $T_0(p)$  и  $F_0(p) \neq 0$

$$\theta_{ss} = \frac{T_0 + F_0}{K}$$

Для случая работы следящей системы с постоянной скоростью, начиная с  $t = 0$ ,

$$\theta(p) = \frac{(p + 2r W_n) W_i}{p^2 + 2r W_n p + W_n^2}, \quad (5)$$

$$\text{где } r = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2\sqrt{JK}} \text{ и } W_n = \sqrt{\frac{K}{J}}.$$

При этом в зависимости от того, будет ли величина  $r < 1$ ,  $r = 1$  или  $r > 1$ , получаются три разных решения. Установившийся угол рассогласования при критическом успокоении

$$\theta_{ssc} = \frac{2 W_i}{W_n}.$$

В статье даны кривые изменения  $\frac{\theta_i}{\theta_{ssc}}$  от времени для различных значений параметра успокоения  $r$ .

Работа подобногo следящего привода при высоких скоростях и больших мощностях оказывается нецелесообразной из-за большого рассеивания энергии на успокоение.

Лучшие результаты дают системы с введением первой и второй производных, в которой

$$f_c(p) = -ap^2 + bp + K. \quad (6)$$

При этом

$$\theta(p) = \frac{(mp^2 + 2f_2 2 W_n p) O_i(p) + (1-m)p W_i + T_0(p) + F_0(p)}{p^2 + 2r W_n p + W_n^2},$$

где  $m = \frac{J}{J-a}$ ;  $f_2 = \frac{C}{b+C}$ ;  $r = \frac{b+C}{2\sqrt{(J-a)K}}$  и

$$W_n = \sqrt{\frac{K}{J-a}}.$$

Для приведенного уравнения опять-таки даны три решения для трех значений  $r$  и кривые  $\frac{\theta(t) W_n}{W_i} = f(W_n t)$  при параметре  $r$ .

Длительность переходных режимов может быть уменьшена за счет повышения пиков рассогласования угла. Переходные пики могут быть уменьшены усилением влияния производных, что осложняет управление.

Автор рассматривает далее системы с обратной связью:  $RC$  — через сопротивление и емкость и  $LRC$  — через самоиндукцию, сопротивление и емкость. Эти системы типичны для системы Леонарда и осуществляются через таходинамо, насаженную на вал исполнительного двигателя. Автор кратко отмечает влияние запаздывания как одного, так и нескольких элементов, разбирая математически этот вопрос опять-таки применительно к системе Леонарда. Значение вопроса иллюстрируется рассмотрением условий управления орудийной башней. Статья сопровождается библиографией из одиннадцати названий.

Доктор техн. наук, проф. В. К. ПОПОВ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

R. L. Chapman, O. K. Kjolseth. Электрическая тяга в Бразилии. *El. Eng.*, стр. 558—562, № 8, 1944.

Электрифицированная железнодорожная линия в Бразилии Sorocabana имеет протяженность 133 км двойного пути. Линия проходит по сильно гористой местности, где значительные уклоны пути достигают 20%, а минимальный радиус закругления 242 м. Линия, предназначенная для пассажирского движения со скоростью 56 км/ч и грузового со скоростью 48 км/ч, обслуживается 20 электровозами, являющимися самыми мощными построенными до настоящего времени электровозами постоянного тока узкой 1 000-мм колеи.

Узкоколейные электровозы серии 238/286—6—ГЕС—734 А имеют формулу осей 1—С—С—1. Линия электрифицирована на постоянном токе. Напряжение в контактном проводе составляет 3 000 В. Общий вес электровоза составляет 129 т, сцепной вес 107 т. Вес, приходящийся на ведущую ось, 21,7 т, а на бегунковую ось — 10,8 т. Полная длина электровоза равна 18 590 мм, а ширина 2 943 мм; диаметр

ведущих колес—1117 мм, а бегунковых —838 мм. Электровоз оборудован 6 тяговыми электродвигателями трамвайной подвески, тяговое усилие которых передается на ведущие оси через зубчатую передачу с передаточным числом  $75/17=4,4$ . Общая часовая мощность электровоза составляет 1600 кВт. Часовое тяговое усилие на сцепке электровоза составляет 13 500 кг; максимальная скорость 90 км/ч; часовая скорость—45 км/ч, а длительная—47 км/ч. Часовая мощность каждого двигателя серийного возбуждения 267 кВт при 670 об/мин, а длительная мощность 233 кВт при 700 об/мин.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

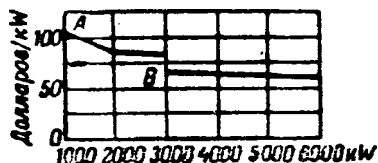
## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

S. S. Watkins. Ртутные выпрямители для железных дорог. *El. Eng., стр. 84—86, № 2, 1945.*

В течение последних 5 лет наблюдалось широкое применение ртутных выпрямителей, главным образом в промышленности и очень малое на электрифицированном транспорте. Ртутно-выпрямительные тяговые подстанции, как правило, не обслуживаемые, с автоматическим запуском, оборудованы аппаратурой телеуправления и телеизмерения.

Обслуживание этих подстанций сводится лишь к их ежедневному 15-минутному осмотру, еженедельной 6-часовой и даже только к ежемесячной 8-часовой ревизии. Редкие обратные зажигания (2—5 обратных зажигания в год на 1 выпрямитель) и простота надзора чрезвычайно облегчают работу ревизионных бригад, в особенности при преобразователях, собранных из одноанодных выпрямителей. Изучение вопроса о размерах занимаемых ими площадей на типовых подстанциях (с первичным напряжением 13 200 В, 60 Гц, выпрямленным напряжением 700 В, автоматизированных и дальноуправляемых) показывает, что в зависимости от мощности и числа выпрямителей размеры площадей здания колеблются от 0,025 м<sup>2</sup>/кВт (подстанции с 1 ПВ—3 000 кВт) до 0,0558 м<sup>2</sup>/кВт (подстанции с 1 ПВ—1 000 кВт), а общих площадей подстанций — соответственно от 0,072 до 0,17 м<sup>2</sup>/кВт.

Что же касается стоимости одного установленного киловатта выпрямителей, то она также в зависимости от мощности колеблется в пределах, указанных на кривых рисунка.



Установочная стоимость ртутно-выпрямительных подстанций.

A — с 1 ПВ—1 000 кВт; B — с 1 ПВ—3 000 кВт.

Современные ртутно-выпрямительные агрегаты проектируются для работ с перегрузками: 50%—2 ч; 100%—1 мин (легкие режимы работы); 200%—1 мин (нормальные режимы работы на транспорте) и 200%—5 мин (тяжелые режимы работы). Температура трансформатора во всех случаях не должна превышать 60°С.

На описываемых тяговых подстанциях применяются 6- и 12-фазные выпрямители, но только на небольшом числе установок имеют место помехи на линии связи, требующие применения фильтров.

Шестифазные 650-V выпрямители, собранные из одноанодных вентилей, благодаря малому падению в дуге имеют к. п. д. на 1—1,5% выше, чем многоанодные выпрямители. При 1,5- и 3,0-кВ выпрямителях это преимущество делается почти незаметным, однако меньшая вероятность обратных зажиганий, простота обслуживания и смены остаются за одноанодными выпрямителями и при этих напряжениях.

Наряду с отключаемыми одноанодными выпрямителями находят применение и отпаянные, водоохлаждаемые вентили, мощность которых достигает 1 000 кВт при 600 В. В области защитной аппаратуры имеется тенденция к применению в катодных цепях вместо саморействующих автоматов — полубыстродействующих, если суммарная мощность на 650-V шинах не превосходит 9 000 А. Вообще же применение полубыстродействующих автоматов в катодных цепях должно найти себе оправдание в связи с установкой в анодных цепях быстродействующих шестиполусных анодных

выключателей с временем срабатывания менее чем 0,1 мс. Эта защита является почти идеальной.

В заключение автор останавливается на вопросе регулирования выпрямленного напряжения. Отмечается, что лирирование вызывает увеличение пульсаций в выпрямленном напряжении и увеличивает искажение формы кривой напряжения питающей сети переменного тока, почему и не рекомендуется производить регулирование более чем на 10%. Это регулирование в одноанодных выпрямителях — типах, использующих в цепях поджигания насыщенные трансформаторы, производится реостатом в цепи подмагничивающей катушки постоянного тока.

Инж. М. Д. ТРЕЙ

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

V. M. Montsinger. Влияние высоты над уровнем моря перегрев авиационных трансформаторов. *El. Eng., 251, № 5, 1945.*

В статье дается метод расчета влияния высоты над уровнем моря на превышение температуры обмоток сухих авиационных трансформаторов. Вообще говоря, влияние высоты перегрев трансформаторов может колебаться в значительных пределах, в зависимости от соотношения теплоотдачи посредством излучения, которая не зависит от высоты, и теплоотдачи посредством конвекции, которая уменьшается с ростом высоты.

В рассматриваемом примере принято, что трансформатор не имеет охлаждающих каналов между обмотками и поэтому почти вся теплоотдача происходит с наружной поверхности внешней обмотки. В этом случае можно считать, что на уровне моря примерно 45% общих потерь отводится посредством конвекции и 55% посредством излучения. Зависимость между удельными поверхностными тепловыми нагрузками перегревом определяется следующими уравнениями:

$$W_c = 0,22 \times 10^{-8} \times \theta^{1,25} \times \rho^{0,5},$$

$$W_2 = 0,56 \times 10^{-11} \times \epsilon \times (T_2^4 - T_1^4),$$

где  $W_c$ —W/см<sup>2</sup>, отдаваемые посредством конвекции;  $W_2$ —W/см<sup>2</sup>, отдаваемые посредством излучения;  $\rho$  — относительная плотность воздуха;  $\epsilon$  — коэффициент излучения;  $\theta$  — повышение температуры обмотки в °С;  $T_2 = 273 + 30 + \theta$ ;  $T_1 = 273 + \theta$  (30° — температура окружающего воздуха).

Для расчета перегрева на определенной высоте над уровнем моря находят суммарные удельные тепловые нагрузки  $W_c$  и  $W_2$ , соответствующие перегреву на уровне моря, и затем определяют путем подбора при помощи кривых, построенных на основе приведенных уравнений, тот перегрев на данной высоте, который соответствует тем же суммарным тепловым нагрузкам. При этом должно быть учтено увеличение потерь в меди вследствие повышенного перегрева.

Сравнение расчетных и опытных данных для перегревов наружной обмотки показывает их практически полное совпадение для высот вплоть до 12 000 м.

При расчете перегрева внутренних обмоток в трансформаторах без охлаждающих каналов можно считать, что высота над уровнем моря не влияет на величину температурного перепада между внутренней и наружной обмотками и поэтому увеличение перегревов внутренней и наружной обмоток с ростом высоты над уровнем моря остается одинаковым. Приведенные положения подтверждаются соответствующими исследованиями.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

H. C. Marcraft. Использование испытаний на диэлектрическую абсорбцию при сушке крупных генераторов. *El. Eng., стр. 56—60, № 2, 1945.*

До настоящего времени отсутствует удовлетворительный метод контроля состояния изоляции электрических машин, трансформаторов и аппаратов с точки зрения степени ее увлажненности и необходимости сушки. Измерения tg  $\delta$  токов утечки на выпрямленном напряжении и сопротивления изоляции не могут считаться достаточно надежными методами. Взамен них автор предлагает использовать явление диэлектрической абсорбции в качестве более совершенного метода определения степени влажности изоляции электрических машин.



метод осуществляется на мгновенном приложении к обмотке статора постоянного напряжения и снятии кривой завытки тока через изоляцию (или сопротивления изоляции) времени. Опыт показал, что для получения удовлетворительной кривой  $i = f(t)$  достаточно отметить значения тока в приложениях напряжения в интервалах в 15 сек в течение первой минуты, с полуминутными интервалами в течение второй минуты и с минутными интервалами в течение третьего времени вплоть до 10 мин. Если вслед затем катушку мгновенно заземлить, то по цепи потечет ток, меньший по сравнению с кривой зарядного тока на величину избытка тока или тока утечки, к которому зарядная кривая асимптотически приближается.

Характер спада кривой  $i = f(t)$ , обусловленный процессом абсорбционного тока, зависит от целого ряда факторов, а именно: материала изоляции обмотки, мощности, номинального напряжения и числа оборотов машины, температуры изоляции и пр., а также от содержания влаги в изоляции. Поскольку все эти факторы за исключением последнего заранее известны, то снятие указанной кривой дает возможность судить о степени влажности машины.

Практически нет необходимости снимать всю кривую, а можно ограничиться определением тока или сопротивления, соответствующих моментам времени 1 мин ( $R_1$ ) и 10 мин ( $R_{10}$ ) с момента приложения к обмотке постоянного напряжения. Тогда крутизна нарастающей сопротивления в функции от времени может быть выражена через коэффициент крутизны

$$K = \frac{R_{10} - R_1}{R_1}$$

Величина этого коэффициента характеризует относительно количество содержащейся в изоляции влаги, причем по мере выхода влаги из изоляции в процессе сушки величина коэффициента крутизны возрастает.

Проведенные испытания показали, что в процессе сушки рефазного гидрогенератора мощностью 31 000 кВА коэффициент крутизны его обмотки возрос с 0,22 в начале до 1,44 в конце сушки (при температуре 75°), продолжавшейся 87 ч. При этом было ориентировочно установлено, что для данного класса генераторов можно считать удовлетворительным коэффициент крутизны не менее 1,25 при 75°. Поскольку ход кривой  $i = f(t)$ , а следовательно, величина коэффициента крутизны при прочих равных условиях зависят от характера изоляции и ее технологической обработки, то для различных типов машин должны быть установлены различные величины минимально допустимых коэффициентов крутизны, свидетельствующих о достаточной степени высушенности изоляции. Определение этих величин может быть произведено только опытным путем.

Помимо контроля процесса сушки определение коэффициентов крутизны изоляции находящихся в эксплуатации машин через определенные промежутки времени (например, при ревизиях) дает возможность судить о состоянии их изоляции и необходимости сушки.

Несмотря на то, что автор в своей статье говорит о применении описанного метода только по отношению к генераторам, можно полагать, что этот метод может быть использован и для других видов электрических машин, трансформаторов и аппаратов. В связи с этим необходимо отметить, что в последнее время в лаборатории одного завода был разработан и успешно применен другой метод контроля степени влажности изоляции<sup>1</sup>, основанный на сравнении емкостей (или диэлектрических проницаемостей) обмоток на корпус при температурах 70—80° и 20—30°. Более подробная опытная проверка обоих методов должна будет выявить их взаимные преимущества и недостатки, с последующим внедрением этих методов в практику заводов и эксплуатирующих организаций.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Силиконовые электроизоляционные материалы (обзор)

Ряд статей, появившихся за самое последнее время в различных американских журналах [Л. 1—9], посвящен наиболее интересной из числа новых групп электроизоляционных материалов — силиконам, т. е. высокополимерным кремний-

органическим соединениям, и содержит ряд новых данных о свойствах и применении в электротехнике этих материалов.

Весьма большой интерес представляют жидкие силиконы. Это — прозрачные, бесцветные жидкости, для которых характерны весьма малая зависимость вязкости от температуры в широком интервале изменения последней и весьма низкая температура застывания. Фирма Dow-Corning выпускает жидкие силиконы марок 1000, 500, 350, 200 и 100 (номер соответствует кинематической вязкости в сантистоксах при 25° С). Жидкие силиконы имеют высокие электроизоляционные характеристики (при 25° С и 50% относительной влажности для частот от 10 до 10<sup>8</sup> Hz их диэлектрическая проницаемость в пределах 2,4—2,7, а tg δ от 0,0001 до 0,0006) и ничтожно малую гигроскопичность. Они могут применяться в качестве высокотемпературного заливочного и пропиточного вещества для трансформаторов и в других случаях; по сравнению с материалами типа совтола жидкие силиконы имеют преимущества меньшей диэлектрической проницаемости, меньшей гигроскопичности, меньшей растворяющей активности, что связано с отсутствием у них резко выраженных дипольных свойств. Жидкие силиконы с успехом могут быть также использованы в качестве смазочных материалов, в частности для высокотемпературных электрических машин со стеклянной изоляцией, когда масло оказывается уже непригодным и выбор подходящего смазочного материала уже чрезвычайно затруднителен, а также в ряде других случаев. Жидкие силиконы чрезвычайно инертны химически, даже при весьма высоких температурах, не вызывают коррозии металлов, стойки к действию окислителей, минеральных кислот и солевых растворов. При обработке жидкими силиконами стекла, керамики и других материалов последние чрезвычайно снижают поверхностную гигроскопичность.

Второй основной вид применения силиконов — электроизоляционные смолы, которые могут быть как весьма эластичными (смола № 993 Dow-Corning и смола «Silastic»), так и твердыми (смола № 2052). Как общее правило, силиконовые смолы термореактивны и для запекания требуют высоких температур (порядка 200—285° С). Поэтому они в основном применяются в комбинации с неорганическими твердыми материалами — волокнистым стеклом, асбестом, слюдой и керамикой. Прекрасными свойствами обладает слоистый пластик на основе стеклянной ткани с силиконовой смолой в качестве связующего.

Новый тип изоляции электрических машин, получивший название HTS (сокращение слов high temperature silicone insulation), на основе слюды и волокнистого стекла с использованием силикона как для клеики (подклейка волокнистого стекла на обмоточном проводе, клеика миканита, наклейка слюды на стеклоткань), так и для пропитки (изготовление стеклоткани, общая пропитка и покрытие машин), обеспечивает надежность изоляции в эксплуатации, обладая как нагревостойкостью, так и влагостойкостью.

Свойства силиконов по сравнению с органическими лаками иллюстрируются прилагаемыми рисунками. На рис. 1 представлено снижение удлинения при разрыве в результате теплового старения при 150° С для нанесенных на медь лаковых пленок из силикона (кривая 1), из нагревостойкой синтетической органической смолы (2) и масляно-смоляного лака (3). На рис. 2 дано время старения (устанавливаемое по началу появления трещин при изгибе по стандартной методике) нанесенных на алюминиевые пластинки лаковых пленок в функции температуры старения; 1 — силикон, 2 — нагревостойкий органический лак. Наконец, рис. 3 иллюстрирует влагостойкость силиконовой изоляции, подвергнутой тепловому старению; здесь даны значения сопротивления изоляции статорных стержней обмотки генератора типа HTS и обычного выполнения класса В в функции времени старения при 200° С; для каждой точки сопротивление измерялось после погружения в воду на 1 ч.

Высокие свойства изоляции HTS могут быть использованы следующими способами:

1. Снижение размеров и весов (до 50%) электрооборудования без уменьшения продолжительности жизни — за счет того, что рабочая температура может быть существенно повышена.

2. Значительное повышение продолжительности жизни электрооборудования — за счет замедления старения изоляции при сохранении нормальных размеров, весов и рабочих температур.

3. Возможность эксплуатации электрооборудования при значениях температуры и влажности окружающей среды, значительно превосходящих обычно допустимые.

Весьма любопытные результаты были получены фирмой Westinghouse при испытании генераторов и электродвигате-

<sup>1</sup> Б. Б. Гельперин. Новый метод определения степени влажности изоляции. Электрические станции. № 6. 1945.

лей с силиконовой изоляцией. Машины подвергались длительным перегрузкам, причем температура обмоток поднималась до 400—500°С, интенсивному обливанию водой и т. п. При этом силиконовая изоляция длительно сохраняла высокое электрическое сопротивление и достаточную механическую прочность и эластичность. В одном случае после 3376 h работы двигателя при температуре обмотки 250°С

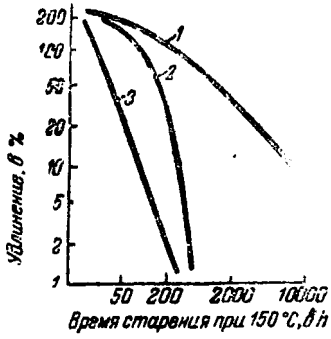


Рис. 1.

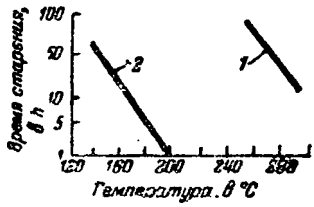


Рис. 2.

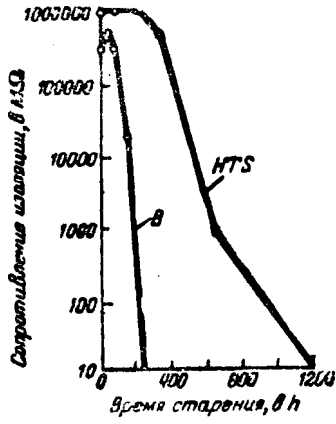


Рис. 3.

был выплавлен подшипник, но изоляция машины еще не была повреждена. Фирма Westinghouse считает, что для изоляции HTS во всяком случае совершенно свободно может быть допущена длительная рабочая температура 175°С, но в особых случаях эта величина может быть еще более повышена.

Имеются основания предполагать, что весьма тонкая и нагревостойкая «керамическая» изоляция проводников «Сегос 200», разработанная фирмой Sprague<sup>1</sup>, представляет собой силиконовую пленку, нанесенную непосредственно на металл.

Введенная фирмой GEC силиконовая резина сохраняет эластичность в широком температурном интервале от -50 до 150°С длительно, выдерживает нагрев до 200°С в течение более 3 месяцев и даже до 300°С в течение 48 ч. Обладает также значительной устойчивостью по отношению к короне и озону, чем выгодно отличается от обычной органической резины. Электрические свойства: при 25°С: диэлектрическая проницаемость 3,58; tg δ при 60 Hz — 0,0018; при 1 MHz — 0,0008; при 92°С: tg δ при 60 Hz — 0,0053; при 1 MHz — 0,0017. Силиконовая резина с успехом применяется для разного рода прокладок и пр., работающих при весьма высоких и весьма низких температурах. Химический состав силиконовой резины GEC: [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Si—O]<sub>n</sub>.

### Литература

1. Т. А. Каурри and G. L. Moses. Кремнийорганические соединения для изоляции электрических машин. *El. Eng.*, стр. 90—93, № 3, 1945.
2. Т. de Kier, L. R. Hill and G. L. Moses. Применение силиконовых смол для изоляции электрических машин. *El. Eng.*, стр. 94—98, № 3, 1945.
3. G. L. Moses. Новые силиконовые смолы повышают нагревостойкость электрической изоляции. *Westinghouse Eng.*, стр. 138—141, сентябрь 1944.

<sup>1</sup> См. реферат «Керамическая проводниковая изоляция» в журнале *Электричество*, стр. 56, № 6, 1945.

4. Sh. L. Bass, T. F. Hide, E. C. Britton and R. Mac Gregor. Силиконы — высокополимерные соединения. *Modern Plastics*, стр. 12.—126 и 212, № 3, т. 22, 1944.
5. Силиконы особо высокой нагревостойкости. *Science News Letter*, стр. 217, 7 апреля 1945.
6. Новые высокополимерные силиконовые соединения. *Science News Letter*, стр. 169, 17 марта 1946.
7. Новые силиконовые электроизоляционные смолы. *Ceramic Industry*, стр. 90, № 3, т. 44, сентябрь 1944.
8. Sh. L. Bass и T. A. Каурри. Силиконовые высокополимерные материалы в радиопромышленности. *Proceedings of the Institute of Radio Eng.*, стр. 441—447, т. 33, № 7, 1945.
9. Силиконовая резина. *Rev. Scient. Instrum.*, т. 16, стр. 61, № 3, 1945.
10. Различные силиконовые материалы. *Modern Plastics*, т. 22, стр. 112—113, 196, 198, № 8, 1945.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕВ  
и инж. Р. С. ХОЛОДОВСКИ

W. Jackson, I. S. A. Forsyth. Политен — высокочастотный диэлектрик. *Chemistry and Industry*, стр. 390, 11 ноября 1944.

Статья, представляющая собой изложение доклада авторов в Обществе инженеров-электриков, посвящена свойствам и использованию находящего все более широкое применение синтетического диэлектрика политена (polythene), который получается в результате полимеризации этилена C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, представляет собой углеводород парафинового ряда с высоким молекулярным весом в пределах от 8000 до 20 000.

При нормальной температуре политен обладает высокой механической прочностью и эластичностью, сохраняя эти свойства и при охлаждении до нескольких градусов ниже 0°С. Сохранение эластичности при более низких температурах (десятки градусов ниже 0°С) достигается применением пластификаторов, наиболее подходящим из которых является полиизобутилен.

Для устранения окислительного старения при работе политеновой изоляции добавляются антиоксиданты.

Особыми преимуществами политена являются: весьма малое значение tg δ (от 0,00015 до 0,0003) и ничтожная гигроскопичность.

Благодаря малым диэлектрическим потерям политен с успехом применяется для высокочастотной изоляции. Одни из основных видов его использования — опрессовка (вакуум — термопластичный материал) кабелей и проводов, предназначенных для передачи токов до наиболее высоких практически применяемых частот.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕВ

Термисторы. *Radio-Craft*, стр. 353, март 1945.

Термистором (thermistor) называется прибор, омическое сопротивление которого сильно уменьшается при возрастании температуры. Его токопроводящая часть спрессована из полупроводящих окислов металлов, размещена в запечатанной азотом стеклянной колбе и снабжена металлическими выводами; возможны и другие варианты конструктивного выполнения. Прибор получается весьма компактным и в высокой степени стабильным — величина сопротивления практически не изменяется после более чем 500 000 циклов нагрева и охлаждения. Термисторы выпускаются американской фирмой Western Electric сорока различных типов и находят широкое применение в разнообразных электрических схемах для целей измерения, термокомпенсации, телеуправления и т. п.

Возможны три основные вида воздействия изменяющейся температуры на включаемый в электрическую схему термистор: 1) внешнее нагревание, когда сопротивление термистора является функцией температуры окружающего пространства; 2) прямое нагревание током, пропускаемым непосредственно через термистор; 3) косвенное нагревание током, который проходит через нагревательный элемент, выполняемый в виде обмотки, внутри которой помещается термистор.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕВ

Цена 8 р.

Сдано в пр-во 26/XI 1945 г. Подп. к печати 19, XII 1945 г. Объем 7 печ. л. 12,5 учет.-авт. а.  
А 24335 65 500 тип. знак. в 1 печ. л. Формат бумаги 60×92<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Зак. № 207 Подписное издание. Тираж 7000 экз.

Типография Госэнергоиздата Р.КЭС. Москва, Шлюзовая наб., д. 10.

# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ НКЭС СССР

Москва, Шлюзовая набережная, 10

**Открыта подписка на 1946 год  
на энергетические журналы**

## „Электрические станции“

Орган НКЭС СССР

Год издания 17 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал электростанций и сетей, проектирующих и производственных организаций, заводов, изготовляющих электрооборудование, работников НИИ и студентов вузов.

## „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Орган Академии наук СССР,  
НКЭС СССР и НКЭП СССР

Основан в 1880 г. № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области научного исследования и практического применения электричества.

## „ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО“

Производственно-технический и экономический  
журнал НКЭС СССР

Год издания 15 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал строительства и эксплуатации гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений, проектно-изыскательских организаций, научно-исследовательских институтов и на студентов вузов.

## „Торфяная промышленность“

Орган НКЭС СССР

Год издания 23 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на руководящих работников, инженеров, техников и передовых рабочих торфяной промышленности.

## „ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА“

Орган Госинспекции по промэнергетике  
и энергонадзору при НКЭС СССР

Год издания 3 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на инженеров и техников, работающих в области промэнергетики, энергетиков, технологов цехов, заводов, главков наркоматов.

## „ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“

Орган НКЭП СССР

Год издания 17 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 54 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал цехов, проектно-конструкторских бюро, лабораторий заводов и научно-исследовательских институтов.

## „За экономию топлива“

Орган Главснабгудля при СНК СССР  
Год издания 3 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на руководящих работников, инженерно-технических работников предприятий промышленности и транспорта и квалифицированных рабочих.

## Известия Всесоюзного ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО института им. Ф. Дзержинского

Год издания 15 № 12 номеров в год  
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на работников электрических станций, энергомашиностроительных заводов, проектных и научно-исследовательских организаций, лабораторий, а также работников и учащихся вузов.

**ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ СОЮЗПЕЧАТЬЮ И ВСЮДУ НА ПОЧТЕ.**