

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8  
1946  
АВГУСТ

ЖУРНАЛ  
ОСНОВАН  
в 1880 г.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Л. А. Тумерман</i> — Люминесцентное освещение и задачи его внедрения . . . . .	3
<i>Н. Н. Ермолинский и Е. Б. Шефтель</i> — Люминесцентные лампы в текстильной промышленности . . . . .	16
<i>В. Т. Ренне</i> — Современное конденсаторостроение . . . . .	19
<i>В. П. Вологдин</i> — Новый генератор повышенных и высоких частот . . . . .	28
<i>И. Х. Невяжский</i> — Развитие техники радиопередающих устройств . . . . .	33
<i>А. Л. Минц, З. И. Модель и С. В. Персон</i> — Опыт односторонне направленного вещания на длинных волнах . . . . .	42
<i>Г. Н. Петров и С. С. Окунь</i> — Компенсация погрешностей трансформаторов тока подмагничиванием сердечника полем рассеяния . . . . .	46
<i>И. Г. Герценштейн</i> — Закономерности прокальвающего пробоя силовых кабелей . . . . .	51
<i>Я. З. Цылкин</i> — Нерезонансные электрические цепи с переменным параметром . . . . .	61
<i>М. В. Воропанов</i> — Высокоинтенсивная дуга малой мощности . . . . .	67
<i>В. С. Нэлепец</i> — Об эквивалентной схеме замещения электролитического конденсатора . . . . .	69
<i>С. А. Гинзбург</i> — Динамический расчет приемника частотно-импульсного телеизмерения . . . . .	71
Дискуссии . . . . .	74
Хроника . . . . .	78
Библиография . . . . .	88
Рефераты . . . . .	90



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

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

# Люминесцентное освещение и задачи его внедрения

Доктор физико-математических наук, проф. Л. А. ТУМЕРМАН

Физический институт им. Лебедева Академии наук СССР

Промышленность, связанная с производством источников света, в настоящее время находится в преддверии полной технической революции.

Развитие техники электрического освещения выдвигает неотложную задачу замены электрической лампы накаливания

принципиально новыми и несравненно более совершенными источниками света, — люминесцентными лампами, научная разработка которых была в основном завершена еще перед войной и производство которых освоено нашей промышленностью. В США уже имеется широчайший опыт эксплуатации люминесцентных ламп. Наличие этого опыта позволяет безбоязненно начать внедрение новых ламп, не опасаясь «детских болезней», столь частых при переходе от лабораторных результатов «к практике в промышленном масштабе».

В задачи настоящей статьи не входит сколько-нибудь подробное описание технических деталей конструкции люминесцентных ламп и технологии их изготовления, так же как и освещение сложных и своеобразных физических процессов, протекающих в них. Этих физико-технических вопросов придется коснуться лишь в той мере, в какой это необходимо для понимания факторов, определяющих исключительно высокие технико-экономические показатели новых ламп, отослав читателя за более детальными сведениями к специальной литературе.

В табл. 1 приведены номинальные данные и габариты люминесцентных ламп, которые в основном выпускаются сейчас американской промышленностью. На рис. 1 показан внешний вид этих ламп. Нашей промышленностью пока выпускаются в опытном порядке лампы мощностью в 15 и 30 W, тождественные по размерам и электрическим данным с соответствующими американскими типами. Этот выбор обусловлен, по существу, случайными обстоятельствами, и нет никаких серьезных препятствий к тому, чтобы и у нас выпускались лампы всех нужных мощностей и размеров.

Охарактеризованы основные технико-экономические показатели новых источников света — люминесцентных ламп — и осветительных систем, базирующихся на этих лампах. Сопоставление их с показателями ламп накаливания приводит к выводу о настоятельной необходимости скорейшего массового внедрения в практику люминесцентных систем освещения. Переход к люминесцентным лампам выдвигает ряд важных и новых светотехнических проблем, что требует пересмотра многих из принятых в настоящее время норм и установок и значительного усиления работ в области светотехники.

Конструктивная схема люминесцентной лампы дана на рис. 2. Она представляет собой трубку, заполненную аргоном при давлении в несколько миллиметров ртутного столба, и содержит несколько миллиграммов ртути. Напряжение подается на электроды, впаянные в

в торцы трубки. При надлежащих условиях в лампе происходит дуговой разряд между электродами. Движущиеся в газовой среде с ускорением электроны и ионы приобретают определенный запас кинетической энергии, которую они

Таблица 1

Номинальные данные и габариты (в дюймах) ламп серии Mazda-F-Lamps (на февраль 1942 г)

Мощность, W	Ток, А	Напряжение на лампе, V	Напряжение сети, V	Длина, дюймы	Диаметр, дюймы	Обозначение колбы
6	0,15	45	110—125	9	5/8	T-5
8	0,18	54	110—125	12	5/8	T-5
14 <sup>2</sup>	0,37	41	110—125	15	1 1/2	T-12
15(T-8)	0,30	56	110—125	18	I	T-8
15(T-12)	0,33	48	110—125	18	1 1/2	T-12
20	0,35	62	110—125	24	1 1/2	T-12
30	0,34	103	{ 199—216 220—250 110—125 }	36	I	T-8
40	0,41	108	{ 199—216 220—250 110—125 }	48	1 1/2	T-12
65	1,35	50	110—125	36	2 1/8	T-17
100	1,45	72	{ 199—216 220—250 110—125 }	60	2 1/8	T-17

<sup>1</sup> Без учета потерь в дросселях.

<sup>2</sup> Для схемы последовательного включения двух ламп со специальной лампой накаливания (60 V, 0,5 A) в качестве балласта. Общая мощность двух ламп и балласта — 45 W на переменном токе, 38 W на постоянном.

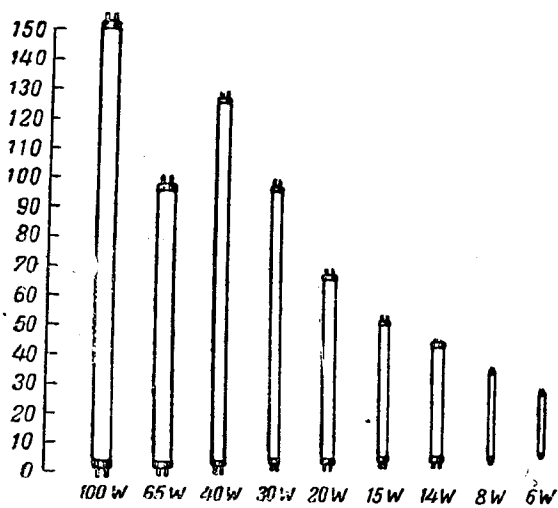


Рис. 1. Внешний вид люминесцентных ламп.

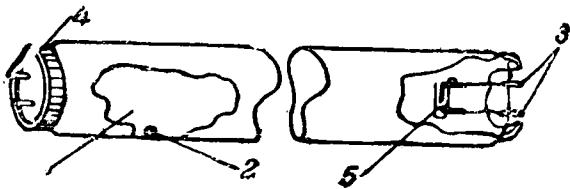


Рис. 2. Конструктивная схема люминесцентной лампы.

1—смесь аргона с парами ртути; 2—капля ртути; 3—штырьки цоколя; 4—цоколь; 5—электрод, покрытый оксидной пастой.

передают при столкновениях нейтральным молекулам газа, возбуждая их, т. е. переводя их оптический уровень. Эта энергия вслед за тем спонтанно отдается в окружающее пространство в виде излучения.

Таким образом, первичным физическим процессом, происходящим в лампе, является электрический разряд в заполняющем ее газе, при котором часть электрической энергии непосредственно (минуя нагревание) превращается в энергию излучения. Газовой средой, заполняющей лампу, является, как отмечено, в основном аргон. Давление паров ртути в лампе определяется температурой внутри нее, и так как эта температура очень низка (около  $50^\circ$ ), то давление паров ртути составляет около 0,01 мм рт. ст., в несколько сот раз меньше давления аргона. Тем не менее, свечение исходит почти исключительно от атомов ртути, свечение же аргона совершенно ничтожно и не играет практически никакой роли. Это обусловлено тем, что первый возбужденный уровень ртути расположен ниже, чем возбужденный уровень аргона, т. е. для возбуждения атома ртути требуется меньшая энергия. Из сказанного ясно, что в своей газоразрядной части люминесцентная лампа сходна с известными ртутными лампами («горное солнце»), но отличается от них несравненно меньшими давлениями ртутного пара (сотая доля миллиметра вместо атмосфер или даже десятков атмосфер в лампах сверхвысокого давления) и значительно меньшей плотностью тока (сотые доли ампера вместо ампер и десятков ампер на квадрат-

ный сантиметр). Эти обстоятельства обуславливают существенное различие между спектральным составом излучения этих ламп низкого давления и обычных ламп высокого и сверхвысокого давления. В лампах высокого давления весьма значительная доля излучения приходится на видимую часть спектра и почти все остальное излучение состоит из сравнительно длинноволновых ультрафиолетовых лучей (290—365 м $\mu$ ). В лампах низкого давления подавляющая часть энергии излучения сосредоточена в так называемой резонансной линии с длиной волны 254 м $\mu$ . Такая лампа сама по себе дает чрезвычайно мало видимого света и может рассматриваться практически лишь как источник коротковолнового ультрафиолетового излучения.

Рентабельность светотехнического применения ртутной лампы низкого давления связана с трансформированием в ней энергии ультрафиолетового излучения в видимый свет. В целях подобного преобразования на внутреннюю сторону трубки лампы наносят тонкий слой так называемого люминофора — вещества, обладающего способностью поглощать ультрафиолетовое излучение и под его воздействием светиться видимым светом. Люминофоры, применяемые в лампах, относятся к классу так называемых кристаллофосфоров. Они представляют собой неорганические мелкокристаллические порошки, в кристаллическую решетку которых вкраплены в ничтожном количестве атомы соответствующего тяжелого металла — активатора. С электрической точки зрения все кристаллофосфоры представляют собой полупроводники. Первичным актом при поглощении таким веществом кванта излучения является внутренний фотоэффект, т. е. отрыв одного из электронов от атома и перевод его в так называемую полосу проводимости. При этом часть переданной ему энергии электрон отдает решетке, т. е. переводит в тепло, а другую часть при последующей рекомбинации с одним из образовавшихся ионов излучает в виде меньшего кванта, т. е. излучения с большей длиной волны. Таким образом, в кристаллофосфорах происходит трансформация излучения с меньшей длиной волны в излучение более длинноволновое (правило Стокса). В частности, очевидно, таким образом можно осуществить достаточно экономично и трансформацию коротковолнового излучения ртутной лампы низкого давления в видимый свет. Для более детального ознакомления с этими вопросами можно рекомендовать доклады В. Л. Левшина, В. В. Антонова-Романовского и Д. И. Блохинцева на совещании по вопросам люминесценции, созванном Академией наук СССР в октябре 1944 г. (Известия АН СССР, серия физич., т. IX, № 4—5, 1945).

Спектральный состав и цвет свечения люминофоров зависит от их состава и в некоторой степени от условий приготовления. Например, силикат цинка, активированный марганцем, дает свечение зеленого цвета, вольфрамат магния — белесовато-голубого, силикаты цинка и бериллия и силикат кадмия — различные оттенки жел-

то-оранжевого свечения, борат кадмия дает насыщенный красный цвет и т. д. В видимом свете, излучаемом ртутной лампой низкого давления, на долю излучения кристаллофосфорами падает свыше 90% всей излучаемой энергии, видимое излучение ртутного разряда составляет менее 10%. Покрывая стенку одной и той же газоразрядной трубки различными люминофорами или их смесями, мы получаем поэтому возможность практически неограниченно варьировать спектральный состав и цвет излучения люминесцентных ламп. Оказывается возможным, в частности, так подобрать состав люминофорной смеси, чтобы лампа давала излучение того или иного оттенка белого цвета. Вопрос о цвете излучения люминесцентных ламп освещен в дальнейшем изложении.

Необычная, цилиндрическая форма люминесцентных ламп и их большая длина вызывают при первом знакомстве с ними особенно много возражений. Архитекторам и строителям очень хотелось бы «сжать» эти лампы и вместить их в привычные габариты. Постараемся пояснить, почему это невозможно. На рис. 3 показано примерное распределение потенциала вдоль оси газоразрядной лампы. Из рис. 3 видно, что часть подаваемого на лампу напряжения падает на очень небольшом участке, примыкающем к электродам, главным образом к катоду. Остальное падение напряжения происходит равномерно в так называемом положительном столбе или положительной колонне лампы, заполняющей почти всю ее длину. Обозначим  $U_a$ ,  $U_э$  и  $U_k$  — соответственные значения падения напряжения на лампе, в приэлектродном пространстве и в колонне,  $P_a$ ,  $P_э$  и  $P_k$  — мощность лампы и мощности, выделяемые в области электродного падения потенциала и в столбе. Очевидно,

$$\left. \begin{aligned} U_a &= U_э + U_k, \\ P_a &= P_э + P_k = I \cdot U_э + I \cdot U_k, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $I$  ток через лампу<sup>1</sup>.

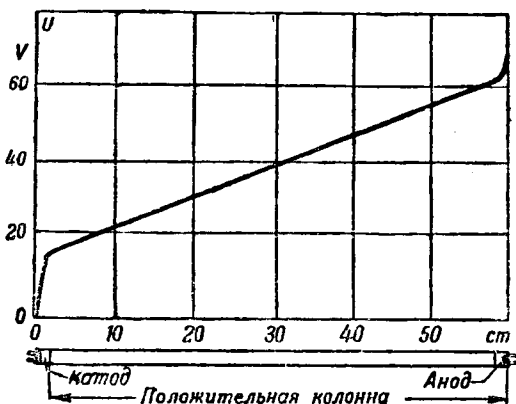


Рис. 3. Примерное распределение потенциала вдоль люминесцентной лампы.

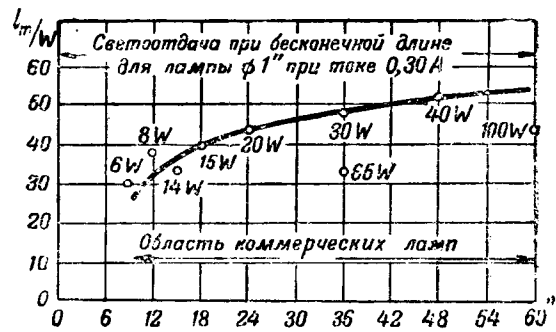


Рис. 4. Световая отдача в зависимости от длины лампы.

Мощность  $P_э$ , выделяемая в области электродного падения, расходуется на ионизацию газа и электродов, их разогрев и другие процессы, не сопровождающиеся излучением, т. е. светотехнически представляет собой потерю энергии. Величина электродного падения напряжения определяется в основном конструкцией ее электродов. В наиболее распространенных лампах типа, изображенного на рис. 1, она составляет 12—18 В. В колонне падение потенциала происходит равномерно на всей ее длине и характеризуется определенным значением градиента потенциала или напряженности электрического поля ( $V/cm$ ). Если обозначить длину лампы через  $l$ , то

$$U_k = gl,$$

т. е. полезное падение потенциала в колонне пропорционально длине лампы. Отсюда мы видим, что увеличение длины лампы прежде всего диктуется стремлением увеличить долю «полезной» мощности  $P_k$  по сравнению с потерями  $P_э$ .

Доля электрической энергии, трансформируемой в положительной колонне разряда в излучение резонансной линии ртути, определяется давлением ртутного пара и значением градиента напряжения в колонне, которое в свою очередь довольно сложным образом зависит от ряда факторов: плотности тока, состава и давления основного газа в лампе, диаметра трубки и т. д. Оптимальным для люминесцентных ламп является значение градиента 0,8—1,0  $V/cm$ . На основе этих данных Одэй и Сизель построили (рис. 4) зависимость между длиной лампы и ее относительной эффективностью (световой отдачей). Эта кривая показывает, что при длине лампы меньше 30 см становится крайне неблагоприятным соотношение между  $P_k$  и  $P_э$ , и световая отдача резко падает. Практически строят лампы значительно большей длины — до 1,5 м, что обусловлено прежде всего необходимостью обеспечить поглощение лампой достаточной мощности и стремлением рационально использовать сетевое напряжение.

Мощность люминесцентных ламп вообще невелика. Наиболее широким распространением пользуются лампы в 30 и 40 W, реже применяются лампы в 65 и 100 W, имеющие меньшую световую отдачу. Как видно из табл. 2, нагрузка на единицу длины этих ламп очень невелика. Для ламп в 30 и 40 W она составляет около  $1/3 W/cm$

<sup>1</sup> Коэффициент мощности лампы составляет около 0,95 и выше. Практически можно поэтому лампу рассматривать как активную нагрузку.

Таблица 2

Плотность тока, градиент напряжения и удельная нагрузка основных типов люминесцентных ламп

Диаметр трубки, дюймы	Номинальная мощность, W	Плотность тока, A/cm <sup>2</sup>	Градиент напряжения, V/cm	Нагрузка		Светоотдача лампы, lm/W
				W/cm	W/cm <sup>2</sup>	
1	15	0,060	0,96	0,33	0,041	39
1 1/8	30	0,067	0,96	0,33	0,041	48
	20	0,031	0,81	0,33	0,027	43
	40	0,034	0,78	0,34	0,028	52
2 1/8	65	0,059	0,39	0,71	0,036	32
	100	0,063	0,39	0,68	0,034	42

длины лампы. Естественно возникает мысль об увеличении нагрузки лампы за счет форсирования тока лампы. Однако, имеющиеся здесь возможности, как мы увидим, очень невелики, и попытки усиления тока в лампе приводят к заметному уменьшению ее светоотдачи.

Увеличение тока в лампе в принципе могло бы быть осуществлено двумя путями: либо повышением плотности тока при сохранении прежнего диаметра трубки, либо увеличением диаметра при сохранении прежней плотности тока. Первый из этих способов практически неосуществим, так как он приводит к уменьшению градиента напряжения в столбе и падению светоотдачи лампы. Для обеспечения оптимального давления ртутного пара в лампе необходимо температуру внутри нее поддерживать равной приблизительно 50°, что будет иметь место лишь при совершенно определенном соотношении между теплом, подводимым к стенкам трубки из разряда, и отдачей тепла стенками в окружающее пространство. Расчет и измерения показывают, что максимальная светоотдача имеет место при расходе мощности в лампе около 0,03—0,04 W/cm<sup>2</sup> поверхности лампы. Для каждой данной лампы это приводит к определенному значению плотности тока, отклонения от которого снижают светоотдачу.

Результаты измерений подтверждают сказанное. На рис. 5 даны вольтамперная характеристика лампы, световой поток  $\Phi_L$  и светоотдачи лампы в зависимости от напряжения на ней. Из рисунка видно, что, например, при увеличении силы тока с 0,15 до 0,50 А, т. е. при возрастании плотности тока в 3,3 раза, мощность вследствие уменьшения напряжения на лампе возрастает в 2,6 раза, а световой поток возрастает только в 1,8 раза. В результате светоотдача лампы падает до 65% первоначального значения. Падение светоотдачи частично обусловлено изменением в неблагоприятную сторону соотношения между  $P_k$  и  $P_s$ , частично — уменьшением доли электрической мощности, трансформируемой в ультрафиолетовое излучение лампы. Так или иначе сколько-нибудь значительное увеличение плотности тока по сравнению с принятыми сейчас значениями является, как видно, невозможным.

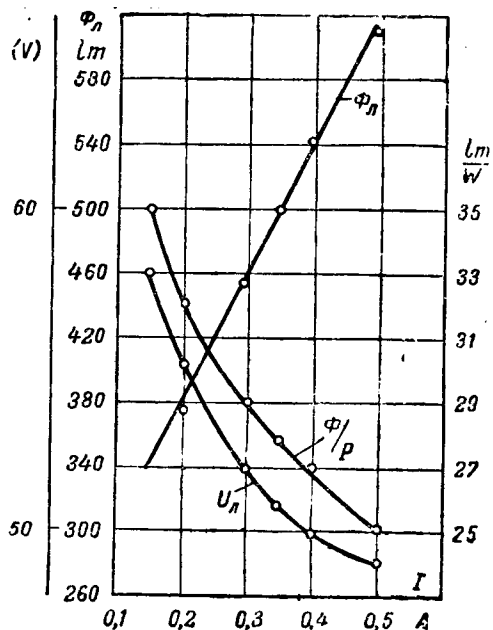


Рис. 5. Напряжение на лампе  $U_L$ , световой поток  $\Phi_L$  и светоотдача  $\frac{\Phi}{P}$  в зависимости от тока лампы.

Не дает благоприятных результатов и попытка увеличить диаметр трубки при сохранении плотности тока в ней. Достигаемое при этом увеличение нагрузки на единицу длины лампы покупается ценой падения светоотдачи. Это связано с тем, что при увеличении диаметра трубки уменьшается градиент напряжения в колонне, что приводит, как мы видели, к относительному уменьшению полезной мощности  $\eta_k$  и ухудшению условий разряда с точки зрения получения максимальной излучающей интересующей нас спектральной линии. В этом легко убедиться, сравнивая, например, приведенные в табл. 2 данные для ламп мощностью в 30 и 65 W, имеющих одинаковую длину.

Таким образом, и большая длина ламп и относительно небольшая мощность каждой отдельной лампы обусловлены — по крайней мере для современных типов ламп — сущностью физических процессов, происходящих в лампе, и вряд ли можно рассчитывать на возможность изменения этих обстоятельств в ближайшем будущем.

Часто поднимался вопрос о возможности изгибания ламп, чтобы придать им более компактную форму. В принципе это вполне возможно. Нам, например, приходилось для некоторых специальных целей изготавливать лампы U-образной формы. Технологические трудности изготовления таких ламп, и особенно нанесения на них люминофорного слоя, однако, весьма велики. Тем не менее, в начале 1945 г. фирма GEC сообщила, что ею подготавливается к выпуску новая серия люминесцентных ламп «Circline», имеющих вид трубок, согнутых в кольца разного радиуса. Сведениями о том, насколько удобными оказались эти лампы в эксплуатации и насколько широко они вошли в практику, мы еще не располагаем.

Для нашей промышленности освоение таких ламп весьма затруднительно, и вряд ли можно рассчитывать в ближайшие годы на их производство.

По конструкции электродов и связанной с нею величиной питающего лампы напряжения различают люминесцентные лампы низковольтные — с «горячим катодом» и высоковольтные — с «холодным катодом». Первые питаются непосредственно от осветительных сетей напряжения 120—220 V, вторые требуют напряжения в 600—800 V. Наибольшее распространение до последнего времени имели лампы первого типа, на которых мы прежде всего и остановимся. Как видно из рис. 2, электрод этой лампы выполнен в виде короткого отрезка биспиральной вольфрамовой проволоки, концы которой через посредство специальных впаянных в стекло вводов соединены с штырьками на цоколях лампы. Лампы включаются в сеть с помощью специальных патронов (держателей), показанных на рис. 6. Нити электродов покрыты слоем окислов бария и других щелочно-земельных элементов. Это оксидное покрытие обеспечивает при сравнительно низкой температуре нити, порядка 800—1000° C, достаточно интенсивную электронную эмиссию для того, чтобы разряд в лампе возник при нормальном сетевом напряжении. Вместе с тем при этих условиях катодное падение напряжения невелико (12—18 V), что обеспечивает возможность достаточно экономичной работы лампы при напряжении на ней около 50—100 V. Совокупность этих обстоятельств и позволяет питать лампы такого типа непосредственно от осветительных сетей, что является, конечно, крупным их преимуществом.

В нормальном рабочем режиме тепло, необходимое для поддержания нити лампы при указанной температуре, доставляется самим разрядом, главным образом, за счет бомбардировки электрода ионами в тот полупериод, когда он является анодом. Но для зажигания лампы при холодных электродах требуется напряжение не меньше 300 V, превышающее обычное напряжение сети. Поэтому для зажигания лампы необходимо иметь в цепи ее приспособление, либо дающее короткий импульс высокого напряжения, либо обеспечивающее предварительный разогрев электродов при зажигании лампы. Первый способ оказывается практически неудобным как по сложности требуемого приспособления, так и в силу неблагоприятного влияния его на срок службы электродов. Обычно для зажигания лампы соединяют на короткое время свободные концы электродов (рис. 7), которые оказываются при этом включенными в сеть последовательно и разогреваются током. Когда через короткое время цепь электродов размыкается, эмиссия с электродов оказывается достаточной для возникновения в трубке разряда. Надежному зажиганию благоприятствует и то обстоятельство, что при прохождении тока через электроды напряжение между концами каждого из них достигает 12 V. При этом между концами электродов зажигается так называемая низковольтная дуга,

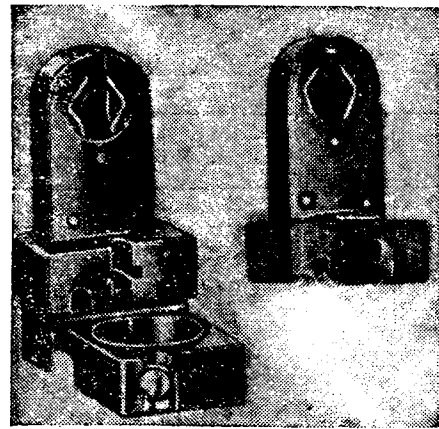


Рис. 6. Патроны (держатели) для люминесцентных ламп. Патрон слева снабжен держателем для стартера.

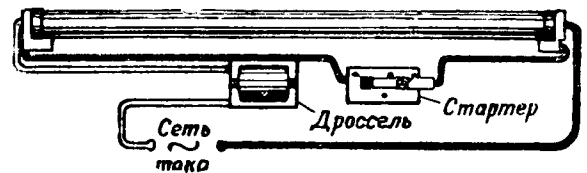


Рис. 7. Схема включения люминесцентной лампы.

которая при размыкании цепи электродов перебрасывается с одного электрода на другой. Замыкание и размыкание цепи электродов осуществляется автоматически с помощью так называемого стартера — миниатюрного газоразрядного реле. Освоенные нашей промышленностью стартеры работают вполне удовлетворительно, и зажигание ламп происходит практически безотказно.

Лампы описанного типа — низковольтные лампы с самокалиющимися катодами — являются к настоящему моменту единственными люминесцентными лампами, которые производятся в больших количествах и проверены в массовой эксплуатации. Наряду с этим, однако, в течение последних лет в США все время велась разработка и ламп иного типа — с холодными катодами. Ведется такая разработка и у нас. В начале 1945 г. фирмой GEC были опубликованы первые сведения о подготовленной ею к выпуску серии ламп этого типа под названием «Slim-line». Данные о габаритах и электрическом режиме этих ламп приведены в табл. 3. Электроды этих ламп представляют собой массивные, покрытые оксидной пастой цилиндры, температура которых при работе лампы не поднимается выше 150°. В соответствии с этим их электронная эмиссия значительно меньше, и катодное падение потенциала достигает 60—80 V. Для зажигания и для повышения экономичности ламп приходится питать их от повышенного напряжения, доставляемого специальным небольшим трансформатором, монтируемым в арматуре лампы. Из соображений безопасности обычно такую арматуру делают закрытой и снабжают блокировкой. Все это вносит, конечно, известные осложнения и затрудняет внедрение этих

Таблица 3

## Основные данные о люминесцентных лампах серии Slimline

Тип лампы	Длина, дюймы	Диаметр, дюймы	Ток, А	Световой поток, lm
42-T-6	42	3/4	100	900
			200	1 400
64-T-6	64	3/4	100	1 400
			200	2 150
72-T-8	72	1	100	1 400
			200	2 350
			100	1 950
96-T-8	96	1	200	3 300

ламп. С другой стороны, ГЕС отмечает следующие их преимущества: высокую светоотдачу, достигающую 60 lm/W, мгновенное зажигание и отсутствие стартеров, большой срок службы, возможность в широких пределах варьировать ток лампы и ее световой поток. Для увеличения градиента напряжения в колонне в лампах этого типа прибегают к уменьшению диаметра трубки и увеличению давления аргона. Тем не менее, длина этих ламп превосходит длину ламп с горячими катодами и достигает 2,5 м. Отсутствие данных о результатах эксплуатации не дает еще возможности сделать сколько-нибудь определенные выводы о преимуществах и перспективах ламп того и другого типа, но несомненно, что лампы с холодным катодом заслуживают самого серьезного изучения и внимания.

Подобно всем другим газоразрядным источникам света люминесцентные лампы имеют падающую вольтамперную характеристику (рис. 5). Устойчивое горение, как известно, возможно лишь в случае, когда последовательно с лампой включается сопротивление, на которое падает примерно половина сетевого напряжения. В цепь лампы, последовательно с ней, для этой цели обычно включается небольшой дроссель (рис. 7), обладающий необходимым индуктивным сопротивлением. Активная мощность, теряемая в таком дросселе, составляет 20—30% от мощности лампы, но коэффициент мощности при этом снижается до совершенно недопустимого значения 0,45—0,50, вследствие чего возникает необходимость в установке соответствующих компенсирующих конденсаторов. Предложены многочисленные и усложненные схемы включения как отдельных ламп, так и групп из двух и четырех ламп, в которых достигаются приемлемые значения коэффициента мощности и почти полностью устраняется стробоскопический эффект, обусловленный периодическими изменениями светового потока ламп при питании их переменным током. В некоторых из этих схем устраняется необходимость применения стартеров, но, повидимому, очень широкого распространения такие бесстартерные системы не получили.

Необходимость применения сложных схем стартеров, дросселей, трансформаторов или конденсаторов, конечно, увеличивает первоначаль-

ные установочные затраты и тормозит темпы внедрения новых ламп. Все же технико-экономические и светотехнические преимущества их настолько велики, что скорейший и массовый переход на люминесцентные системы освещения является необходимым. Об этом же свидетельствуют и невиданно высокие темпы внедрения этих ламп в США. Начав в 1938 г. с выпуска пробной партии в 250 000 шт., американцы уже к 1941 г. довели выпуск их до 25 млн. шт. в год. Сейчас производство люминесцентных ламп в США идет, повидимому, на уровне 100—200 млн. шт. в год.

Каковы же те технико-экономические и светотехнические преимущества новых источников света, которые заставляют считать, что именно на них должно базироваться все дальнейшее развитие техники электрического освещения? Важнейшим и решающим показателем является исключительно высокая экономичность люминесцентных систем освещения. Как видно из данных, приведенных в табл. 4, светоотдача люминесцентных ламп в зависимости от их мощности и цвета имеет значения от 30 до 52 lm/W. В новых типах ламп, как уже упоминалось, светоотдача доведена до 60 lm/W, и это не предел: вполне можно ожидать в ближайшие годы значительного дальнейшего возрастания экономичности люминесцентных ламп. Между тем для ламп накаливания светоотдача по ОСТ 5154 колеблется в пределах от 9 lm/W для ламп мощностью в 25 W до 17,45 lm/W для ламп мощностью в 500 W. Важно отметить, что уже в течение примерно 30 лет возрастание экономичности ламп накаливания происходит чрезвычайно медленно. По самой сущности физических законов, управляющих излучением раскаленных тел, дальнейший сколько-нибудь существенный прогресс этих ламп весьма труден и маловероятен. Сравнение приведенных показателей показывает, что светотехническое использование электрической

Таблица 4

Основные светотехнические показатели люминесцентных ламп<sup>1</sup>

Мощность, W	Лампы white			Лампы daylight			Лампы softwhite		
	Световой поток, lm	Светоотдача, lm/W	Яркость*, sb	Световой поток, lm	Светоотдача, lm/W	Яркость*, sb	Световой поток, lm	Светоотдача, lm/W	Яркость*, sb
15 (1")	585	39	0,70	525	35	0,63	435	29	0,53
15 (1 1/2")	525	35	0,48	450	30	0,41	400	26,5	0,37
20	860	43	0,54	760	38	0,48	640	32	0,41
30	1 450	48	0,86	1 300	43	0,76	1 100	37	0,65
40	2 100	52	0,60	1 800	45	0,52	1 500	37	0,43
65	2 100	32	0,53	1 800	28	0,45	—	—	—
100	4 200	42	0,74	3 700	37	0,66	2 950	29,5	0,53

<sup>1</sup> По данным на февраль 1942 г.<sup>2</sup> Максимальная яркость в центре лампы перпендикулярно ее оси.



энергии осуществляется в люминесцентных лампах в 3—3,5 раза экономичнее, чем в лампах накаливания.

Физические причины этого различия станут ясны нам, если сравнить строение энергетического баланса в лампах того и другого типа. Округляя цифры, можно считать, что в лампах накаливания 7—12% электрической энергии превращается в видимое излучение, 70—80% энергии излучаются лампой в виде инфракрасного, светотехнически бесполезного, излучения и 20—30% составляют так называемые тепловые потери, т. е. превращение электрической энергии непосредственно в тепло. Только эти тепловые потери и являются по существу резервом, за счет которого могла бы возрасти экономичность ламп накаливания, так как сколько-нибудь значительное уменьшение доли инфракрасного излучения и увеличение доли видимого излучения могли бы быть реализованы лишь при весьма значительном повышении температуры нити лампы, что, повидимому, является практически неосуществимым.

Совершенно иначе строится энергетический баланс люминесцентных ламп. Как видно из рис. 8, изображающего этот баланс в наглядной графической форме, в процессе газового разряда 2% электрической энергии превращается в видимое излучение, свыше 50% преобразуется в излучение ультрафиолетовое. В люминофорном слое лампы примерно 1/3 энергии этого излучения трансформируется в видимый свет. Суммарный энергетический к. п. д. люминесцентной лампы, таким образом, превышает 18%, что в два с лишним раза больше, чем для ламп накаливания. То обстоятельство, что светотдача люминесцентных ламп выше, чем ламп накаливания, не в два, а в три — даже три с половиной раза, объясняется более выгодным спектральным составом их видимого излучения, содержащего относительно значительно большую долю тех лучей, к которым человеческий глаз обладает высокой чувствительностью. Из рисунка видно также, что лучистая теплота, испускаемая лампой (ее инфракрасное излучение), составляет только 27%

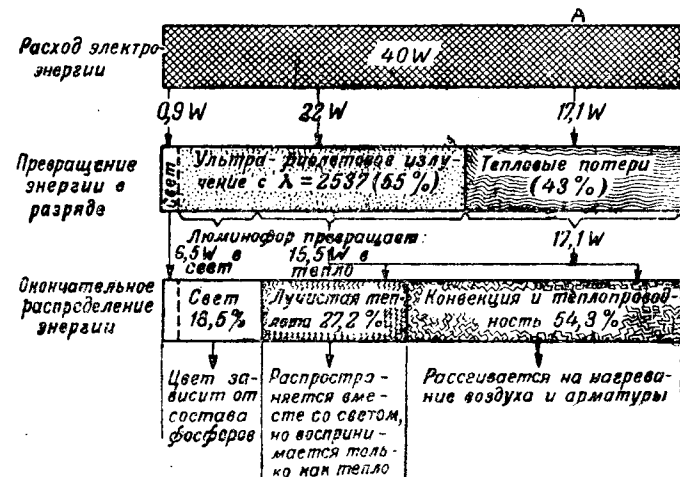


Рис. 8. Энергетический баланс 40-W люминесцентной лампы.

электрической мощности, т. е. в три раза меньше, чем для ламп накаливания. Это обстоятельство также весьма важно, так как оно значительно уменьшает нагревание интенсивно освещаемых предметов и очень облегчает отвод избыточного тепла (вентиляцию) при наличии больших мощностей осветительных систем.

В табл. 5, заимствованной из доклада Р. А. Нилендера на упомянутом выше совещании по люминесценции, мы приводим сравнительные данные о расходе электрической энергии при применении ламп накаливания различной мощности и соответствующих по световому потоку комбинаций люминесцентных ламп. Из этих данных видно, что сравнение ламп по их светотдаче позволяет ожидать от внедрения люминесцентных ламп экономии, примерно равной 60% от ныне расходуемой мощности.

Такое сравнение, однако, является не вполне точным. Лампы, особенно лампы накаливания, требуют светильника. Сравнить надо поэтому, строго говоря, не лампы, а системы освещения, основанные на применении светильников того или иного типа. Такое сравнение оказывается еще более выгодным для люминесцентных ламп, так как вследствие малой яркости этих ламп люминесцентные светильники дают при лучших светотехнических характеристиках более экономное использование светового потока ламп, чем све-

Таблица 5

Мощности, расходуемые лампами накаливания и люминесцентными лампами

Лампы накаливания				Люминесцентные лампы				Ориентир. экономия энергии, %
Мощность, W	Напряжение, V	Световой поток, lm	Количество ламп	Мощность		Световой поток		
				W		lm		
				1 лампы	об-щая*	1 лампы	общий	
71	127	900	1	20	24	860	860	81
96	127	1 300	2	15	37,5	585	1 170	61
109	220	1 300	1	30	37,5	1 450	1 450	66
100	127	1 275	1	30	37,5	1 450	1 450	62
100	220	1 000	2	15	37,5	585	1 170	62
150	127	2 175	1	40	50	2 100	2 100	67
150	220	1 710	2	20	50	860	1 720	67
200	127	3 050	2	30	75	1 450	2 900	62
200	220	2 510	3	20	75	860	2 580	62
300	127	4 875	3	30	113	1 450	4 350	62
300	220	4 140	2	40	100	2 100	4 200	67
			1	100	125	4 200	4 200	58
500	127	8 750	2	100	250	4 200	8 400	50
500	220	7 560	6	30	225	1 450	8 750	53
			4	40	200	2 100	8 400	60

\* С учетом потерь в дросселях, принятых равными 25% от мощности ламп. Р. А. Нилендер принято несколько заниженное значение этих потерь (10%) и соответственно получил экономию около 70%.

тильники с лампами накаливания. Действительно, светящаяся нить лампы имеет огромную яркость, примерно в 100 sb, даже поверхность матированной колбы имеет яркость в 10—15 sb. Между тем, как видно из табл. 1, яркость поверхности люминесцентной лампы не превышает 0,85 sb, т. е. лишь немногим превышает допустимое по нормам значение яркости поверхности светильников. Поэтому, при сколько-нибудь высоких требованиях к качеству освещения, приходится лампы накаливания окружать со всех сторон рассеивающей поверхностью (молочные шары, сборные люцетты) или по крайней мере обеспечивать весьма значительные защитные углы арматуры. Напротив, лампы люминесцентные в большинстве случаев применяют в арматурах типа открытых диффузных отражателей с сравнительно небольшим защитным углом, а часто и вовсе без арматуры. Некоторые расчеты, приводимые ниже, иллюстрируют то огромное значение, которое имеет это обстоятельство.

В системах общего освещения с большим числом более или менее равномерно распределенных светильников, достоинство их с точки зрения экономичности можно характеризовать так называемым «коэффициентом использования». Под этим коэффициентом разумеют отношение светового потока, распределенного на полу или иной расчетной поверхности, к световому потоку всех ламп. Если площадь помещения равна  $S$  ( $m^2$ ), средняя освещенность  $F$  (lx), а суммарный световой поток ламп  $\Phi$  (lm), то коэффициент использования

$$k = \frac{SF}{\Phi}.$$

Коэффициент использования светильника находится в довольно сложной зависимости от размеров помещения, высоты подвеса светильников и коэффициентов отражения потолка и стен. В светотехнике принято характеризовать каждое помещение, в зависимости от его размеров и высоты подвеса светильников, определенным численным или буквенным индексом. Для каждого из более или менее распространенных типов светильников определяют значения коэффициентов использования для всех значений индекса помещения и для различных комбинаций коэффициентов отражения потолка и стен. Для люминесцентных ламп соответствующие данные приведены, например, в статье Поттера и Дарлея, напечатанной в *Illuminating Engineering* (№ 2, 1942 г.) и в обзоре светильников, опубликованном GEC в *Magazine of Light* (№ 9, 1940). Пользуясь этими данными, мы вычислили удельную мощность (мощность на  $1 m^2$  площади пола), необходимую для получения освещенности в 100 lx при применении пяти наиболее распространенных у нас типов светильников с лампами накаливания и пяти наиболее распространенных американских типов светильников с люминесцентными лампами. Расчеты выполнены для четырех значений индекса помещения. Коэффициент отражения потолка принят равным 50%, а стен 30%. Результаты этих расчетов све-

дены в табл. 6, причем в качестве типичных помещений с указанными в таблице индексами были приняты следующие:

Индекс помещения $C$	(3,0)	$E$ (2,0)	$F$ (1,5)	$I$ (0,8)
Размеры, m	$24 \times 36$	$12 \times 18$	$8 \times 12$	$4 \times 6$
Высота подвеса, m	7—8	6—7	5	5

Для люминесцентных ламп первая из приведенных в таблице цифр относится к лампам white мощностью в 20 W, вторая — к таким же лампам мощностью в 40 W. Для ламп накаливания первая цифра относится к лампам мощностью в 100 W для помещений с индексами  $F$  и  $I$  и 200 W для помещений с индексами  $C$  и  $E$ ; вторая цифра относится к лампам мощностью в 200 W в помещениях первых двух типов и 500 W в остальных помещениях.

Из табл. 6 видно, что для создания освещенности в 100 lx необходимая удельная мощность для светильников с лампами накаливания составляет 20—60 W/ $m^2$ , для люминесцентных — 4—10 W/ $m^2$ . Учитывая сделанное выше замечание, что лампы накаливания в большинстве случаев требуют применения светильников типа шаров или люцетт, а люминесцентные гораздо чаще допускают применение простых открытых отражателей, мы неизбежно приходим к выводу, что переход к люминесцентным системам освещения дает в среднем минимум пятикратную экономию энергии по сравнению с лампами накаливания. Что это означает в масштабе народного хозяйства СССР, ясно каждому энергетiku и не требует пояснений. Укажем лишь, что по подсчетам, выполненным в Министерстве электропромышленности, массовое внедрение люминесцентных ламп эквивалентно экономии в 800 000 kW установленной мощности.

После светотдачи второй важнейшей экономической характеристикой всякого источника света является его срок службы. Здесь также решающее превосходство принадлежит люминесцентным лампам. По действующему у нас стандарту срок службы ламп накаливания—1 000 h. Гарантируемый американскими фирмами срок службы люминесцентных ламп зависит от среднего числа часов их горения, приходящегося на одно зажигание. При трехчасовом среднем горении на одно зажигание фирмы гарантируют срок службы люминесцентных ламп в 2 500 h, при шестичасовом горении — 4 000 h и при 12 h горении — 6 000 h. При этом к концу срока службы уменьшение светового потока по сравнению с начальным значением не превышает 20—30%. Это обстоятельство в очень значительной степени компенсирует более высокую стоимость люминесцентных ламп.

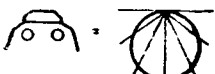
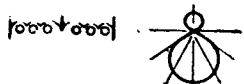
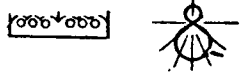
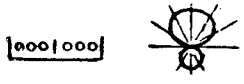
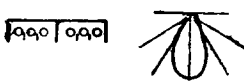

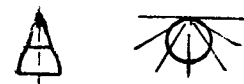
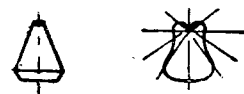
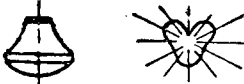

С точки зрения светотехнической одной из важнейших особенностей люминесцентной лампы является то, что она представляет такой источник света, цвет и спектральный состав излучения которого можно варьировать в весьма широких пределах. Все прежние источники, в частности лампы накаливания, такой возможности практически не давали. Попытки изменить их цвет при помощи поглощающих сред (светофильтров) приводили к чрезвы-

чайно резкому снижению светоотдачи, делавшему такие источники практически неприемлемыми. Поэтому приходилось принимать цвет излучения этих источников как нечто данное и не поддающееся изменению, хотя известно, что цветопередача при искусственном освещении существенно различается от цветопередачи при естественном освещении. Поэтому нельзя было всерьез ставить задачу о приспособлении оттенка освещения к специфическим условиям работы глаза в тех или иных условиях, например, при сортировке раз-

личных предметов, требующей особенно тонкого различения оттенков определенного цвета. Между тем такого рода подгонка цветности освещения к условиям работы глаза в ряде случаев (например, при сортировке шерсти, при отборе породы на углеобогатительных лентах и т. п.) имела бы весьма важное значение. В других случаях, — например, при освещении художественных музеев, а также предприятий текстильной, лакокрасочной, полиграфической и многих других отраслей промышленности — чрезвычайно

Таблица 6

Удельная мощность, необходимая для получения освещенности в 100 лк, при применении различных светильников с лампами накаливания и люминесцентными

Тип светильника	Помещение							
	Индекс С (3,0)		Индекс Е (2,0)		Индекс F (1,5)		Индекс I (0,8)	
	Коэффициент использования	Удельная мощность, W/m <sup>2</sup>	Коэффициент использования	Удельная мощность, W/m <sup>2</sup>	Коэффициент использования	Удельная мощность W/m <sup>2</sup>	Коэффициент использования	Удельная мощность W/m <sup>2</sup>
<b>I. Люминесцентные лампы</b>								
	0,62	4,0—4,7	0,55	4,4—5,3	0,50	4,7—5,6	0,39	5,8—7,0
	0,64	3,7—4,4	0,54	4,4—5,4	0,52	4,7—5,5	0,48	5,2—6,0
	0,41	5,8—7,3	0,35	6,7—8,2	0,33	7,3—8,5	0,30	8,3—9,1
	0,36	6,7—8,0	0,30	8,0—9,5	0,28	8,4—10,2	0,25	10,4—11,2
	0,39	6,4—7,4	0,35	6,7—8,2	0,34	6,8—8,4	0,32	8,3—9,1
<b>II. Лампы накаливания</b>								
	0,36	16,2—18,3	0,33	18,5—19,4	0,31	20,8—25,0	0,23	25,0—33,0
	0,48	11,6—14,8	0,44	13,8—14,8	0,41	16,7—18,7	0,32	20,8—25,0
	0,43	13,3—15,3	0,37	16,2—17,6	0,33	20,8—24,0	0,24	25,0—33,0
	0,28	20,2—23,2	0,23	25,4—28,5	0,20	33,0—39,6	0,13	50,0—58,0
	0,30	18,3—21,8	0,26	23,2—25,0	0,22	29,2—35,2	0,16	41,5—50,0

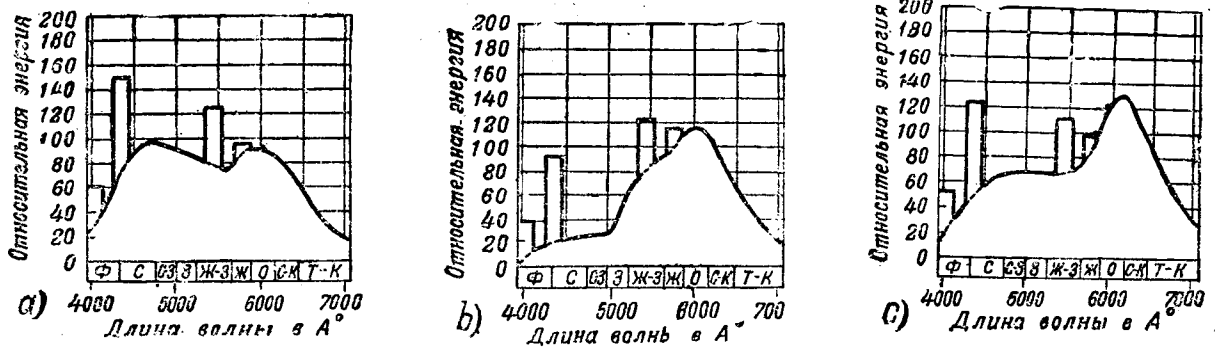


Рис. 9. Спектральное распределение энергии излучения люминесцентной лампы.  
 а — лампы „daylight“, б — лампы white, с — soft-white (столбики изображают излучения линий ртутного разряда).

важно было бы обеспечить такое же восприятие всех цветов, как и при естественном освещении. Только люминесцентные лампы дают возможность разрешить такого рода проблемы.

В настоящее время американская промышленность выпускает пять типов цветных люминесцентных ламп (красные, золотистые, лилово-розовые, зеленые и синие) и три типа ламп различных оттенков белого цвета. Лампы цветные имеют весьма ограниченную область применения, преимущественно для целей декоративного освещения. Основное светотехническое значение имеют три типа белых ламп, спектральные кривые которых приведены на рис. 9. Эти лампы известны под фирменными названиями — лампы дневного света (daylight), «белых» (white) и лампы мягкого белого цвета (soft-white). Цвет их излучения близок к цвету теплового излучения, характеризующегося цветовыми температурами соответственно в  $6500^\circ$ ,  $2800^\circ$  и  $3500^\circ$  С, но большого значения этим характеристикам придавать не стоит, ибо кривые спектрального распределения их интенсивности весьма существенно разнятся от излучения тепловых излучателей при указанных температурах.

Наибольший интерес к себе вызвали лампы дневного света. Как видно из рис. 10, цвет этих ламп и спектральное распределение их излучения действительно довольно близки к цвету и спектральному распределению естественного света. Наиболее существенно то, что благодаря этому цветопередача при освещении этими лампа-

ми практически почти не отличается от цветопередачи при естественном освещении, т. е. все цвета и их соотношения воспринимаются так же, как при дневном свете. Это подтверждено многочисленными исследованиями как американскими, так и выполненными у нас Е. С. Рагнером и Д. А. Шкловером. Небольшой имеющийся у нас опыт практической эксплуатации этих ламп полностью подтверждает эти заключения. Например, испытания, проведенные при участии академика И. Э. Грабаря и ряда других крупнейших наших художников, показали, что даже изощренный глаз художника остается вполне удовлетворенным той цветопередачей, которую дают эти лампы. По мнению участвовавших в испытаниях художников, люминесцентные лампы не только обеспечивают полноценную экспозицию художественных сокровищ наших музеев в течение всего дня и вечера, но и дают художникам возможность работать при вечернем освещении. Очень трудно выразить значение этих фактов в денежных или каких-нибудь иных объективных показателях, но первостепенное их значение не подлежит сомнению. Точно также люминесцентные лампы дневного света полностью решают проблему освещения для тех предприятий, где важна естественная цветопередача.

Нужно, однако, заметить, что для целей общего освещения лампы дневного света оказались, сколь это ни кажется на первый взгляд парадоксальным, не вполне удовлетворительными, и в широкой светотехнической практике (в США) получили меньшее распространение, чем два других типа белых люминесцентных ламп. Свет дневных ламп в обычных условиях воспринимается как слишком холодный, слишком белый. Причина, или по крайней мере, одна из причин этого явления, становится ясной из работы голландского исследователя Крюйтера, который показал, что минимальный и максимальный уровни освещенности, между которыми лежит зона «физиологического комфорта», зависит от цветовой температуры источника. Результаты Крюйтера изображены на рис. 11. Каждой цветовой температуре соответствует лежащий между двумя пунктирными кривыми интервал освещенностей, в котором освещение физиологически воспринимается как достаточное и не

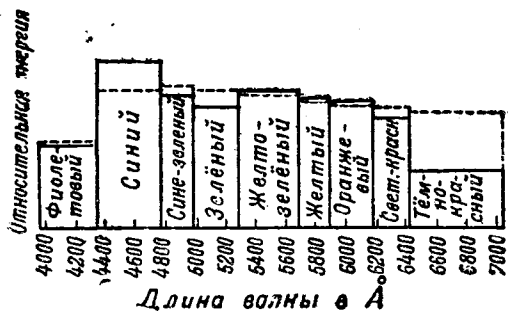


Рис. 10. Сравнительное распределение энергии в спектре лампы daylight (сплошная линия) и в естественном освещении в ясный июньский день (пунктир). Площадь каждого столбика характеризует количество энергии в соответствующей спектральной области указанного цвета.

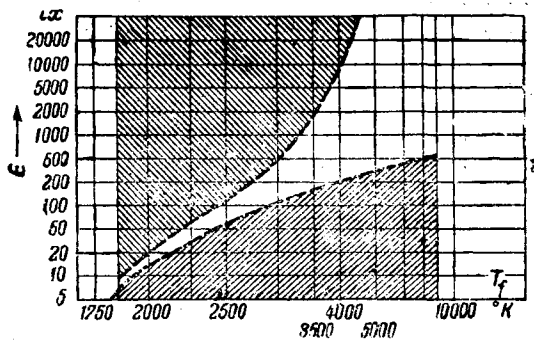


Рис. 11. Минимальный и максимальный уровни освещенности, в интервале между которыми освещенность создает физиологический комфорт, в функции от цветовой температуры источника (по Крюйтеру).

чрезмерное. Мы видим, что для ламп накаливания с температурой около  $3000^{\circ}$  этот интервал соответствует значениям  $100\text{--}500\text{ lx}$ , для ламп же дневного света с цветовой температурой свыше  $6000^{\circ}$  минимальная освещенность должна была бы составлять  $500\text{ lx}$ . В ближайшее время достижение такого уровня освещенности является для нас невозможным. Повидимому, и у нас наибольшее распространение получают лампы более теплых оттенков, которые, кстати, дают и более высокую светоотдачу (табл. 5).

Из других, менее важных, преимуществ люминесцентных ламп мы отметим их высокую стойкость к вибрациям и ударам, значительно менее резкую, чем для ламп накаливания, зависимость светового потока от напряжения сети и взрывобезопасность, дающую, например, возможность решить с их помощью проблему освещения шахт, опасных по газу и пыли.

Недостатком новых ламп или по крайней мере обстоятельством, ограничивающим область их применения, является чувствительность их к колебаниям температуры окружающей среды. Указанную выше высокую светоотдачу лампы имеют при нормальной комнатной температуре. Повышение или понижение этой температуры на  $10\text{--}15^{\circ}$  значительно снижает светоотдачу, а при температуре около нуля лампы вообще становятся практически непригодными. Таким образом, следует иметь в виду, что в своем теперешнем виде люминесцентные лампы могут применяться только для освещения внутренних, нормально отапливаемых помещений. Ни для наружного освещения, ни для освещения очень холодных или очень горячих помещений они не пригодны.

Полная экономическая оценка результатов внедрения люминесцентных систем освещения не может, конечно, базироваться только на подсчете экономии электроэнергии. Она должна учитывать и ряд других факторов, прежде всего стоимость ламп и начальную установочную стоимость осветительной системы. Такого рода расчеты американскими экономистами публиковались неоднократно, и все они показывают высокую рентабельность люминесцентных систем освещения. Непосредственно переносить в наши условия эти подсчеты, разумеется, нельзя, ибо они

исходят из американских цен на энергию и осветительные приборы — цен, в большой мере обусловленных конъюнктурными условиями. Интересно отметить, что дополнительный расход металлов — железа и меди — на изготовление светильников для люминесцентных ламп и дросселей к ним значительно меньше, чем экономия этих материалов, расходуемых в генераторах и сетях для создания необходимой дополнительной мощности, требуемой лампами накаливания. По подсчетам Кэверли при замене существующих систем освещения люминесцентными мы получаем экономию в  $35\text{ t}$  меди и  $270\text{ t}$  стали на  $100\text{ kW}$  мощности осветительной системы с лампами накаливания при сохранении прежнего светового потока.

Сказанное выше не только позволяет утверждать беспспорную необходимость скорейшего массового внедрения люминесцентных ламп, но и позволяет также наметить пути их внедрения.

Установка совершенно новых светильников, монтаж дросселей и стартеров, установка компенсирующих конденсаторов и т. д. в первую очередь потребуют перераспределения световых точек, т. е. смены существующей внутренней проводки. Вообще переход к люминесцентным лампам означает полную смену всей осветительной системы и полное или почти полное обесценение существующей.

Из этого основного факта вытекают два важных следствия. Первое — развертывание производства должно идти комплексно. Иначе говоря, следует обеспечить не только производство новых ламп, но и светильников, дросселей, стартеров, патронов и т. д. Второе — внедрение люминесцентных систем освещения следует начинать с нового строительства. Действительно, как бы обоснованы с экономической точки зрения ни были затраты на замену существующей системы освещения люминесцентной, ясно, что столь крупные единовременные расходы могут быть произведены лишь в определенной последовательности и что процесс замены всей ныне действующей осветительной системы новой неизбежно должен быть растянут на довольно длительный период времени. Но было бы нецелесообразно также проектировать сейчас для нового строительства устаревшие осветительные системы с лампами накаливания, заведомо зная, что через короткий срок их придется заменять новыми, несравненно более совершенными.

Таким образом, строителям необходимо ориентировать на широкое применение люминесцентных систем освещения, а проектные организации уже сейчас должны приступить к проектированию таких систем для объектов, которые вступят в строй в ближайшие годы. Но для этого необходимо прежде всего, чтобы строители получили уверенность в том, что в нужное время они получат люминесцентные лампы и все то, что для них требуется, в необходимом количестве и надлежащего качества.

Здесь мы вплотную подходим к вопросу о фактическом положении дел в области производства новых источников света. Положение это

весьма безотрадное и по нашему глубокому убеждению по причинам не столько объективным, сколько субъективным: главным препятствием к скорейшему внедрению люминесцентных ламп является недооценка их роли и значения.

Советские физики и техники своевременно оценили перспективы новых источников света. Особенно значительна роль академика С. И. Вавилова, под руководством которого разработка этих ламп в разных научных учреждениях велась с 1939 г. К началу 1941 г. на сессии Академии наук СССР академик С. И. Вавилов продемонстрировал первые образцы советских люминесцентных ламп. Разработка ламп тогда же была передана Московскому электроламповому заводу. Предполагалось обеспечить уже в 1942 г. выпуск пяти миллионов таких ламп. Война, конечно, сорвала все эти планы. Большой заслугой руководителей завода является, однако, то, что даже в самые трудные годы войны работа над этими лампами на заводе не прекращалась, а с 1943 г. велась относительно интенсивно, конечно, в меру весьма ограниченных возможностей завода, не получавшего в этом отношении почти никакой помощи и поддержки. К концу войны завод весьма существенно улучшил первоначальную переданную ему разработку и успешно разрешил ряд технологических вопросов, связанных с массовым производством. Завод сейчас технически полностью подготовлен к организации производства новых источников света. Тем не менее, такого производства по существу еще нет. Лишь недавно на заводе пущена небольшая мастерская полулабораторного типа, которая может дать несколько десятков тысяч ламп в год, что явно недостаточно не только для целей практической эксплуатации, но даже для экспериментальных установок. К тому же завод производит только вакуумные изделия — лампы и стартеры. Производства же дросселей, патронов, светильников нет даже и в таких малых масштабах. Перспективный план производства люминесцентных ламп в Министерстве электропромышленности отсутствует.

Переход к широкой эксплуатации люминесцентных ламп составляет совершенно по-новому поставить ряд важнейших светотехнических проблем. Не касаясь упомянутых выше проблем колориметрических, связанных с спектральным составом излучения ламп и даваемой ими цветопередачей, остановимся лишь на важнейшем из возникающих здесь вопросов — о наиболее рациональном способе использования тех исключительных возможностей, которые открывают перед нами люминесцентные лампы. Принципиально мы получаем возможность либо раз в пять сократить расход энергии при сохранении существующего уровня освещенности, либо во столько же раз повысить освещенность при сохранении расхода энергии. Какое из этих двух решений или, вернее, какой компромисс между этими двумя решениями является наиболее рациональным? Таков первый и важнейший вопрос, на который должны дать ответ наши све-

тотехники и специалисты по охране труда. Не пытаясь в рамках этой статьи дать конкретное решение этого вопроса, требующего детального и углубленного изучения, мы во всяком случае высказываемся за резкое повышение существующих норм освещенности при переходе к люминесцентным системам освещения, поскольку эти системы дают возможность осуществить такие повышения не только без увеличения расхода энергии, но даже с значительной ее экономией.

Нужно иметь в виду, что принятые в СССР нормы освещенности никак не могут считаться удовлетворительными с точки зрения науки о видении, исследующей влияние различных характеристик освещения на функции глаза и на жизнедеятельность человека в целом. Например, для учреждений допускается освещенность в 50 lx, для мелких и точных работ на станках — 100 lx, и даже для таких работ, как граверные, — всего 200 lx. В США в 1938 г. средняя общая освещенность составляла 70 lx. Комментируя эту цифру, президент американского светотехнического общества Атуотер считал ее недопустимо низкой и ставил целью достижение в ближайшее время уровня освещенности в 500 lx, а теоретически оптимальным Атуотер считает уровень в 3 000 lx. Огромное число появившихся в мировой печати статей и сообщений ясно показывает, что такое повышение освещенности имело бы чрезвычайно благоприятное влияние на условия работы предприятий. Повышение производительности труда, уменьшение брака, снижение утомляемости и производственного травматизма во много раз перекрывают увеличенную стоимость освещения.

Если бы мы потребовали резкого повышения норм освещенности, оставаясь на базе старой светотехники, то это было бы беспочвенным прожектерством. Всякому ясно, что не представляется возможным в ближайшие годы в несколько раз повысить расход энергии на цели освещения. Но если новые источники света позволяют повысить нормы освещенности даже с довольно значительной экономией энергии, то, на наш взгляд, было бы совершенно непростительно не использовать этой возможности.

В связи с этим стоит и пересмотр вопроса о соотношении местного и общего освещения. Как уже указывалось, минимальная освещенность на рабочих местах обеспечивается преимущественно с помощью источников местного освещения. Общая же освещенность чрезвычайно низка. Просматривая фотографии новых американских осветительных установок и читая их описания, мы почти совершенно не замечаем источников местного освещения: настольных, подвесных и тому подобных ламп. Напротив, в этих установках применяется большое число равномерно распределенных ламп, часто соединяемых в непрерывные «световые линии» и заливающих ровным и интенсивным светом все рабочее помещение. Не подлежит сомнению, что с точки зрения науки о видении такое решение, почти устраняющее резкие контрасты освещенности рассматриваемых предметов и блескость, являет-

ся очень рациональным. Но в этой области требуется исследовательская работа.

Наконец очень важное место в ряду проблем, выдвигаемых внедрением люминесцентных ламп, занимает разработка рациональных конструкций светильников и массовое их изготовление.

Насколько важна эта проблема, можно видеть хотя бы из данных, приведенных в табл. 5, которая показывает, что выбор того или иного типа светильников может в несколько раз изменить экономичность осветительной системы. Необходимо, конечно, кроме экономичности учитывать и соблюдение ряда других требований светотехники: ограничение контрастов освещенности и яркости, устранение блескости и т. д. Не подлежит сомнению, что столь широко распространенное пренебрежение указаниями светотехнической науки приводит к огромным перерасходам энергии и резкому ухудшению качества освещения. Реконструкцию осветительных систем, которую влечет за собой внедрение люминесцентных ламп, необходимо провести во всеоружии данных современной науки. Только современное, хорошо технически вооруженное и опирающееся на солидный научный фундамент предприятие может дать светильники, достаточно дешевые и достаточно рациональные.

Из сказанного прежде всего вытекает необходимость усилить работу в области светотехники и подготовки светотехнических кадров. Современное состояние этой отрасли неудовлетворительно. Имеющиеся лаборатории малочисленны и распылены. Кадры недостаточны. Задачи, которые до сих пор ставились перед светотехникой, слишком узки и ограничены. Внедрение разработанных конструкций светильников в про-

изводство осуществляется Министерством электропромышленности медленно. Такая новая и важная отрасль светотехники, как наука о видении, у нас почти не разрабатывается. Между тем, хотя бы тот элементарный факт, что на освещение мы тратим значительное количество производимой в стране электроэнергии, должен был бы побудить уделить больше внимания научной разработке способов использования этой энергии.

Работы по развитию светотехники в СССР должны выполняться в качестве неотъемлемой и важнейшей части общего плана развития промышленности света. На создании новых источников света, еще более совершенных, чем существующие сейчас типы люминесцентных ламп, необходимо сосредоточить дополнительные усилия и наших научно-исследовательских организаций и Министерства электропромышленности СССР.

#### Литература

1. С. И. Вавилов. Вестник Академии наук СССР, № 7-8, 1941.
2. С. И. Вавилов. Электричество, № 1-2, 1945.
3. Е. С. Ратнер и Д. А. Шкловер. Бюллетень ВЭИ, № 5, 1941.
4. П. И. Черноусов. Электричество, № 7, 1944.
5. В. А. Фабрикант. Успехи физических наук, т. 27, вып. 2, 1945.
6. В. А. Фабрикант, Ф. А. Бутаева, В. И. Долгополов. Электричество, № 1-2, 1945.
7. Л. А. Тумерман. Проблемы освещения. Вестник Академии наук СССР, № 1, 1945.
8. Р. А. Нилендер. Известия Академии наук СССР, сер. физич., т. IX, № 4-5, 1945.
9. C. L. A m i c k. Fluorescent Lighting Manual, Mc Grey-Hill, № 4, 1942.
10. A t k i n s o n. Fluorescent Lighting, London, 1946.
11. Illuminating Engineering, 1939.
12. Journal of the Optical Society of America, 1939.



# Люминесцентные лампы в текстильной промышленности

Инж. Н. Н. ЕРМОЛИНСКИЙ и инж. Е. Б. ШЕФТЕЛЬ

Всесоюзный электротехнический институт

Освещение предприятий текстильной промышленности люминесцентными лампами является одной из первоочередных и наиболее благодарных задач современной светотехники как по большим техническим и экономическим результатам, которые могут быть получены при относительно малых капитальных затратах, так и по значительному удельному весу этой отрасли промышленности в общем балансе нашего народного хозяйства. Люминесцентные лампы значительно более экономичны, чем лампы накаливания (сокращение расхода электроэнергии при замене ими ламп накаливания, как правило, составляет 50—65%), и дают возможность получения света любой цветности. В частности, что особенно ценно для текстильной промышленности, они позволяют получать свет, близкий по своему спектральному составу к естественному дневному<sup>1</sup> [Л. 1, 2].

С целью уточнения наилучших осветительных условий, оптимальной величины освещенности, необходимого расположения светильников при различных производственных операциях, а также проверки пригодности люминесцентных ламп отечественного производства по спектральному составу и поведению их в эксплуатации и т. д. в 1945 г. нами был проведен ряд исследований и экспериментов непосредственно на текстильных фабриках. Были оборудованы две опытные установки — на фабрике им. Калинина и на шелкоткацком комбинате «Красная Роза» в Москве.

**Опытные работы на фабрике им. Калинина.** Работа в сортировочном цехе фабрики им. Калинина заключается в том, что полученное со склада сырье (шерсть) распределяется по определенным сортам в зависимости от тонины, извитости, дефектности (желтизны) и т. д. Шерсть сортируется на 20 и более сортов в зависимости от ее последующего назначения. Работница раз-

*Дано описание опытов применения люминесцентных ламп дневного света для освещения сортировки шерсти на фабрике им. Калинина и браковочных столов шелкоткацкого комбината «Красная Роза». Полученные результаты показали, что освещение люминесцентными лампами дает возможность перехода ряда цехов текстильных фабрик с односменной работы на трехсменную, чем достигается значительное сокращение производственных площадей и большая экономия электроэнергии.*

бирает шерсть на специальном столе, распределяя определенные сорта по отдельным корзинам, расположенным вокруг работницы на полу. Опыт показывает, что правильное освещение рабочего места по сортировке шер-

сти имеет исключительно важное значение. Работа связана не только с определением тонины и извитости шерсти, что требует большого зрительного напряжения, но также и со способностью различать незначительные изменения в оттенках цвета отдельных волокон. Поэтому освещение сортировки должно не только создавать высокие освещенности, но и иметь определенный спектральный состав.

Цех сортировки работает в одну смену, в зимнее время даже одну неполную смену, так как при освещении лампами накаливания сортировать шерсть по всем показателям оказывается невозможным. Тонину и извитость шерсти еще можно определить, но дефектность по цвету установить совершенно невозможно, так как спектр ламп накаливания не позволяет правильно оценить оттенки желтого цвета.

В упомянутых выше работах было установлено, что для освещения рабочих мест сортировки шерсти необходимо применение люминесцентных ламп дневного света (максимально приближающихся к стандартному колориметрическому источнику С с цветовой температурой 6500° К) и создание освещенности порядка 500 lx. Соответственно этому, в качестве источников применялись люминесцентные лампы дневного света (разработаны под руководством В. А. Фабриканта), изготовленные в лаборатории источников света с арматурой типа ВЭИ-ОД-2 [Л. 3], сконструированной в лаборатории осветительных приборов светотехнического сектора ВЭИ.

Рабочий стол для сортировки шерсти был оборудован двумя такими светильниками, каждый с двумя люминесцентными лампами мощностью по 40 W. Для подсветки корзин с трех сторон стола над ними было смонтировано по од-

<sup>1</sup> Подробно см. статью Л. А. Тумермэна в этом номере журнала.



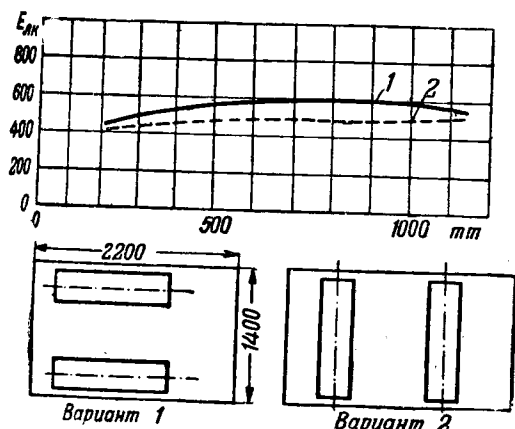


Рис. 1

ному светильнику типа ВЭИ-ОД-2 с одной люминесцентной лампой мощностью 40 W.

В ходе опытов испробовали два типа расположения светильников — поперечное [Л. 4] (применяемое на некоторых текстильных фабриках в США) и продольное. Распределение освещенностей, замеренное на столе при указанных расположениях светильников, показано на рис. 1. Линия промера освещенностей проходила по месту работы на расстоянии 0,25 м от края стола. Следует, однако, иметь в виду, что результаты измерения освещенности являются несколько заниженными, так как коэффициент отражения рефлектирующей поверхности арматуры (изготовленной кустарным способом на фабрике) не превышал 60%. При рационально изготовленной арматуре нетрудно получить коэффициенты отражения до 75%, а следовательно, при тех же мощностях и том же характере распределения освещенности она будет соответственно выше.

Расход мощности составлял 200 W (включая мощность, потребляемую дросселем) на два рабочих места при величине средней освещенности в 600 lx, что является сравнительно небольшим. Следует при этом отметить, что сортировочный стол был освещен равномерно, без теней, стробоскопический эффект сказывался незначительно.

В продолжение ряда ночей производилась при освещении люминесцентными лампами сортировка шерсти специально выделенными опытными работницами, с последующей пересортировкой этой же шерсти при естественном дневном свете. Опыты показали следующее: среднее число прокидов в ночные смены оказалось равным 5%, в дневные 3,2%. Учитывая, что число прокидов при дневном естественном освещении иногда достигает 10%, полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными.

На основании данных хронометража, распределения освещенности и заявлений работавших подопытных можно сделать следующее заключение.

Работы по сортировке шерсти вполне могут производиться при освещении люминесцентными лампами дневного света, выполненными согласно описанному способу. На основании субъективных заключений подопытных (хронометраж пока-

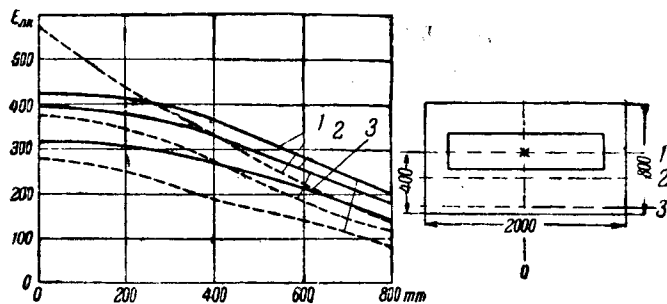


Рис. 2

зал одинаковые результаты) можно сказать, что удобнее и приятнее освещение рабочего места при расположении светильников вдоль стола. На некоторых текстильных фабриках США светильники расположены поперек стола, но несколько смещены относительно осевой линии, и за столом имеется только одно рабочее место. Этим, видимо, и объясняется применение там поперечного расположения светильников.

**Опытные работы на фабрике «Красная Роза».** Второй опытной работой было освещение люминесцентными лампами браковочных столов на шелкоткацком комбинате «Красная Роза».

На столах по разбраковке шелковых тканей производится браковка готовой материи в кусках. Глазомерная оценка ткани дается по качеству и соответствию ее стандарту по цвету и отделке. Работы производятся и в вечернюю смену, для чего над браковочным столом смонтирован светильник «глубокоизлучатель эмалированный» с лампой накаливания мощностью 200 W. Осветительная установка не является, однако, удовлетворительной ни с точки зрения распределения освещенности, ни по спектральному составу света. Для рационализации освещения над рабочим столом был смонтирован диффузный светильник типа ВЭИ-ОД-2 с двумя люминесцентными лампами дневного света ( $T = 6500^\circ \text{K}$ ) мощностью по 40 W каждая.

Замеренное распределение освещенности на рабочей поверхности при люминесцентных лампах и лампах накаливания показано на рис. 2. Из рисунка видно, что при люминесцентных лампах величины освещенностей составляют: максимальная (кривая 1, сплошная) 425 lx, минимальная (кривая 3) 140 lx, средняя 200 lx; неравномерность равна 0,33. Для ламп накаливания соответствующие значения освещенностей: максимальная (кривая 1, пунктир) 570 lx, минимальная (кривая 3, пунктир) — 85, средняя 260 lx; неравномерность равна 0,15, что намного ниже допустимого предела.

Качество изготовления арматуры то же, что и на фабрике им. Калинина: коэффициенты отражения светильников также были занижены. Несмотря на это, экономия электроэнергии при применении люминесцентных ламп составила 50% на одно рабочее место (установленная мощность около 100 W, включая мощность, потребляемую дросселем, вместо 200 W) по сравнению с лампами накаливания.

Для сравнения результатов работы при различных системах освещения была произведена разбраковка одних и тех же кусков шелковых тканей при естественном дневном освещении, при освещении люминесцентными лампами и лампами накаливания. При указанных опытах примерно в 80 случаях из 100 имело место или полное совпадение, или весьма близкое соответствие в определении сортности ткани при освещении люминесцентными лампами и при естественном дневном освещении. Например, при дневном свете было определено два сорта ткани, при люминесцентных лампах — третий сорт, а при лампах накаливания — четвертый сорт или брак.

Затем для проверки полученных результатов и испытания надежности ламп в эксплуатации в течение трех месяцев производились работы по разбраковке ткани на двух столах в вечернюю смену. Испытания убедительно показали, что работа по разбраковке шелковых тканей при искусственном освещении люминесцентными лампами отечественного производства может производиться вполне успешно.

Кроме столов для разбраковки шелковых тканей был оборудован освещением люминесцентными лампами стол для чистки суровых тканей. Рабочий процесс заключается в том, что на медленно движущейся ткани, расположенной наклонно, разыскиваются различные изъяны материи. Для успешного выполнения работы достаточно обеспечить высокую и равномерную освещенность, спектральный состав света при этой операции играет второстепенную роль. Ранее на этой операции была установлена лампа накаливания мощностью 60 W в светильнике «альфа кандем», которая создавала яркое пятно на верхней части ткани, оставляя в тени остальную часть материи.

Нами был запроектирован специальный диффузный светильник с большим защитным углом для люминесцентной лампы мощностью 20 W. Установка такого светильника позволила получить равномерную освещенность, совершенно достаточную для обследования всей поверхности рассматриваемой ткани (а не отдельного участка, ограниченного световым пятном), и снизила расход электроэнергии на этой операции на 55%.

**Выводы.** На основании описанных выше работ по освещению люминесцентными лампами ряда производственных участков в текстильной промышленности можно сделать следующие выводы:

1. Работа по сортировке шерсти при освещении люминесцентными лампами дневного света вполне возможна.

2. Производство работ по разбраковке шелковых и чистке суровых тканей при освещении люминесцентными лампами также может производиться вполне успешно. Работниками фабрика «Красная Роза» после трехмесячной работы было установлено: «При освещении люминесцентными лампами освещенность рабочего места значительно выше и равномернее, чем при лампах накаливания, утомляемость глаз у браковщиков меньшая, что оказывает положительное влияние на качество разбраковки и улучшает условия труда».

Массовое применение люминесцентных ламп на наших текстильных фабриках не только повысит качество продукции и снизит расход электрической энергии на единицу изделия, но даст большую экономию производственной площади в результате перехода с односменной на двух- и трехсменную работу. Например, по данным Текстильпроекта переход с односменной работы на трехсменную на одной шерстяной фабрике даст возможность сократить площадь только одного сортировочного цеха с 3 500 до 1 170 м<sup>2</sup>.

Когда выпуск люминесцентных ламп в Советском Союзе достигнет известного уровня, необходимо будет в первую очередь оборудовать те цехи текстильной промышленности, где требуются определенный спектральный состав света и высокие освещенности: ткацкие цехи, сортировочные, браковочные и т. д. Полученная при этом экономия электроэнергии и производственных площадей, несомненно, оправдает необходимые капитальные затраты.

#### Литература

1. Отчет ВЭИ за 1940 г. о работе по выявлению возможности сортировки шерсти при искусственном дневном свете.
2. Отчет ВЭИ за 1941 г. Применение флюоресцентных ламп дневного света для освещения работ по сортировке шерсти.
3. Н. Н. Ермолинский и Е. Б. Шефтель. Светильники с люминесцентными лампами. Электричество, № 8, 1945.
4. G. Cousins and C. Brooks. Lighting for Wool Sorting. Illuminating Engineering, № 8, 1943.
5. Caverly. Improved Illumination for Textile Operations with Fluorescent Lamps. Illuminating Engineering, № 4, 1941.



# Современное конденсаторостроение

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

Ленинградский политехнический институт и.м. Калдина

Производство электрических конденсаторов выделилось в самостоятельную отрасль электропромышленности и достигло весьма значительных масштабов развития, особенно в США.

По данным, опубликованным в Electronics [Л. 2], производством электрических конденсаторов в 1941 г. занимались 72 американские фирмы. Ряд фирм, специализировавшихся на выпуске конденсаторов (например, Corneille-Dubillier и др.) работает в этой области уже несколько десятков лет, накопив за это время большой производственный опыт.

По данным 1941 г. [Л. 1] американские конденсаторостроительные фирмы выпускали более 1 000 000 конденсаторов в сутки. Упомянутая фирма Corneille-Dubillier в сообщении 1944 г. указала, что в периоды наибольшей загрузки ее заводы выпускали до 500 000 конденсаторов в сутки. Общее количество конденсаторов, выпущенных этой фирмой за весь период ее существования, уже превысило миллиард штук. Только для удовлетворения потребности в конденсаторах производства гражданской радиоприемной аппаратуры в США в 1941 г. было изготовлено свыше 275 млн. конденсаторов. Значительное количество конденсаторов было изготовлено для военной аппаратуры связи и для радиолокационных устройств, а также для применения в технике сильных токов и многих других целей.

По последним данным для целей улучшения коэффициента мощности промышленных установок в США было изготовлено статических конденсаторов на общую суммарную реактивную мощность до 5 млн. kVAg.

Конденсаторостроительные фирмы имеют хорошо оборудованные лаборатории, в которых непрерывно ведутся научно-исследовательские работы по усовершенствованию выпускаемых конденсаторов и по разработке новых типов. Результаты этих работ публикуются довольно скупно. Все же ознакомление с технической и фирменной литературой последних лет позволяет определить основные сдвиги в конденсаторостроении за годы войны.

В области конденсаторов с газообразным диэлектриком основное внимание уделялось

*За последние годы значительно расширилось применение электрических конденсаторов в радиопромышленности, радиолокационных устройствах, в электрохозяйстве и других областях. В статье дан обзор современного состояния и новейших технических сдвигов в развитии конденсаторостроения зарубежных стран, преимущественно США.*

усовершенствованию конструкции и расширению выпуска коротковолновых воздушных конденсаторов постоянной и переменной емкости. Вместе с тем применение этих конденсаторов в

самолетной радиоаппаратуре при больших высотах показало, что они недостаточно удовлетворительно ведут себя в условиях эксплуатации. Основным недостатком воздушных конденсаторов, применяемых в аппаратуре этого типа, является резкая зависимость их пробивного напряжения от высоты (рис. 1), обусловленная снижением давления воздуха при больших высотах. Кроме того, при больших скоростях снижения самолета вследствие резкого перехода от условий низкой температуры при больших высотах к условиям нормальной температуры на пластинках воздушного конденсатора неизбежно происходит конденсация влаги, что сопровождается резким ухудшением электрических характеристик и влечет за собой появление коррозии металлических частей. К этому можно прибавить, что низкие значения электрической прочности воздуха, особенно при больших высотах, заставляют при повышенных значениях рабочего напряжения (которое в современных колебательных контурах может превышать 10—15 kV) выбирать большие зазоры между пластинами. Это делает воздушный конденсатор относительно громоздким, даже при небольших значениях номинальной емкости.

Перечисленные здесь недостатки заставили в ряде случаев пойти на замену воздушных конденсаторов вакуумными, производство которых за время войны в США быстро расширилось. До войны такие конденсаторы изготовлялись только одной фирмой. По данным за 1944 г. выпуск вакуумных конденсаторов освоили уже четыре фирмы [Л. 3]. Высокая электрическая

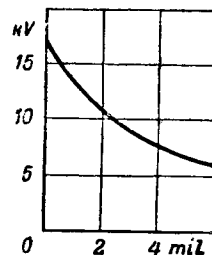


Рис. 1. Пробивное напряжение воздушного конденсатора в зависимости от высоты над уровнем моря [Л. 3].

прочность вакуума позволяет выбирать в конденсаторах величину зазора порядка 1 мм при напряжении порядка нескольких десятков киловольт. Это дает резкое снижение удельного объема этих конденсаторов по сравнению с воздушными. При максимальном значении рабочего напряжения, равном 32 кВ, удельный объем вакуумного конденсатора составляет  $8 \text{ см}^3/\mu\text{F}$ , при напряжении 7,5 кВ —  $2 \text{ см}^3/\mu\text{F}$ . Пробивное напряжение и емкость вакуумных конденсаторов не зависят от высоты. Электроды этих конденсаторов полностью изолированы от воздействия окружающей среды.

До войны вакуумные конденсаторы изготавливались с номинальной емкостью до  $50 \mu\text{F}$ . Теперь верхний предел номинальной емкости их расширен до  $250 \mu\text{F}$ . Конструкция вакуумных конденсаторов за время войны подверглась изменению с целью повышения ее механической прочности и стойкости против вибраций (рис. 2). Вместо металлических стержней, впаянных в стекло, на которых укреплялись концентрические цилиндры, служащие электродами, теперь применяются металлические диски с закругленными краями, которые спаиваются в толстостенный стеклянный цилиндр. К этим дискам привариваются стальные кружки, на которых монтируются электроды [Л. 4]. Современные вакуумные конденсаторы имеют отклонение емкости от номинального значения не выше  $\pm 0,2 \div 0,3 \mu\text{F}$  при малых емкостях и не свыше  $\pm 0,5 \mu\text{F}$  при больших (свыше  $60 \mu\text{F}$ ). Температурный коэффициент емкости весьма мал и не превышает значения  $3 \cdot 10^{-5}$  на  $1^\circ\text{C}$  в интервале температур от  $-50$  до  $+100^\circ\text{C}$ . Малый угол потерь позволяет применить вакуумные конденсаторы при частотах до 20—50 МГц.

В американской практике находят все более широкое применение также конденсаторы со сжатым газом, которые изготавливаются как постоянной, так и переменной емкости. До войны производство этих конденсаторов было налажено двумя фирмами [Л. 5]. В настоящее время выпуском таких конденсаторов начали заниматься еще три фирмы.

Эти конденсаторы изготавливаются на более высокие значения номинальных емкостей, чем вакуумные конденсаторы. Газонаполненные кон-

денсаторы постоянной емкости выпускаются с емкостью до  $20\,000 \mu\text{F}$ , а переменной — на максимальное значение  $11\,000 \mu\text{F}$ . Начальная емкость переменных газонаполненных конденсаторов относительно велика и обычно составляет около 40% от максимального значения.

Рабочее напряжение газонаполненных конденсаторов, выпускаемых американскими фирмами, составляет от нескольких киловольт до 30—40 кВ. Рабочее значение тока может достигать до  $100 \div 200 \text{ A}$ .

Конденсаторы наполняются азотом при давлении порядка 20 ат. Для компенсации небольшой утечки газа требуется периодическая подпитка конденсаторов азотом. Для контроля давления газа на каждом конденсаторе устанавливается манометр (рис. 3). Газонаполненные конденсаторы значительно больше по весу и объему, чем вакуумные конденсаторы, особенно при малых значениях номинальной емкости. Например, при рабочем напряжении 15 кВ и емкости  $1\,500 \mu\text{F}$  удельный объем составляет  $40 \text{ см}^3/\mu\text{F}$ , а при емкости  $250 \mu\text{F}$   $160 \text{ см}^3/\mu\text{F}$ . Объем конденсатора, отнесенный к единице реактивной мощности, составляет при частоте 0,5 МГц около  $15 \text{ см}^3/\text{kVA}$  (Heintz and Kauffman). При повышении частоты это значение резко возрастает (рис. 4), так как во избежание перегрева конденсатора приходится резко снижать значение рабочего напряжения. При частоте порядка 1 МГц и выше объем конденсатора, отнесенный к единице реактивной мощности, в случае вакуумного конденсатора оказывается резко пониженным по сравнению с удельным объемом газонаполненного конденсатора.

Другим вариантом решения проблемы создания высокочастотного конденсатора с малым удельным объемом явилась разработка серных конденсаторов. Они представляют собой цилиндрические воздушные конденсаторы, в которых зазор залит серой. Это дает возможность повы-

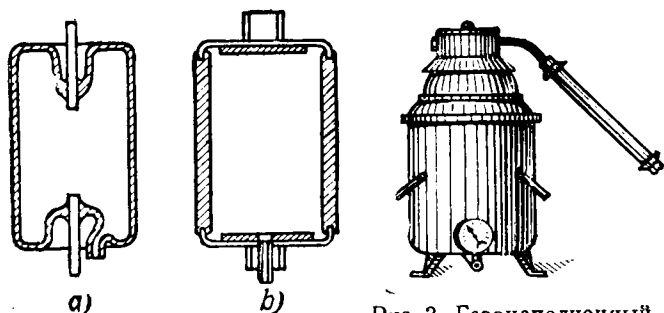


Рис. 2. Улучшение конструкции вакуумных конденсаторов.

а — старый тип — 1939 г. (фирма Ethel Mc Cullough); б — новый тип — 1944 г. (фирма GEC).

Рис. 3. Газонаполненный конденсатор переменной емкости фирмы Larr Insulator Co.

$C = 430 \div 11\,000 \mu\text{F}$ ;  $I = 200 \text{ A}$ ;  $U = 6,5 \text{ kV}$ .

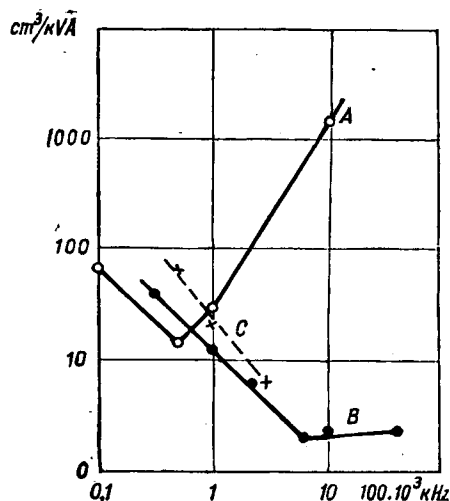


Рис. 4. Зависимость удельного объема конденсаторов от частоты.

А — газонаполненные конденсаторы фирмы Heintz и Kauffman; Б — вакуумные конденсаторы фирмы GEC; С — серные конденсаторы фирмы Aerovox Corporation.

сильнее рабочее значение напряженности поля в зазоре при одновременном увеличении емкости. Сера имеет диэлектрическую проницаемость около 4; удельное объемное сопротивление ее, при хорошей очистке, выше  $10^{17}$  Ом см, а угол потерь при высокой частоте достаточно мал. Поэтому идея использования серы в качестве диэлектрика в высокочастотных конденсаторах дала удачные результаты. В сообщении 1942 г. фирма Аеговох указывает, что ею начат выпуск серных конденсаторов с рабочим напряжением 5 и 10 кВ и с номинальной емкостью от 10 до 50 мкФ. Максимальное значение рабочей температуры для этих конденсаторов составляет  $+60^\circ\text{C}$ . Зависимость удельного объема таких конденсаторов от частоты по данным фирмы показана пунктиром на рис. 4 (кривая С). В пределах от 0,3 до 3 МГц по значению удельного объема серные конденсаторы лишь немного уступают вакуумным (кривая В). По данным 1944 г. применение серы в качестве диэлектрика в конденсаторах было начато также фирмой GEC [Л. 6].

Эта фирма в 1944 г. разработала новый тип конденсатора с жидким диэлектриком, имеющий обкладку в виде параллельных пластин и рассчитанный на работу в диапазоне частот от 150 кГц до 1,5 МГц. Конденсаторы, залитые трансформаторным маслом, применялись ранее в контурах мощных радиопередатчиков [Л. 7], но затем были вытеснены слюдяными конденсаторами. В новой конструкции конденсатора GEC достигнуто резкое уменьшение удельного объема за счет применения водяного охлаждения. Это позволило использовать такие конденсаторы для замены контурных слюдяных конденсаторов, причем по данным фирмы в одной высокочастотной установке 25 слюдяных конденсаторов удалось заменить 3 конденсаторами с жидким диэлектриком и водяным охлаждением.

В США во время войны возникли трудности в связи с увеличением спроса на слюдяные конденсаторы для военной аппаратуры, при одновременно усложнившихся условиях транспортировки слюды из Индии; до войны большинство фирм применяло для изготовления конденсаторов только рубиновый мусковит индийских месторождений. Для разрешения этих трудностей, во-первых, были приложены усилия к тому, чтобы добиться лучшего использования импортной слюды; во-вторых, были предприняты изыскания в целях использования слюды местных и близко расположенных месторождений. Была проведена большая работа по улучшению методики сортировки и калибровки слюды для оценки пригодности слюдяных пластинок. Кроме обычного визуального осмотра были внедрены специально разработанные электрические методы контроля, позволяющие быстро разбраковать слюду по величине угла потерь и по наличию проводящих включений [Л. 8]. Основной особенностью установок, использованных для контроля электрических свойств слюды, является большая скорость испытаний. Время, необходимое

на испытание одного образца, доведено в них до 3—4 сек. Применение новых методов контроля позволило повысить выход годной слюды на 50—60%. Кроме того, был разрешен вопрос о применении слюды из ряда месторождений США, Канады и Южной Америки.

Еще до войны дефицитность и высокая стоимость слюды обусловили применение в конденсаторостроении ряда новых диэлектриков, в большей или меньшей степени пригодных для замены слюды в отдельных типах конденсаторов. Среди этих диэлектриков основное место занимает *высокочастотная конденсаторная радио-керамика*. Производство керамических конденсаторов еще в довоенный период было широко развернуто в Германии, где слюда была более дефицитной, чем в Англии или в США. Германские керамические фирмы выпускали не только небольшие керамические конденсаторы и керамические триммеры, но также и относительно крупные конденсаторы для контуров радиопередатчиков и анодно-разделительных цепей. Согласно довоенным данным, контурные конденсаторы в виде дисков изготовлялись для значения реактивной мощности до 40 кВАг при испытательном напряжении до 20 кВ. Такие диски можно было соединять в последовательно-параллельные группы для получения больших значений реактивной мощности и повышенного рабочего напряжения. Для применения в анодных цепях изготовлялись конденсаторы подвесного типа с рабочим напряжением 5 и 12 кВ постоянного тока с номинальной емкостью до 3000 мкФ. В германской радиоаппаратуре керамические конденсаторы завоевали себе прочное место в диапазоне малых значений номинальной емкости от 1000 мкФ и ниже. Особенно широкое применение эти конденсаторы нашли в военной аппаратуре связи.

В США и в Англии керамические конденсаторы начали также изготовляться еще до войны, но масштабы производства этих конденсаторов и ассортимент выпускаемых типов в этих странах были меньше, чем в Германии.

За последние годы наряду с конденсаторами постоянной емкости для радиоприемной аппаратуры был освоен выпуск керамических триммеров, а также керамических конденсаторов для радиопередающей аппаратуры. Например, фирма Erie сообщила в 1945 г. о выпуске керамических конденсаторов с реактивной мощностью до 5—10 кВАг для рабочего напряжения до 10 кВ (рис. 5). Английская фирма United Insulator Co освоила в 1943 г. выпуск подвесных керамических конденсаторов горшочкового типа на рабочее напряжение до 5 кВ эффективных или до 7,5 кВ постоянного тока с номинальной емкостью до 1250 мкФ. Для изготовления керамических кон-

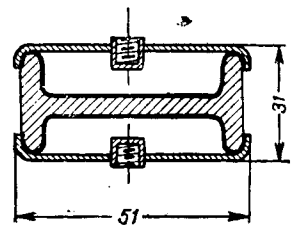


Рис. 5. Керамический конденсатор типа SP — 172.

C=300 мкФ; U=10 кВ (фирма Erie Resistor Corporation).

денсаторов американские и английские фирмы подобно германским применяют обычно титано-содержащие массы двух основных типов: массу с большим содержанием  $TiO_2$ , обладающую высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 80 - 90$ ) и относительно большим отрицательным температурным коэффициентом, и массу с пониженным содержанием  $TiO_2$ , отличающуюся весьма малым температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости при относительно небольших значениях последней, что ими могут быть изготовлены керамические конденсаторы с любым значением температурного коэффициента емкости, в пределах от  $-6,5 \cdot 10^{-4}$  до  $+1,2 \cdot 10^{-4}$  на  $1^\circ C$ .

В 1943 г. сообщалось о выпуске нового типа керамических конденсаторов под маркой Nik Керамикон, отличающегося резко увеличенной емкостью по сравнению с другими типами керамических конденсаторов. Конденсаторы в виде трубочек диаметром 7 мм и длиной 46 мм имели номинальную емкость до 15 000  $\mu F$  при испытательном напряжении 1 000 V постоянного тока. Отклонение емкости от номинала для конденсаторов этого типа было установлено равным  $\pm 10\%$ , рабочее напряжение — 500 V постоянного тока при температуре до  $+60^\circ C$ . По сравнению с обычными керамическими конденсаторами угол потерь конденсаторов нового типа был резко повышен ( $\cos \varphi$  до 2,5% при  $+25^\circ C$ ).

Для трубчатых керамических конденсаторов Hesch, изготовленных из обычной керамики с высоким содержанием  $TiO_2$ , удельная емкость составляла до 400  $\mu F/cm^3$ . Для конденсаторов Nik значение удельной емкости было увеличено до 8 000  $\mu F/cm^3$ . Столь резкое увеличение удельной емкости, по сообщению фирмы, было достигнуто применением специальной керамической массы с исключительно высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 1 050$  при  $+25^\circ C$ ). Рецепт этой массы не была опубликована, но можно полагать, основываясь на последних работах наших исследователей, что данная масса была изготовлена на основе титаната бария.

Резко увеличенный угол потерь конденсаторов, изготовленных из такой массы, ограничивает возможность ее широкого применения в конденсаторостроении, но в ряде отдельных случаев малогабаритные конденсаторы этого типа могут быть использованы с успехом.

Наряду с высокочастотной керамикой германское конденсаторостроение в небольшом масштабе применяло для изготовления конденсаторов *специальное стекло*, известное под названием Минос. Это стекло имеет следующие характеристики:  $\epsilon = 8$ ;  $\text{tg } \delta = 0,001$ ;  $E_{np} = 250 \text{ kV/mm}$  при толщине 0,25 мм. Из такого стекла изготавливались конденсаторы цилиндрического типа (рис. 6) для рабочего напряжения 25 kV (амплитуда переменного тока или постоянный ток) с реактивной мощностью до 100 kVAr и конденсаторы плоского типа на рабочее напряжение до 6 kV емкостью до 36 000  $\mu F$ .

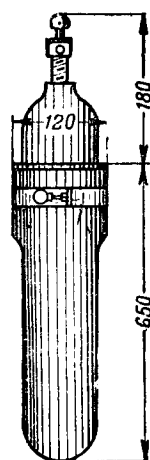


Рис. 6. Стекланный конденсатор:  $C = 3 600 \mu F$ ;  $U = 25 \text{ kV}$  (фирма Glaswerk Schott).

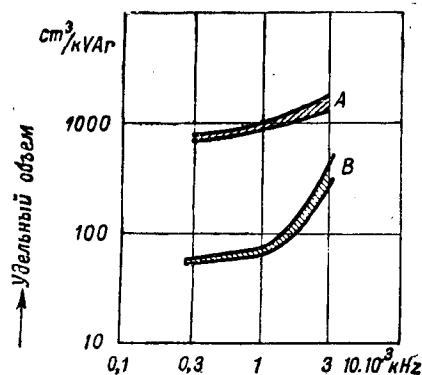


Рис. 7. Зависимость удельного объема конденсаторов от частоты.

A — стекланные конденсаторы фирмы Schott; B — слюдяные конденсаторы фирмы RCA

Такие конденсаторы применялись соединенными в последовательно-параллельные группы. Допускаемое отклонение емкости от номинального значения составляло для цилиндрических конденсаторов  $\pm 20\%$ , для плоских  $\pm 5\%$ . Для повышения ионизирующего напряжения у краев обкладок конденсаторы выпускались с заливкой минеральным маслом. Верхний предел рабочей температуры был установлен равным  $+50^\circ C$ . Объем стекланных конденсаторов на единицу реактивной мощности резко повышен, по сравнению с удельным объемом слюдяных высокочастотных конденсаторов (рис. 7). Это послужило одной из причин, ограничивших применение стекланных конденсаторов в современной высокочастотной технике.

Современное конденсаторостроение для замены слюды наряду с неорганическими диэлектриками типа керамики или стекла начинает применять *органические вещества* в виде тонких пленок, изготовленных из высокомолекулярных соединений. К числу таких веществ следует прежде всего отнести *полистирол*, применение которого в конденсаторах начато было в Германии и в США еще до войны. В этих странах был освоен выпуск полистирола в виде тонких лент большой длины, позволяющих вести изготовление конденсаторов путем намотки на станках лент полистирола и металлической фольги, подобно тому, как это делается в производстве бумажных конденсаторов. Минимальное значение толщины ленты полистирола, применяемой в конденсаторостроении, составляет 25  $\mu$ . При изготовлении конденсаторов низкого напряжения для высокочастотной аппаратуры между обкладками прокладываются две полистирольные ленты. Диэлектрическая проницаемость полистирола относительно невелика ( $\epsilon = 2,6$ ), но угол потерь весьма мал ( $\text{tg } \delta = 0,0001 - 0,0002$ ), поэтому весьма привлекательно применять этот материал в высокочастотных конденсаторах. Электрическая прочность полистирольной пленки составляет 20—30 kV/mm; прочность на разрыв 180—300 kg/cm<sup>2</sup>.

Удельное объемное сопротивление полистирола весьма велико ( $\rho_v = 10^{17} - 10^{19} \Omega \text{ cm}$ ). Это позволяет изготавливать конденсаторы с высоким значением постоянной времени.

Американские фирмы использовали полистирол для изготовления цилиндрических конденсаторов небольшой емкости (1 000 ÷ 10 000  $\mu\text{F}$ ). Германские фирмы выпускали из полистирола также и плоско-прессованные конденсаторы, собиравшиеся в металлических прямоугольных корпусах, подобно обычным бумажным конденсаторам с твердой пропиткой. Такие конденсаторы с рабочим напряжением 250 V постоянного тока изготавливались до войны емкостью до 0,5  $\mu\text{F}$ . Во время войны германские фирмы начали выпуск полистирольных конденсаторов большой емкости — до 10 ÷ 20  $\mu\text{F}$ . Конденсатор типа Стироконд на рабочее напряжение 100 V постоянного тока емкостью 20  $\mu\text{F}$  имеет габарит  $205 \times 165 \times 70 \text{ mm}$ , что соответствует удельному объему 118,5  $\text{cm}^3/\mu\text{F}$ . Допускаемое отклонение емкости от номинала для такого конденсатора составляет  $\pm 1\%$ , пределы рабочей температуры от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Для сравнения можно указать, что слюдяной конденсатор американской фирмы RCA типа 509 номинальной емкостью 1  $\mu\text{F}$  имеет габариты  $110 \times 85 \times 60 \text{ mm}$  (удельный объем 560  $\text{cm}^3/\mu\text{F}$ ). Допускаемое отклонение емкости от номинала для такого конденсатора составляет  $\pm 0,25\%$ .

Полистирольные конденсаторы уступают слюдяным в отношении точности подгонки, а также в отношении величины температурного коэффициента емкости, который у них в 5 — 10 раз превышает минимальное значение температурного коэффициента слюдяных конденсаторов (у серебряных слюдяных конденсаторов  $\alpha = +25 \div 30 \cdot 10^{-6}$  на  $1^\circ\text{C}$ ). Вместе с тем в отношении величины удельного объема при больших значениях емкости они значительно выгоднее слюдяных конденсаторов.

Полистирольные конденсаторы обычно изготавливались с пропиткой парафином для заполнения зазоров между слоями полистирола и фольги и для скрепления намотанной конденсаторной секции с целью предупредить ее размотку. Это ограничивало верхний предел рабочей температуры конденсатора (точка плавления парафина  $50 - 55^\circ\text{C}$ , температура размягчения полистирола  $90 - 120^\circ\text{C}$ ). По последним данным, пропитка парафином стала заменяться горячим прессованием секций полистирольных конденсаторов, нагретых до температуры выше точки размягчения полистирола. Этим путем достигалось уничтожение зазоров и скрепление секций без применения посторонних цементирующих веществ.

Кроме того, есть указание, что в Германии во время войны стали заменять металлическую фольгу слоем металла, наносимого непосредственно на полистирольную пленку вакуумным испарением.

В 1943 г. появились данные фирмы GEC о новом типе конденсаторов, с диэлектриком из

искусственной пленки лектрофильм [Л. 9]. Характеристики этой пленки приведены в табл. 1.

Имеются некоторые основания предполагать, что пленка лектрофильм близка по составу к поливинил хлориду, выпускаемому фирмой Goodrich Co под маркой коросил. По данным 1939 г. [Л. 10] коросил № 763 имел следующие характеристики:  $\epsilon = 4 \div 8$ ;  $\cos \varphi = 4\%$  при температуре  $+80^\circ\text{C}$  и частоте 1 000 Hz;  $\rho_v = 10^{15} \Omega \text{ cm}$  при  $20^\circ\text{C}$ . Так же как и в случае лектрофильма, угол потерь коросила снижается при нагревании. Коросил может прокатываться в тонкую пленку и имеет прочность на разрыв порядка 550 — 650  $\text{kg/cm}^2$ , что приближается к значениям прочности конденсаторной бумаги.

Фирма GEC изготавливает конденсаторы из лектрофильма для замены слюдяных конденсаторов в тех случаях, когда не требуются особо малые значения угла потерь (преимущественно в случаях блокировки или шунтирования). Секции, намотанные из лектрофильма и металлической фольги, обычно собираются в стандартных корпусах из пластмассы, имеющих те же размеры, что и корпуса аналогичных слюдяных конденсаторов, что облегчает замену их лектрофильмовыми конденсаторами. По последним данным [Л. 6] конденсаторы нового типа применяются в широком диапазоне частот — от 12,5 kHz до 1,5 MHz. Для коротковолнового диапазона (25 — 100 MHz) лектрофильм применяется в сочетании с серой.

В области производства бумажных конденсаторов американские фирмы провели большую работу по исследованию исходных сырых материалов, применяемых в этом производстве: конденсаторной бумаги и пропиточных масс. Эта работа была продиктована повышенными требованиями к надежности работы бумажных конденсаторов в широком диапазоне рабочих температур, предъявленными во время войны к конденсаторам для военной аппаратуры. Проведенные исследования окончательно подтвердили, что в случае длительной работы при вы-

Таблица 1

Характеристики пленки лектрофильм, полученные при испытании изготовленных из нее конденсаторов, по данным фирмы GEC (пленка № 2682)

Характеристика	Пленка в рулонах	Пленка в листах
Электрическая прочность для двух и более слоев, kV/mm (постоянный ток) . . . . .	76	100
Диэлектрическая проницаемость	Более 4,0	Более 5,5
Прочность на разрыв . . . . .	Как у конденсаторной бумаги из крафтцеллюлозы	Как у крафтцеллюлозы
Коэффициент мощности при $10^5 \text{ Hz}$ и $+25^\circ\text{C}$ , % . . . . .	Менее 3,5	Менее 2
То же, при $+100^\circ\text{C}$ . . . . .	Менее 1,75	Менее 1
Температурный коэффициент емкости на $1^\circ\text{C}$ , % . . . . .	0,05 ÷ 0,15	0,15
Максимальная рабочая температура, $^\circ\text{C}$ . . . . .	100	125

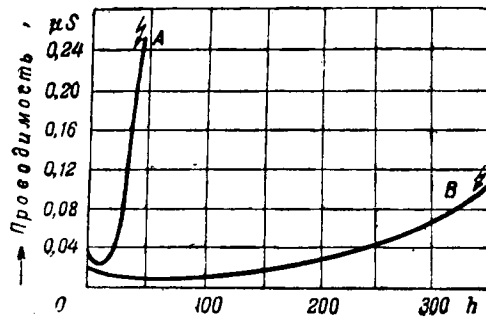


Рис. 8. Зависимость проводимости бумажных конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, от времени работы при напряжении 400 В постоянного тока и 10<sup>5</sup>°С. (ускоренное испытание).

А — тряпичная бумага (льняная); В — крафтцеллюлозная бумага — по данным Mc Lean и др. [Л. 11].

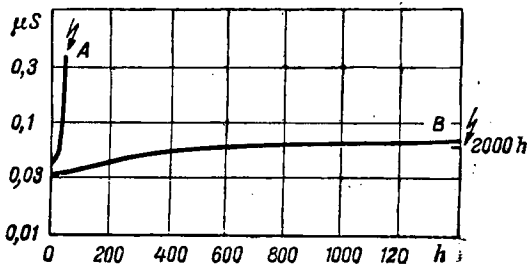


Рис. 9. Зависимость проводимости бумажных конденсаторов от времени работы при ускоренном испытании.

А — пропитка пентахлордифенилом; В — пропитка пентахлордифенилом + 0,5% антрахинона — по данным Mc Lean и Egerton [Л. 12].

сокой температуре конденсаторная бумага, изготовленная из *крафтцеллюлозы* (сульфатная древесная целлюлоза), имеет, несомненно, преимущества перед тряпичной бумагой, обеспечивая заметное увеличение срока службы конденсаторов, особенно при пропитке хлорированными массами (рис. 8). Работы лаборатории фирмы Bell [Л. 11] показали, что при повышенной температуре и постоянном напряжении бумажные конденсаторы с обкладками из алюминиевой фольги, пропитанные хлорированными массами (полихлорнафталин или пентахлордифенил), могут быстро выходить из строя вследствие резкого возрастания тока утечки с течением времени. Это явление обусловлено разложением пропиточной массы, вызванным каталитическим действием алюминиевых обкладок. Продукты разложения, в частности HCl, вызывали постепенное разрушение бумаги, приводящее к росту тока утечки. Для борьбы с этим явлением в состав хлорированных пропиточных масс вводились стабилизаторы. Хорошие результаты (рис. 9) были получены при добавлении 0,5% антрахинона [Л. 12]. Стабилизация хлорированных пропиточных масс в настоящее время производится американскими фирмами Western Electric, Westinghouse и др. В 1945 г. рекламировались бумажные конденсаторы Sprague, рассчитанные на работу в широком диапазоне температур, от  $-40$  до  $+105^{\circ}\text{C}$ , при рабочем напряжении от 1 до 16 kV постоянного тока. Можно полагать, что в этих конденсаторах применена про-

питочная масса со стабилизирующими добавками.

В германских бумажных конденсаторах, рассчитанных на рабочую температуру  $+100^{\circ}\text{C}$ , выпуск которых был начат еще до войны, в качестве пропиточной массы был использован вазелин. Для таких конденсаторов нижний предел температуры был установлен равным  $-40^{\circ}\text{C}$ . Американские фирмы в настоящее время изготовляют бумажные конденсаторы, рассчитанные на применение в гражданской аппаратуре, с диапазоном рабочих температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+65^{\circ}\text{C}$  и специальные конденсаторы, предназначенные для военной аппаратуры, с диапазоном рабочих температур от  $-40 \div 50$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Только в отдельных случаях встречаются конденсаторы с более высоким верхним пределом рабочей температуры (например, до  $+105^{\circ}\text{C}$ ). Для пропитки конденсаторов с рабочей температурой до  $+85^{\circ}\text{C}$  рекомендуется [Л. 13] применение тяжелого минерального масла, которое обеспечивает большее постоянство емкости во всем диапазоне рабочих температур, чем пентахлордифенил, хотя и дает заметное увеличение удельного объема конденсаторов по сравнению с конденсаторами, пропитанными хлорированными массами. Основным недостатком конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом (пиранол, инертин, диканол, арохлор), является резкое снижение емкости при охлаждении конденсаторов до температуры ниже  $0^{\circ}\text{C}$  вследствие значительного снижения диэлектрической проницаемости этой массы. Для пропитки бумажных конденсаторов, рассчитанных на работу в широком диапазоне температур, начали применять новую пропиточную массу — специальный инертин — смесь пентахлордифенила с полихлорэтилбензолом [Л. 14]. Сравнение характеристик этой массы с обычным инертином (пентахлордифенилом) дано в табл. 2.

Замена обычного инертина специальным дает резкое улучшение температурной стабильности

Таблица 2

Сравнение характеристик обычного и специального инертина

Характеристика	Обычный инертин	Специальный инертин
Плотность при $+25^{\circ}\text{C}$ . . . . .	1,542	1,525
Коэффициент рефракции при $+25^{\circ}\text{C}$ . . . . .	1,638	1,614
Температура застывания, $^{\circ}\text{C}$ . . . . .	+10	-28
Температура вспышки, $^{\circ}\text{C}$ . . . . .	нет	180
Вязкость по Сейболту, при $+40^{\circ}\text{C}$ . . . . .	2 800	125
То же, при $+100^{\circ}\text{C}$ . . . . .	46	35
Тангенс угла потерь при $+85^{\circ}\text{C}$ , % . . . . .	0,1	0,1
Диэлектрическая проницаемость при $+25^{\circ}\text{C}$ и 60 Гц . . . . .	5,0	4,5
То же при $+85^{\circ}\text{C}$ . . . . .	4,5	4,0
Снижение емкости конденсатора, пропитанного инертином, при $-40^{\circ}\text{C}$ , 60 Гц . . . . .	38%	5%
То же, при $-40^{\circ}\text{C}$ и частоте 1 МГц . . . . .	40%	30%



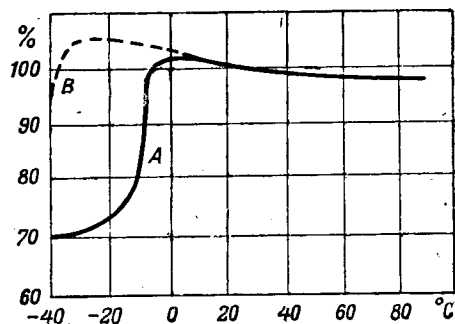


Рис. 10. Емкость бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными жидкими массами, в зависимости от температуры при 60 Hz (в процентах от значения емкости при 25°C).

A — обычный инертин (пентахлордифенил); B — специальный инертин (пентахлордифенил + полихлорэтилбензол) (данные Berberich и др. [Л. 14]).

емкости бумажного конденсатора в области низких температур (рис. 10) при низкой частоте. При высоких частотах различие в поведении конденсаторов, пропитанных разными сортами инертина, менее заметно. Диэлектрическая проницаемость специального инертина несколько снижена по сравнению с обычным (табл. 2), но это дает снижение емкости конденсатора при замене обычного инертна специальным не более чем на 5%.

В целях обеспечения устойчивости работы бумажных конденсаторов при высоких рабочих температурах и достаточно высоких значениях напряженности электрического поля американскими фирмам пришлось не только уделить большое внимание правильному выбору сорта бумаги и типа пропиточной массы и предъявить повышенные требования к чистоте этих материалов, но также повысить тщательность процессов сушки и пропитки. В результате этих мероприятий резко повысилось сопротивление изоляции конденсаторов, что широко рекламируется рядом фирм: например, указывается, что значение сопротивления изоляции при комнатной температуре повышено с  $4\,000\ \mu\Omega \cdot \mu F$  до  $20\,000\ M\Omega \cdot \mu F$ ; приводится значение сопротивления изоляции, равное  $24\,000\ M\Omega \cdot \mu F$  для бумажно-масляных конденсаторов с рабочим напряжением порядка  $600\text{—}1\,000\ V$  постоянного тока.

Современные бумажные конденсаторы с жидкой пропиткой, выпускаемые американскими фирмами, имеют резко уменьшенные габариты по сравнению со старыми типами таких конденсаторов, для которых применялась твердая пропитка.

По довоенным сведениям конденсаторы Solar с рабочим напряжением  $1\,000\ V$  постоянного тока имели удельный объем порядка  $130\ \text{см}^3/\mu F$ ; по данным 1945 г. конденсаторы Toby Deutchman с такими же номинальными данными имеют удельный объем около  $32\ \text{см}^3/\mu F$ , т. е. в четыре раза меньше, чем ранее.

Среди новых типов бумажных конденсаторов, выпускаемых американскими фирмами в последние годы, можно отметить конденсаторы с высоким рабочим напряжением постоянного тока, рассчитанные на применение в рентге-

новских установках и в импульсных генераторах. Выпускаются конденсаторы Industrial Condenser Corporation в прямоугольных металлических корпусах с фарфоровыми изоляторами для рабочих напряжений до  $250\ kV$ , с максимальной емкостью  $0,5\ \mu F$  (при рабочем напряжении  $50\ kV$ ), а также конденсаторы Aerovox в цилиндрических изоляционных корпусах с выводами в виде торцовых массивных металлических крышек для рабочих напряжений до  $150\ kV$ , с максимальной емкостью  $0,1\ \mu F$  (при рабочем напряжении  $50\ kV$ ). Для пропитки конденсаторов применяется минеральное масло.

Недавно в США была выпущена серия бумажно-масляных конденсаторов Toby Deutchman небольшой емкости, запрессованных в пластмассу. Рабочее напряжение этих конденсаторов при постоянном токе составляет от  $120$  до  $800\ V$ ; номинальная емкость от  $1\,000$  до  $20\,000\ \mu F$ . Конденсаторы рассчитаны на работу в диапазоне температур от  $-55$  до  $+105^\circ C$  и для частоты до  $40\ MHz$ . Коэффициент мощности при частоте  $1\ kHz$  лежит в пределах  $0,004\div 0,006$ . Сопротивление изоляции должно быть не ниже  $40\,000\ M\Omega$  при  $+25^\circ C$  и не ниже  $1\,000\ M\Omega$  при  $+85^\circ C$ . Конденсаторы имеют весьма малые размеры ( $21 \times 21 \times 7,5$  и  $17 \times 12 \times 6\ mm$ ). Выпущены также бумажные конденсаторы Du pont Electric цилиндрического типа для рабочих напряжений от  $150$  до  $600\ V$  с весьма малыми значениями номинальной емкости. Нижний предел диапазона емкостей этих конденсаторов составляет  $20\ \mu F$ , что является необычным для бумажных конденсаторов.

Резкое снижение габарита бумажных конденсаторов было достигнуто во время войны при производстве конденсаторов из *металлизированной бумаги*. Бумага с нанесенным на нее тонким слоем олова применялась в начальной стадии развития конденсаторостроения и в Англии, и в Швеции, и в Германии для замены оловянной фольги [Л. 15]. Металлизация бумаги проводилась нанесением на нее порошкообразного олова с последующей раскаткой металлического слоя на вальцах, причём изоляционные качества бумаги резко снижались. Применение такой бумаги требовало непременно прокладки слоев обычной конденсаторной бумаги для разделения слоев металлизированной бумаги. Появление на рынке дешевой алюминиевой фольги привело к почти полному отказу от использования металлизированной бумаги старого типа.

При производстве металлизированной бумаги нового типа использовали для нанесения металлического слоя принцип вакуумного испарения металла. Изготовленная новым методом бумага позволила применить намотку конденсаторов из двух лент металлизированной бумаги без промежуточной прокладки простой конденсаторной бумаги. Это дало возможность при рабочем напряжении порядка  $120\text{—}160\ V$  довести удельный объем конденсаторов до значения  $4\ \text{см}^3/\mu F$ .

Конденсаторы из металлизированной бумаги обладают способностью самовосстанавливаться после пробоя, если он был вызван кратковре-

менным перенапряжением, так как тепло, выделяемое в момент пробоя, оплавляет тонкий слой металла около пробитого места и изолирует его от обкладок. По величине сопротивления изоляции конденсаторы из металлизированной бумаги уступают обычным бумажным конденсаторам. Постоянная времени этих конденсаторов не превосходит нескольких сотен  $M\Omega \cdot \mu F$ . Конденсаторы из металлизированной бумаги изготовлялись в прямоугольных металлических корпусах герметической конструкции, с номинальной емкостью от  $0,25 \mu F$  до  $20-30 \mu F$ . По последним данным [Л. 16] производство конденсаторов из металлизированной бумаги цилиндрического типа, в картонных и пластмассовых трубках, с номинальной емкостью от  $0,05$  до  $2 \mu F$ , освоено одной из английских фирм. Конденсатор из металлизированной бумаги емкостью  $0,1 \mu F$  на рабочее напряжение  $150 V$  имеет объем в 10 раз меньше объема обычного бумажного конденсатора с теми же номинальными данными. Отклонение емкости от номинала для конденсаторов нового типа установлено равным  $\pm 25\%$ , т. е. больше, чем для обычных. Сопротивление изоляции гарантируется не ниже  $50 M\Omega \times \mu F$ .

Применение бумажных конденсаторов в военной аппаратуре, часто длительно работающей в условиях высокой влажности, поставило вопрос о необходимости надежно герметизировать конструкцию бумажного конденсатора и полностью исключить возможность поглощения влаги пропитанной бумагой. Незадолго до войны [Л. 17] некоторые исследователи пришли к выводу, что все органические вещества обладают большей или меньшей влагопроницаемостью, а потому защита конденсатора путем заливки его органическим компаундом в открытом корпусе или путем помещения в закрытый металлический корпус с выводными изоляторами из пластмассы, с органическим связующим веществом, принципиально не могут дать хорошей влагостойкости конденсатора. Надежные результаты могут быть получены только применением такой герметической конструкции корпуса, в которой металл непосредственно сочетается с неорганическим негигроскопичным диэлектриком. Сначала задача создания такой конструкции решалась сочетанием металла и припаянной к нему керамики. Конденсаторы небольшой емкости цилиндрического типа начали изготовляться в керамических трубках, закрытых с торцов металлическими колпачками, припаяваемыми к посеребренным краям трубок. Конденсаторы большой емкости, плоско-прессованного типа изготовлялись в металлических корпусах с плотно припаянной металлической крышкой, к которой припаявались выводные керамические изоляторы. Во время войны наряду с керамическими изоляторами начали применять стеклянные изоляторы (рис. 11), изготовленные из специального стекла, которое приваривалось к металлической трубке, сквозь которую пропускался вывод от секции конденсатора, и к металлической шайбе,



Рис. 11. Стеклянные изоляторы для конденсаторов герметической конструкции.

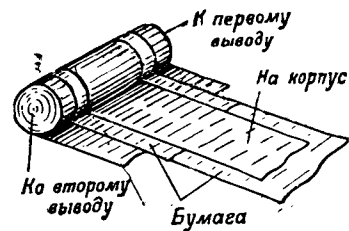


Рис. 12. Секция проходного конденсатора с малой индуктивностью.

при помощи которой изолятор припаявался к крышке корпуса. Герметические конденсаторы тщательно проверялись на отсутствие неплотности пайки, обычно путем погружения готового конденсатора в масло малой вязкости и созданием вакуума над поверхностью масла. Американские фирмы применяли до войны полностью герметизированную конструкцию только при изготовлении статических конденсаторов, рассчитанных на работу на открытом воздухе. Для небольших конденсаторов, применяемых в аппаратуре связи, для защиты от действия влаги считали достаточным применять опрессовку пластмассой или применение пластмассовых изоляторов на закрытом металлическом корпусе. Однако некоторые фирмы сохранили эту ошибочную точку зрения.

Вместе с тем в последние годы многие американские фирмы начали применять *полностью герметизированную конструкцию со стеклянными изоляторами*. Такие изоляторы выпускают теперь специально для применения в конденсаторостроении. Для изготовления трубочек шайб, свариваемых со стеклом, применяется специальный железо-никелево-кобальтовый сплав (типа фернико или ковар). Специальный состав стекла обеспечивает высокое значение сопротивления изоляции между металлическими частями изолятора: так, например, Sturakof гарантирует цифру не ниже  $1\ 000\ 000 M\Omega$ .

Таким образом, прогресс в производстве бумажных конденсаторов за последние годы привел к резкому улучшению качества этих конденсаторов по линии уменьшения габаритов, расширения диапазона рабочих температур и создания полностью герметизированной влагостойкой конструкции корпуса.

Наряду с этими существенными изменениями в области производства бумажных конденсаторов можно отметить отдельные конструктивные усовершенствования. В частности, целый ряд фирм начал изготовлять бумажные конденсаторы без специальных лапок для крепления, заменив последние съемными металлическими скобами, позволяющими легко монтировать и заменять конденсаторы, а также вести монтаж конденсатора в нормальном положении (выводами вверх) или в перевернутом положении. Внесено изменение (Sprague) в схему намотки проходных конденсаторов, служащих для борьбы с помехами (рис. 12) путем применения для

намотки конденсаторов фольги различной ширины (большей и меньшей ширины бумаги). Выступающие с торцов края широкой фольги присоединяются к выводам конденсатора, включаемым в разрыв цепи тока источника радиопомех. Узкая фольга присоединяется к корпусу конденсатора. Этим достигается снижение индуктивности конденсатора, что позволяет применять такие конденсаторы при частотах до 100 МГц без заметного резкого увеличения их кажущегося сопротивления.

\* *Электролитические конденсаторы* еще в довоенный период времени достигли за границей значительной степени совершенства, как в отношении их электрических свойств, так и в отношении автоматизации их производства. Многочисленные сообщения американских фирм по этим конденсаторам не содержат в себе никаких особенных достижений. Из этих данных можно заключить, что основным типом электролитического конденсатора в США в настоящее время является сухой конденсатор с анодами из травленной фольги.

Конденсаторы с нетравленной фольгой изготавливаются только по отдельным заказам. Максимальное значение рабочего напряжения современных конденсаторов составляет 600 В. Удельный объем при этом напряжении составляет около 3—4 см<sup>3</sup>/μF. Для удобства монтажа применяется в конструкции новой серии конденсаторных блоков изоляционная крышка из пластмассы с запрессованными в нее цилиндрическими контактами, рассчитанная на включение в гнезда стандартной ламповой панельки. Изготовление конденсаторов для длительного включения в цепь переменного тока до сих пор, по видимому, еще не освоено американскими фирмами. Сообщается лишь о стартерных электролитических конденсаторах, рассчитанных на кратковременное включение под напряжение 110 и 220 В технической частоты, при пуске однофазных двигателей. Увеличен верхний предел номинальной емкости этих конденсаторов, который ранее обычно не превышал 150—200 μF, а теперь доведен до 420 μF.

В отечественном конденсаторостроении за годы войны также произошли существенные сдвиги. До войны в СССР не было ни одного специализированного конденсаторного завода. Производство конденсаторов существовало в большинстве случаев в качестве вспомогательных цехов при заводах.

В настоящее время в СССР создано несколько заводов, специализирующихся на выпуске электрических конденсаторов различных типов. Одновременно расширяются и конденсаторные цехи на заводах телефонной и радиопромышленности. Освоен выпуск керамических конденсаторов, которые до войны изготовлялись только в лабораторных условиях. Начат выпуск

модернизованных бумажных и слюдяных конденсаторов, вводится механизация в изготовление электролитических конденсаторов, выпускаются опытные серии серных конденсаторов и т. д. Однако, по масштабам производства наше конденсаторостроение еще сильно отстает от США. Указанные в начале этой статьи данные о выпуске конденсаторов в США относились к началу военного периода. За время войны объем американской радиопромышленности вырос в 11 раз. Это повлекло за собой соответствующее расширение выпуска радиодеталей, в том числе и конденсаторов.

Чтобы ликвидировать отставание в производстве конденсаторов и не задержать развития нашей радиопромышленности, надо быстро наращивать темпы отечественного конденсаторостроения. Непременным условием для этого является резкое увеличение выпуска основных материалов, применяемых в производстве конденсаторов, и резкое улучшение их качества, что в значительной мере зависит от бумажной, химической и металлопрокатной промышленности. Надо создать базу для производства в СССР специального конденсаторного оборудования (намоточные станки, пропиточные установки и т. д.), развить широко научные исследования и уделить серьезное внимание вопросу подготовки кадров для конденсаторостроения.

#### Литература

1. А. К. Годзевский. Радиодетали. Американская техника и промышленность, стр. 2—10, № 1, 1943.
2. Electronics, p. 157, June, 1941.
3. H. Michaelson. Gas-filled and Vacuum Capacitors. Electronics, p. 124, September, 1941.
4. G. H. Floyd. Vacuum Capacitors. Proc. IRE, v. 32, p. 463, № 8, 1944.
5. Pressure Capacitors. Electronics, v. 12, p. 16, 1939.
6. New Electrical Developments of 1944, GER, v. 48, p. 29, № 1, 1945.
7. A. G. Lee, A. I. Gill. The Leaflet Coupled Arc. J. of the IEE, v. 63, p. 697, July, 1925.
8. K. G. Coutlee. Saving Mica by Testing. Bell Laboratory Record, v. 22, p. 509, № 13, 1944.
9. GER, v. 46, № 12, 1943.
10. F. K. Schoenfeld, A. W. Browne, S. L. Brous. Recent Developments with Koroseal. Ind. a Eng. Chemistry, v. 31, p. 964, 1939.
11. D. A. McLean, L. Egerton, G. T. Kohman, M. Brotherton. Paper Dielectrics Containing Chlorinated Impregnants. Ind. a Eng. Chemistry, v. 34, p. 101, № 1, 1942.
12. D. A. McLean, L. Egerton. Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants. Ind. a Eng. Chemistry, v. 37, p. 73, № 1, 1945.
13. M. Brotherton. Paper Capacitors under Direct Voltages. Proc. IRE, v. 32, p. 139, 1944.
14. L. Berberich, C. Fields, R. Marbury. Characteristics of Chlorinated Impregnants in direct-current. Paper Capacitors Proc. IRE, v. 33, p. 389, № 6, 1945.
15. G. F. Mansbridge. The Manufacture of Electrical Condensers. J. of the IEE, v. 11, p. 535, May 1908.
16. Self Healing Paper Condensers. Wireless World, v. 51, p. 204, 1945.
17. I. Linder. Neuzeitliche Kondensatoren der Nachrichtentechnik und ihre Entwicklung. ETZ, Bd 61; № 42—43, 1940.



# Новый генератор повышенных и высоких частот

Член-корреспондент Академии наук СССР В. П. ВОЛОГДИН

С развитием применения токов повышенной и высокой частоты в промышленности вопрос генерирования этого вида электроэнергии стал приобретать все большее и большее значение. В настоящее время уже установились методы как непосредственного получения токов повышенной и высокой частоты из механической энергии при помощи машинных генераторов, так и получения их путем преобразования постоянного тока с помощью электронных ламп. Каждая из этих систем имеет свои особенности, в соответствии с которыми определялись их области применения.

Однако, использование токов высокой частоты в промышленных заводских установках предъявляет новые требования, заставляющие не ограничиваться существовавшими ранее системами. Среди этих требований главными являются простота обслуживания, надежность и стоимость установок. Удовлетворение этих требований возможно за счет таких моментов, которые прежде рассматривались в качестве основных, например за счет весьма высокой стабильности частоты и отсутствия гармоник.

В связи с только что сказанным неоднократно делались предложения использовать для получения повышенных и высоких частот статические умножители частоты промышленного тока или тока генераторов сравнительно небольшой частоты.

Одним из ранних устройств такого рода являлся железный умножитель, основанный на существовании высших гармонических в электрических цепях, содержащих  $R$ ,  $C$  и  $L = \varphi(i)$ . Препятствием к широкому использованию такого источника токов повышенной частоты являлся его низкий коэффициент мощности, не превышающий  $\cos \varphi = 0,3$ .

Другим, гораздо более поздним, предложением использовать принцип умножения частоты получения токов в диапазоне 150—10 000 Hz явилась конструкция завода Allis Chalmers, получившая название Exitron [Л. 1]. Этот генератор, представляющий систему управляемых ртутных вентилях, испытан при работе индукционной печи при мощности 300 kW. В настоящее время в США предполагается выпускать типы этого генератора мощностью 250, 500 и

*Статья посвящена вопросу об источниках токов повышенных и высоких частот. Автором предлагается новая система генерации, основанная на умножении частоты при помощи конденсатора с диэлектриком из титаната бария, который имеет диэлектрическую постоянную, зависящую от градиента поля. Указываются преимущества и области практического применения нового генератора.*

1 000 kW при 1 000—2 000 Hz. Можно думать, что экситрон найдет широкое применение в заводской практике, особенно при значительных мощностях для создания токов частоты порядка

1 000—2 000 Hz, а может быть и несколько более высоких.

Наконец, в самое последнее время автором был предложен новый и весьма простой способ получения токов высокой частоты умножением.

Первая попытка автора в отношении использования умножителей преследовала цель повышения частоты высокочастотных генераторов, предназначенных для питания радиостанций. Эта работа была начата в 1911 г., несколько позже того, как М. Joly [Л. 2], Valauri и др. создали теорию и схемы железных умножителей. Автор в то время применил готовые схемы, дав лишь свои конструкции. Практически эти конструкции нашли применение, кроме лабораторных установок, на Октябрьской радиостанции в Москве для увеличения частоты генератора 20 kHz до 40 kHz, а несколько позднее для увеличения частоты 15 kHz до 30 и 45 kHz [Л. 3, 4].

В 1919—1922 гг. автор пытался использовать другой метод умножения, на который его натолкнула беседа с профессором В. А. Толвинским, а именно выпрямление при помощи ртутных вентилях, как средство получения второй гармоники.

Позднее автором делались в том же направлении попытки умножения частоты при помощи ионных вентилях. Эта работа осталась тогда незаконченной, хотя путь и был правильным, как показывает успех американского экситрона, осуществившего ту же идею спустя 25 лет.

Положительной стороной этих попыток было создание в 1919—1935 гг. теории и практических конструкций высоковольтных ртутных выпрямителей от 3 до 1 000 kW, которые в течение многих лет были основным источником питания наших ламповых радиостанций (1919—1945 гг.).

Следующей попыткой автора в области умножения частоты было выдвинутое им в 1928 г. предложение использовать для умножения емкость, зависящую от градиента поля диэлектрика.

На возможность использования этого нового принципа автор обратил внимание в результате знакомства со свойствами конденсатора с диэлектриком из сегнетовой соли ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$ ), опыты с которой он имел случай видеть в лаборатории академика И. В. Курчатова (ЛФТИ).

Замена ферромагнетика диэлектриком была продиктована желанием избавиться от введения в рабочие контуры больших индуктивностей, требующих, особенно при пониженных частотах, очень больших и дорогих конденсаторных батарей. Кроме того, конденсатор, как умножитель, имеет большое преимущество, особенно при единицах малой мощности, так как позволяет осуществлять поляризацию при работе с четными гармониками почти без расхода энергии и при отсутствии очень трудно исполнимых многовитковых катушек. После ряда опытов, в которых, как и во всей работе, всю тяжесть эксперимента вынес помощник автора А. А. Фогель, удалось осуществить умножитель частоты, работающий в широком диапазоне частот, и основанный на применении емкости, зависящей от градиента поля диэлектрика. Это был умножитель малой мощности.

Главным преимуществом его наряду с простотой и высокой отдачей являлось то, что он не только не вносил в контуры индуктивности, а наоборот, мог служить для ее компенсации, так как представлял собой емкость.

Действие предложенного устройства было основано на том, что в цепи с сопротивлением  $R$  индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$ , для которой может быть написано уравнение э. д. с.:

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_s} \int idt \quad (1)$$

в том случае, если  $C_s = \varphi(E)$ , где  $E$  напряжение на конденсаторе, при  $e = E \sin \omega t$ , будут иметь место, помимо тока с частотой  $\omega$ , также и высшие гармоники подобно тому, как в цепи при  $C = \text{const}$  и  $L = f(i)$  будут налицо высшие гармоники на зажимах индуктивности  $L$  при  $i = I_0 \sin \omega t$ , что и используется в умножителях с железным сердечником [Л. 5].

На рис. 1 даны осциллограммы умножителя, построенного на основе сегнетовой соли для получения 3, 4, 9 и, наконец, 37-ой гармоник.

Несмотря на успешное решение задачи умножения, с физической стороны это предложение до сих пор не нашло широкого использования в технике ввиду ряда практических затруднений, выступающих особенно при увеличении мощности. Эти затруднения сводятся к следующему: а) диэлектриком здесь служит кристалл, выращивание и обработка которого обходились очень дорого, почему конденсатор не может быть построен сколько-нибудь значительных размеров без больших затрат времени и труда; б) громадный диэлектрический коэффициент (до 20 000) и нелинейность его сохраняются лишь в неблагоприятном интервале температур, лежащем между  $-25$  до  $+25^\circ \text{C}$ ; в) диэлектрик хрупок; г) теп-

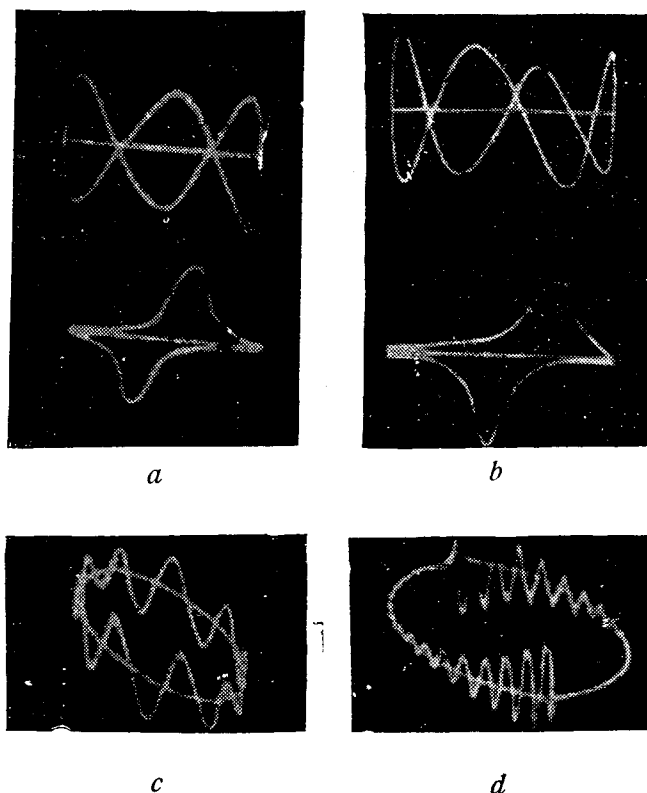


Рис. 1. Умножение частоты при помощи конденсатора из сегнетовой соли.

*a*—3-я гармоника; *b*—4-я гармоника, *c*—9-я гармоника; *d*—37-я гармоника

лопроводность его незначительна (затруднен отвод тепла).

После этой работы автор пытался осуществить ту же идею, остановившись на использовании в нелинейном конденсаторе другого диэлектрика, также обладающего сравнительно высоким диэлектрическим коэффициентом, а именно минерала рутила. В связи с неоднородностью и трудностью его обработки было предложено применить в качестве диэлектрика искусственный продукт, близкий по составу к рутилу. В качестве основной составной его части была взята двуокись титана  $\text{TiO}_2$ , входящая в состав рутила и обуславливающая его высокий диэлектрический коэффициент.

Согласно выдвинутому предложению, двуокись титана связывалась органическими соединениями типа «стирол» или изготовлялась в виде керамики, используя для спекания стекла или образуя титанаты вольфрама, молибдена и т. п. При этом удалось получить прочный, устойчивый и дешевый диэлектрик с диэлектрическим коэффициентом около 100, что само по себе являлось в то время большим успехом.

В осуществлении этого диэлектрика большую роль сыграли Л. Д. Исаков и К. Г. Куманин, много помогшие своим опытом и советами!

1 Авторские заявки на имя В. П. Вологодина, Л. Д. Исакова и К. Г. Куманина от 20 декабря 1930 г. и др.

Однако, задача получения конденсатора, обладающего нужной для умножения частоты зависимостью диэлектрического коэффициента от градиента электрического поля, еще не была решена полностью.

В 1945 г., ознакомившись с работой члена-корреспондента Академии наук СССР Б. М. Вула и с другими работами, автор увидел, что предложенный Б. М. Вулом (также на основе двуокиси титана) диэлектрик, представляющий собой титанат бария, имеет при очень высоком диэлектрическом коэффициенте нелинейность в приемлемом диапазоне температур.

В конце января текущего года в Ленинградском электротехническом институте А. А. Фогелем и А. Д. Демичевым под руководством автора была проверена возможность осуществления нового вида источника повышенных и высоких частот с использованием образца конденсатора, представленного автору Б. М. Вулом.

Уже после первых опытов определилась возможность создания генератора, использующего 3, 5, 7 и даже более, чем 21-ю гармоники. Работа велась по умножению частоты городского тока 50 Hz.

К разрабатываемому устройству предъявлялись следующие требования:

а) достаточно высокий к. п. д. в приемлемом диапазоне частот; б) возможность получения при умножении частот больших кратностей путем непосредственного использования высоких гармоник или каскадным способом при более низких гармониках в каждом каскаде; в) простота и компактность составных элементов (колебательного контура и т. д.); г) низкая стоимость материала диэлектрика конденсатора-умножителя; д) стабильность (в тепловом отношении) и механическая прочность конденсатора; е) наиболее благоприятные особенности диэлектрика конденсатора-умножителя — нелинейность и высокий диэлектрический коэффициент существовали в приемлемом интервале температур.

На рис. 2 изображена схема построенного генератора для получения нечетных гармоник. Здесь  $T$  — трансформатор на напряжение порядка 2 000—3 000 V;  $C$  — блокировочный конденсатор, представляющий достаточную проводимость для умноженных частот, на которые рассчитан генератор;  $C_T$  — конденсатор с диэлектриком из титаната бария.

Ввиду зависимости емкости этого конденсатора от напряжения при синусоидальном напряжении, даваемом трансформатором  $T$ , ток, проходящий через конденсатор  $C_T$ , будет несинусоидальным. В этом случае помимо основной гармоники он будет содержать также и нечетные гармоники. Действительно, для заряда конденсатора можно написать:

$$Q = \frac{F}{4\pi\delta} \epsilon E, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрический коэффициент;  $F$  — поверхность конденсатора в  $\text{см}^2$ ;  $\delta$  — толщина диэлектрика в  $\text{см}$ ;  $E$  — напряжение на конденсаторе в V. Ток конденсатора будет равен:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dE} \cdot \frac{dE}{dt}. \quad (3)$$

В случае обычного конденсатора при  $\epsilon = \text{const}$  и синусоидальном напряжении

$$i = a \frac{dE}{dt} = aE_0 \cos \omega t, \quad (4)$$

где  $a$  — постоянная величина; как видно из уравнения (4), ток  $i$  будет иметь синусоидальную форму. Высшие гармоники будут отсутствовать. С другой стороны, при  $\epsilon = \varphi(E)$  будем иметь для тока:

$$i = a \left[ \frac{d\varphi(E)}{dE} + \varphi(E) \right] \frac{dE}{dt}. \quad (5)$$

Совершенно очевидно, что в этом случае ток будет содержать высшие гармоники.

На рис. 3 показана осциллограмма тока, проходящего через конденсатор  $C_T$  из титаната бария, в том случае, если максимальный градиент напряжения в диэлектрике этого конденсатора будет иметь значение порядка 1 400 V/mm.

Настраивая контур, состоящий из индуктивности  $L_1$  и емкости  $C_1$ , имеющей  $\epsilon = \text{const}$ , нетрудно при помощи этого контура выделить гармоники.

На рис. 4 дана 3-я гармоника, а на рис. 5—5-я гармоника. Без труда удастся получить 11 и даже 21-ю гармоники при достаточной амплитуде, как это показано на рис. 6.

Известно, что по мере увеличения остроты кривой тока или, иначе говоря, при приближении кривой тока к виду, показанному на рис. 7, амплитуда гармоник стремится к постоянной величине.

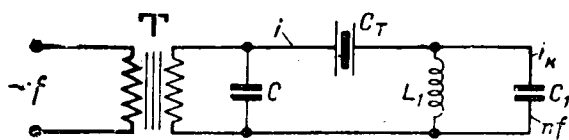


Рис. 2. Схема умножения частоты при помощи конденсатора из титаната бария (нечетные гармоники).

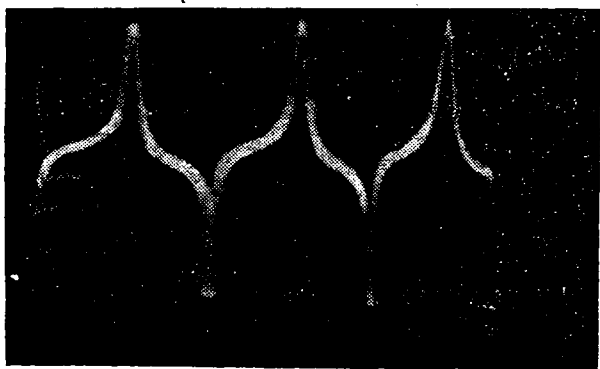


Рис. 3. Ток  $i$  через конденсатор  $C_T$ .

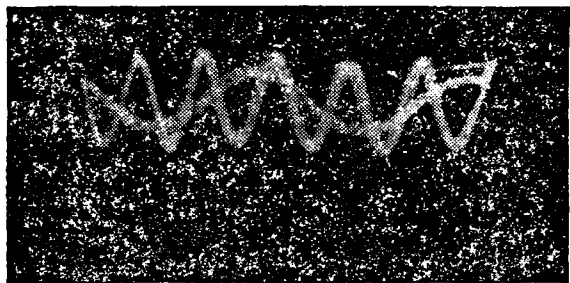


Рис. 4. Ток  $i_k$  (3-я гармоника).

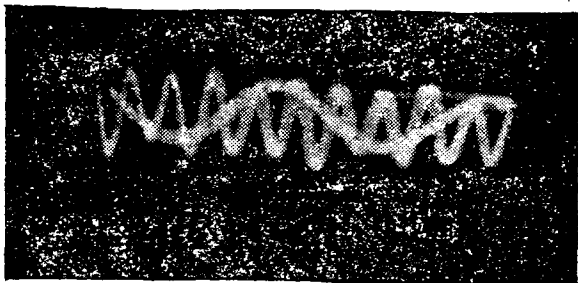


Рис. 5. Ток  $i_k$  (5-я гармоника).

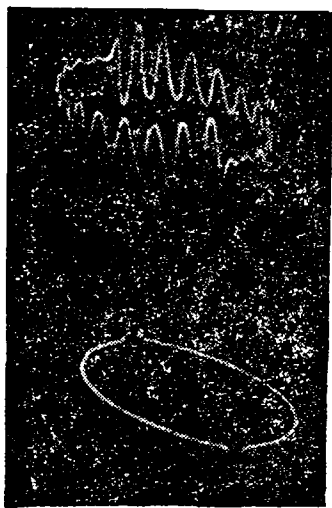


Рис. 6. Ток  $i_k$  (21-я гармоника).

Возбуждение контура в этом случае принимает характер удара. При этом высокие частоты, возбуждаемые в контуре  $L, C$ , можно считать уже не гармониками, так как они имеют частоты, определяемые в основном параметрами контура  $L, C$ , а не частотой тока сети. Здесь получается картина, совпадающая с колебаниями, возбуждаемыми в искровом генераторе, только вместо разрядника имеется нелинейный конденсатор. Колебания в этом случае будут, конечно, затухающими.

Как видно из рис. 4 и 5, даже при сравнительно низких гармониках можно наблюдать небольшое затухание амплитуды; при высоких же частотах это затухание выражается весьма резко (рис. 6).



Рис. 7. Ток при идеальном ударе.

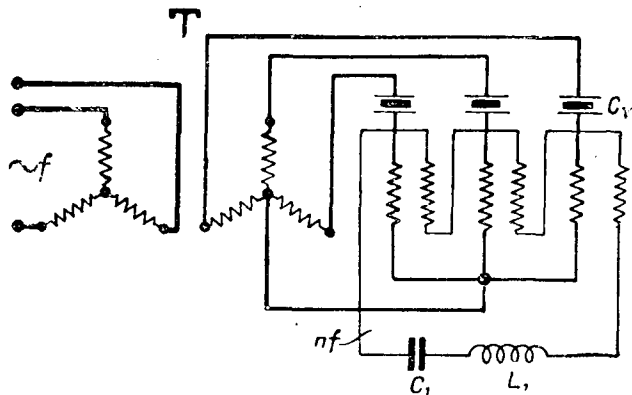


Рис. 8. Схема умножения многофазного тока.

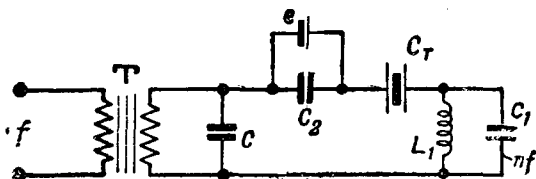


Рис. 9. Схема умножения с поляризацией—четные гармоники.  $e$ —источник постоянного напряжения.

Однако, даже при получении сравнительно высоких гармоник нетрудно получить постоянство амплитуды, если использовать несколько ударов за один период, что осуществляется при помощи многофазных схем, легко достигаемых в статических трансформаторах. Помимо постоянства амплитуды, применение многофазных схем дает значительное увеличение мощности устройства, которая растет линейно с числом фаз. Одна из схем этого рода, предложенная автором<sup>2</sup> в 1930 г. показана на рис. 8.

Мощность, развиваемая описанным устройством, в первом приближении может быть определена из выражения:

$$P = Q E f m, \tag{6}$$

где  $Q$  — максимальный заряд конденсатора  $C_T$ ;  
 $E$  — напряжение на конденсаторе;  
 $f$  — частота питающего тока;  
 $m$  — число фаз.

Как видим из (6), в первом приближении мощность будет одинаковой для всех гармоник. Так же точно очевидно, что увеличение частоты тока питания  $f$  и числа фаз  $m$  дает линейное увеличение мощности. При нечетных гармониках целесообразно применение нечетного числа фаз, так как каждая фаза дает два удара. При трех фазах получается 6 ударов, и умножение в 12, 18 раз дает едва заметное затухание.

<sup>2</sup> Авторское свидетельство № 22742 от 8 июля 1930 г.

Здесь, как и в железных умножителях, возможно получение четных гармоник применением схемы рис. 9. В случае необходимости получения высоких частот с успехом могут быть использованы каскадные схемы.

Проведенные опыты и первоначальные ориентировочные подсчеты показывают, что при исходной частоте в 50 Hz на каждый 1 см<sup>3</sup> диэлектрика возможно получение около 10 W. Таким образом, генератор в 100 kW потребует всего лишь 10 dm<sup>3</sup> диэлектрика.

Описанный выше диэлектрик имеет оптимальную для выделения гармоник зависимость  $\epsilon = \varphi (E)$  при температуре 75° C, что чрезвычайно благоприятно с точки зрения использования устройства в практических условиях завода.

**Выводы.** Предлагаемый генератор обладает простотой и низкой стоимостью, почему и может широко использоваться в заводских условиях, а также в тех случаях, где нужны звуковые и сверхзвуковые частоты. Он может найти применение в термических установках повышенной частоты, а также для питания заводских быстроходных двигателей 150, 200 и 250 Hz и, наконец, для целей измерения, автоматики и сигнализации при питании от сети 50 Hz или от генераторов 500—1 000 Hz. Важным преимуществом данного генератора является создание опережающих токов.

Наряду с задачей увеличения диэлектрического коэффициента (важной для тональных частот) на очереди стоит проблема уменьшения диэлектрических потерь. Если эта задача будет решена, то описанный генератор может быть использован и в диапазоне радиочастот.

В лабораторной практике и в области сигнализации уже сейчас можно наметить ряд интересных применений этого нового источника.

В заключение автор отмечает работу своих сотрудников А. А. Фогеля и А. Д. Демичева, выполнивших в короткие сроки поставленную перед ними задачу.

Надо также сказать, что работа члена-корреспондента Академии наук СССР В. М. Вула, сделавшего новый крупный шаг в деле создания отечественного диэлектрика с высоким диэлектрическим коэффициентом, значительно помогла осуществлению описанного выше генератора.

#### Литература

1. The Iron Age, Febr. 8, 1945.
2. M. Joly. Transformateurs statiques d. frequence. El., 1911.
3. В. Вологдин. Статический умножитель частоты, Телеграфия и телефония без проводов № 2, 1920.
4. В. Крюков. От искры до коротких волн. Ж. и Т. связи, № 11, 1927.
5. V. Wologdin. Frequenzvervielfachung durch Anwendung eines Kondensators mit Seignettesalzdielektrikum. Zeit-schrift für technische Physik, № 2, 1932.





# Развитие техники радиопередающих устройств

Доктор техн. наук, проф. И. Х. НЕВЯЖСКИЙ

Москва

Вторая мировая война оказала значительное влияние на характер развития техники радиопередающих устройств. Если в некоторых областях (как, например, в области стационарных радиовещательных передатчиков) систематические разработки значительно сократились, то в других, особенно в области передатчиков, которые работают на весьма высоких частотах, наблюдался быстрый прогресс, обусловленный, главным образом, развитием радиодокации. На этой отрасли радиотехники и на решении конструктивных и технологических вопросов производства передатчиков подвижного типа всех диапазонов было в основном сосредоточено внимание радиопромышленности во всех крупных странах.

Можно в общих чертах так охарактеризовать уровень техники радиопередающих устройств в различных диапазонах частот: на средних и длинных волнах вопросы принципиального и схемного порядка разработаны настолько, что здесь можно говорить об установившейся области техники, где вопросы экономики и эксплуатационных качеств превалируют над другими. В области коротких волн в связи с продолжающейся тенденцией к дальнейшему повышению мощности радиовещательных передатчиков продолжали разрабатываться проблемы схемного порядка (и неизбежно связанные с ними вопросы компоновки и конструкции), которые обусловлены трудностями стабилизации режима выходного каскада. Это относится и к передатчикам ультракоротковолнового диапазона, где, кроме того, привлекают внимание вопросы, связанные с частотной модуляцией и где до сих пор не найдены эффективные методы модуляции телевизионных передатчиков.

В области весьма высоких частот, несмотря на трудности, связанные с необходимостью создания новых электронных приборов и освоения совершенно новой техники (контуры, канализация энергии, антенны, методы измерений и т. п.), и несмотря на недостаточную разработку теоретических вопросов, созданы эксплуатационно надежные генераторы.

Возможность осуществления широкополосной модуляции в этом диапазоне открывает широкие перспективы ее применения для многоканальных

*Рассматриваются современное состояние и основные тенденции развития техники радиопередающих устройств. В основу статьи положен доклад на Всесоюзной юбилейной радиоконференции 1945 г.*

систем связи, телевидения и качественных радиовещательных программ и ставит вопрос о новых методах модуляции, поз-

воляющих более эффективно использовать многоканальные ретрансляционные линии связи.

**Предельные мощности.** Тенденция роста мощности радиостанций средневолнового и коротковолнового диапазона обуславливалась различными причинами, и кривые их роста протекали различно во времени. Общеизвестно, что причиной непрерывного повышения мощности средневолновых и длинноволновых передатчиков в течение первых 10—15 лет развития радиовещания было стремление создать достаточное превышение уровня сигнала над помехами, особенно индустриальными, и охватить радиовещанием возможно большее пространство вокруг радиостанций. Однако, с ростом количества станций эта тенденция ослабла, и в большинстве стран максимальная мощность радиовещательных станций установилась на уровне, не превосходящем 100—200 kW. В связи с наличием чрезвычайно большого количества радиовещательных станций, используемых в качестве частных, весьма распространенных коммерческих предприятий, в Америке введен ряд жестких ограничений, и максимальная мощность средневолновых радиовещательных станций ограничена 50 kW. И только в некоторых странах предельная мощность средневолновых радиостанций продолжала увеличиваться. Еще в 1932—1933 г. радиостанции мощностью в 500 kW были спроектированы и построены в СССР, затем в США и в Германии. В настоящее время наиболее мощная радиостанция рассматриваемого диапазона построена у нас; в Германии было приступлено к разработке станции мощностью в 5 000 kW, а с учетом направленного действия антенны — 50 000 kW в направлении главного луча. Отметим здесь, что это не первый случай применения направленных антенн на средних волнах; они, в частности, получили распространение в США.

Как известно, развитие радиостроительства шло таким образом, что при проектировании нового передатчика, значительно превышающего по мощности существовавшие, приходилось применять ту или иную систему сложения энергии

отдельных блоков, так как необходимая мощность обычно в несколько раз превосходила ту, которую вакуумная техника могла осуществить на соответствующем этапе своего развития в немногих ламповых единицах. В СССР были впервые осуществлены и теоретически разработаны системы блоков, совместно работающих на общий промежуточный антенный контур (на 500-kW радиостанции), и система сложения мощностей отдельных блоков в пространстве (на 120-kW коротковолновой радиостанции). Эти системы, наряду с системой блоков, совместно работающих на общий фидер, применялись и в дальнейшем.

Здесь интересно будет рассмотреть намечавшийся путь осуществления упомянутой германской сверхмощной радиовещательной станции. Если 500-kW станция была построена по блочной системе (3 блока по 170 kW каждый) с общим промежуточным контуром, то дальнейшее увеличение мощности этой станции предполагалось осуществить по принципу сложения мощностей в пространстве. Переоборудование предполагалось произвести двумя очередями. Проект первой очереди предусматривал создание системы, обеспечивающей отсутствие фединга в зоне радиусом до 300 km на волне порядка 1 570 m. Заметим, что антенной 500-kW станции служит башня (высотой 325 m), несущая на своей вершине горизонтальную площадку диаметром в 25 m. Предполагалось вокруг этой антенны установить 10 башен, расположенных в вершинах правильного десятиугольника диаметром  $\approx 2 \lambda$ . Помощью такого устройства (при соответствующей амплитуде и фазе токов в периферийных антеннах) можно получить вертикальную диаграмму, обеспечивающую отсутствие излучения в пределах углов возвышения, которым соответствует нежелательное в смысле ближнего фединга пространственное излучение. Все периферийные башни должны были питаться от отдельного, но общего для них каскада, причем предполагалось установить фазовращатели по одному в каждом фидере, питающем башню.

В работах второй очереди предполагалось довести мощность радиостанции до 5 000 kW; кроме того, имелось в виду осуществить соответствующим фазированием токов в антеннах направленное излучение с коэффициентом направленности (по мощности) порядка 10. Все периферийные башни должны были питаться индивидуальными передатчиками мощностью по 500 kW каждый. Управление и контроль фаз предполагалось производить с центрального пульта управления. Перед войной было приступлено к лабораторному исследованию ряда возникших в связи с проектом вопросов; в частности, была принята разработка выходного каскада мощностью 500 kW на несущей частоте в диапазоне 192—2 000 m, работающего на 2 лампах с номинальной мощностью 600 kW каждая. Образцы ламп находились в изготовлении.

Надо сказать, что станции мощностью свыше 100—200 kW являются уникальными и, повидимому, в ближайшие годы не следует ожидать строительства в большинстве стран радиостан-

ций средневолнового диапазона большей мощности.

Иначе обстоит дело с радиовещательными передатчиками коротких волн. Война показала, каким серьезным орудием политического и морального воздействия является дальней радиовещание. Характерно то большое значение, которое придается во всех крупных государствах иностранному радиовещанию и их стремление довести свои передачи до слушателей любой страны путем увеличения мощности коротковолновых радиостанций и использования ретрансляций (например, ежедневные ретрансляции американских передач для Германии, Австрии, Италии, Польши и т. д. через радиостанции, расположенные в Англии и в Северной Африке).

Так, в период 1935—1937 гг. максимальная мощность радиовещательных коротковолновых станций составляла 50 kW, в 1938 г. — 120 kW (СССР), а к началу войны уже в ряде стран работали 100-kW радиостанции, причем в Германии к этому времени заканчивались разработкой, а во время войны были построены передатчики мощностью 200/160 kW в одном блоке; мощность же станции в США достигает 200 kW. По видимому, в ближайшие годы следует ожидать дальнейшего роста мощности радиовещательных станций коротковолнового диапазона.

Мощность коротковолновых передатчиков магистральной и международной телеграфной связи в довоенные годы также непрерывно возрастала; здесь наиболее распространенными были передатчики мощностью 15—60 kW, и наиболее мощный телеграфный передатчик (200 kW) был построен в Америке. Но в последние годы в связи с применением частотной манипуляции, дающей значительное увеличение помехоустойчивости радиолинии (и использованием ретрансляций) даже дальние линии связи надежно обслуживаются передатчиками мощностью порядка нескольких киловатт.

Мощность ультракоротковолновых передатчиков метрового диапазона, применяемых для телевидения и радиовещания, не превышает 50 kW. Радиолокация вызвала развитие передатчиков с генераторами, работающими в импульсном режиме мощностью от тысяч киловатт в метровом диапазоне и до десятков киловатт в диапазоне волн порядка нескольких сантиметров.

Если в дециметровом диапазоне применялись различные виды генераторов, то в сантиметровом диапазоне, поскольку речь идет о более или менее значительных мощностях, исключительное применение имеет магнетрон. Процесс шел, однако, таким образом, что верхняя частотная граница применения триодного генератора все время повышалась и в том диапазоне, куда триод проникает, другие виды генераторов уступают ему место, особенно в передатчиках связных, где требуется неискаженная модуляция колебаний.

**Промышленный к. п. д. и системы модуляции.** Если в передатчиках подвижного типа вопрос об общем их к. п. д. связан, главным образом, с необходимостью уменьшения потребления, га-

барита и веса всей радиостанции, включая и источники питания (причем для осуществления этой задачи часто идут на понижение ряда характеристик), то в случае стационарных передатчиков, особенно при больших мощностях и в условиях почти круглосуточной работы, чрезвычайно актуальным становится вопрос об экономичности эксплуатации радиостанции. Он тесно связан с примененной схемой модуляции.

В первые годы развития радиотелефонии выбор и эволюция схем модуляции определялись, главным образом, стремлением получить устойчивую и неискаженную модуляцию. Типичная для предыдущего десятилетия схема модуляции на сетке одного из промежуточных каскадов была неизбежно связана с низким промышленным к. п. д., который даже в наиболее мощных радиовещательных станциях был лишь порядка 20% (в режиме молчания). Стремление повысить этот к. п. д. вызвало обратный переход к анодной модуляции с модулятором, работающим в режиме класса В. Эта схема является общепринятой в современных радиостанциях, промышленный к. п. д. которых лежит в пределах 40—50%. Правда, применение принципа противосвязи позволило осуществить также высокоэффективные схемы сеточной модуляции (схема Догерти), однако некоторая сложность в эксплуатации, особенно при смене рабочих волн, ограничила их распространение.

Приведенная таблица иллюстрирует развитие и состояние вопроса о промышленном к. п. д. радиовещательных станций. В ней дано распределение мощностей (в режиме молчания) в процентном отношении ко всей подводимой мощности для 4 радиостанций: 1) 150-kW средневолновой радиостанции с сеточной модуляцией, разработки 1934—1935 гг.; 2) 120-kW коротковолновой радиостанции с анодной модуляцией разработки 1936—1937 гг.; 3) современной средневол-

новой 150-kW радиостанции; 4) современной американской коротковолновой 50-kW радиостанции.

Из таблицы видно, что потери в анодной цепи выходного каскада, которые в передатчике с сеточной модуляцией являются преобладающими, становятся в передатчиках с анодной модуляцией меньше всех остальных потерь. Еще относительно большие потери в анодной цепи выходного каскада (с учетом потерь на аноде, в ограничительных сопротивлениях и трансформаторах) 120-kW коротковолновой радиостанции обусловлены не только несколько пониженным к. п. д. лампы, работающей на коротких волнах, но и потерями в относительно больших значае применявшихся ограничительных сопротивлениях. Вопрос о повышении к. п. д. в немалой степени связан с характеристиками мощных ламп и ассортиментом ламп средней мощности. Характерна чрезвычайно малая мощность, потребляемая предоконечным каскадом американского 50-kW передатчика, что обусловлено весьма малыми сеточными токами выходных ламп: 50-kW каскад здесь возбуждается двумя киловаттными тетрами.

Эта же причина позволила в американском передатчике резко снизить потребление подмодулятора (в таблице оно включено в общее потребление всех остальных предварительных каскадов), построенного по дроссельной схеме усиления с катодной связью. Уменьшение потребления подмодулятора в наших современных станциях по сравнению с первыми станциями, где он работал в режиме класса А, достигнуто в результате применения специальной схемы, позволившей перевести подмодулятор в режим класса В при молчании с автоматическим передвижением рабочей точки в соответствии с уровнем модуляции.

Понижение потребления всего модуляционного устройства при высоких электроакустических показателях ( $k$ , равен 3—5% при  $M=95-100\%$ ; уровень шумов — 60 db) достигнуто в результате серьезной проработки вопросов противосвязи, широко применяемой в современной технике радиопередающих устройств. Отсутствие противосвязи в германских станциях, равно как и некоторые другие особенности схем, обусловлены не техническими соображениями; здесь влияли специфические организационные и экономические условия.

Переходя к диапазону ультракоротковолновых передатчиков, следует отметить чрезвычайно низкий промышленный к. п. д. телевизионных передатчиков, где требование прохождения широкой полосы модулирующих частот определяет весьма малый к. п. д. оконечного каскада (порядка 40% в пиковом режиме), модулируемого на сетке. Что касается радиовещательных ультракоротковолновых передатчиков с частотной модуляцией, то (независимо от того, что здесь выходной каскад остается во время модуляции в телеграфном режиме) их эффективность — если расширить это понятие и сопоставлять подводи-

Таблица процентного распределения мощностей

Показатели	Радиостанции 1935—1937 г.		Современные радиостанции	
	Средневолновая 150 kW	Коротковолновая 120 kW	Средневолновая 150 kW	Коротковолновая 50 kW
Номинальная мощность . . .	19,5	25,0	43,0	43,0
Потери в анодной цепи выходного каскада высокой частоты . . . . .	52,0	23,0	16,5	19,5
Потребление предоконечного каскада высокой частоты . .	7,2	12,5	5,5	4,0
Потребление модулятора . . .	—	9,5	4,0	9,0
Потребление подмодулятора .	—	7,8	1,5	—
Потребление остальных каскадов высокой и низкой частоты . . . . .	1,5	1,2	1,5	1,5
Потребление накала . . . . .	14,0	18,0	22,0	18,0
Потребление вспомогательных цепей . . . . .	6,0	3,0	6,0	5,0

мые к передатчикам мощности при одном и том же отношении сигнала к помехе на выходе приемника — во много раз превосходит эффективность передатчиков с амплитудной модуляцией. Частотная модуляция (преимущественно узкополосная) применяется и в ультракоротковолновых СВЧ радиостанциях. Система частотной модуляции, не получившая применения в коротковолновой телефонии, в частности, из-за селективного фединга, дала повышение эффективности коротковолновых линий фотопередачи, эквивалентное повышению мощности передатчика в 10—20 раз.

Если при определении эффективности станции учитывать не номинальную, а излученную мощность, то следует отметить чрезвычайно низкий к. п. д. передатчиков, работающих на очень длинных волнах, вследствие весьма низкого к. п. д. антенны. Интересным исключением является своеобразное сооружение — 1 000-kW радиостанция на частотах, близких к звуковым (15 000—20 000 Hz), построенная в Германии во время войны для связи с подводными лодками. Чрезвычайно высокий для станций подобного рода общий к. п. д. (50%) объясняется здесь в первую очередь необычайно высоким к. п. д. антенны, а также относительно малыми потерями в элементах контуров.

Антенна этой радиостанции представляет, по существу, вариант антенны Александерсена с более выгодным распределением токов в земле. На рис. 1 представлена схема питания антенны; на рис. 2 показан план антенны. Каждое из трех снижений  $B$  представляет тело стальной оцинкованной изолированной мачты высотой в 200 м. От вершины каждой из этих мачт расходятся лучи горизонтальной части антенны, изолированной от поддерживающих ее заземленных мачт (расположенных на расстоянии 20 м вокруг мачт — снижений). Снижение  $A$  состоит из трех пар проводов, причем каждая из трех секций антенны питается одной парой проводов. Заземление состоит из оцинкованных железных лент  $10 \times 2$  мм<sup>2</sup>, радиально расходящихся вокруг каждой из мачт — снижений ( $B$ ) и вокруг здания ра-

диостанции ( $A$ ). Общая длина уложенного в земле провода равна 350 км. Вокруг здания, а также вокруг площадки каждой из мачт  $B$  размещены широкие кольца сборочных шин заземления.

Из экспериментально снятых кривых сопротивлений и распределения мощности, подведенной к антенне, следует, что к. п. д. антенны достигает 90% и минимум сопротивления земли составляет всего лишь 0,03  $\Omega$ . Надо считать эту величину необычайно малой, даже если принять во внимание, что при проектировании были предусмотрены вышеуказанные меры к уменьшению потерь в земле. Строители станции указывают, что площадка радиостанции выбиралась весьма тщательно и почва на территории радиостанции богата солями. Весьма малые потери в катушках индуктивности достигнуты в результате тщательного изучения вопроса о сопротивлении катушек в диапазоне частот радиостанции. Все они сделаны из литцендрата, диаметр которого достигает 10 мм. Удлинительные катушки снижений, намотанные из 5 таких параллельно идущих проводов, имеют необычные размеры: высоту — 5 м, а диаметр — 3,2 м. Для плавной настройки внутри катушки передвигается (помощью подвижного механизма — лифта) в вертикальном направлении катушка с короткозамкнутыми витками.

При суммарной емкости антенны порядка 110 000  $\mu\text{F}$  и полном сопротивлении антенны на длинноволновом участке диапазона порядка 0,15—0,2  $\Omega$  затухание антенны составляет десятые доли процента, а полоса пропускания антенны — всего лишь 20—50 Hz. Соответственно время установления режима велико, и во избежание значительных перенапряжений манипуляционное напряжение при телеграфировании подается ступенями.

**Схемные вопросы.** Выше указывалось, что вопросы схемы высокочастотного тракта передатчиков средних и длинных волн играют в настоящее время относительно второстепенную роль; выбор схем обычно определяется соображениями не принципиального порядка. Что касается коротких волн, то трудности стабилиза-

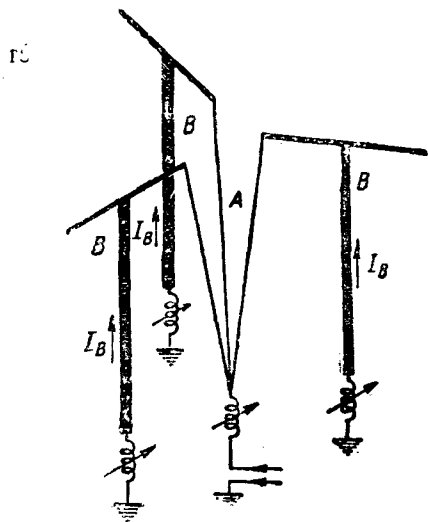


Рис. 1.

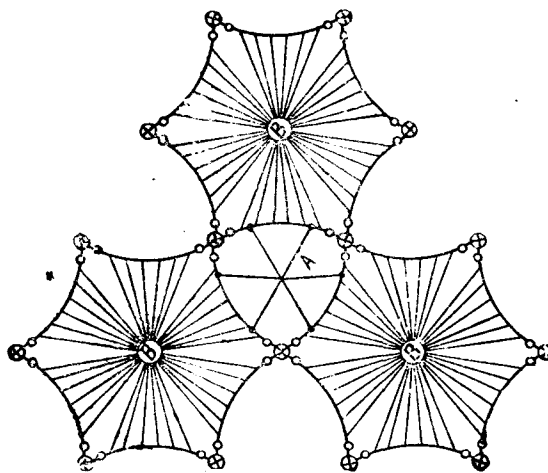


Рис. 2.

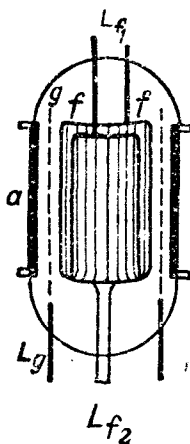


Рис. 3.

ции режима выходного каскада мощных коротковолновых передатчиков вызвал в ряде стран, в том числе и у нас, отход от классической схемы двухтактной нейтрализации. Указанные затруднения, связанные с вопросом нейтрализации и паразитных колебаний, возрастающие с повышением мощности, отпадают при переходе на схему с заземленной сеткой, которая нашла применение в ряде передатчиков английских и американских фирм, или на схему с перекрестным соединением сетки и катода двухтактно работающих ламп (схема Г. А. Зейтленка), примененную на наших 60-kW передатчиках.

С повышением мощности возрастают требования к конструкции ламп, которая в значительной мере определяет условия спокойной работы каскада; соотношение внутривольных емкостей и малое значение индуктивности ввода сетки играют решающую роль в смысле стабилизации режима каскада, а также в смысле уменьшения влияния второй гармонической на его к. п. д. Это обстоятельство было учтено при проектировании упомянутого выше 160/200-kW передатчика фирмы Телефункен, которая продолжала строить передатчики по сложной схеме нейтрализации Бушбека, где элементы нейтрализации являются зеркальным отражением всех внутривольных емкостей и индуктивностей вводов лампы. В рассматриваемом передатчике применен интересный вариант этой схемы. При участии д-ра Бушбек была разработана специальная лампа RS-564 (рис. 3), обладающая минимальной индуктивностью ввода сетки. В этой лампе выводы сетки (в виде ряда штырей, расположенных по окружности и являющихся как бы продолжением цилиндрической сетки) расположены на одной стороне лампы; питание же накала подводится к противоположной стороне. Нить накала состоит из ряда параллельно включенных петель, расположенных по цилиндрической поверхности; средняя точка петли имеет также вывод ( $L_{\text{сб}}$ ). Таким образом, электроды лампы и их выводы по своей конфигурации близки к концентрическим линиям.

Вследствие концентрического расположения выводов сетки и катода нельзя при рассмотрении условий равновесия моста пренебрегать их взаимной индукцией. Учитывая последнюю, можно показать, что равновесие частичного моста сложной мостовой схемы может быть осуществлено подбором индуктивности (практически включаются специальные катушки) вводов нити  $L_{\text{н}}$  через которые подается питание накала.

В мощном каскаде передатчика в качестве нейтрализующих элементов, представляющих симметричное изображение всех внутривольных емкостей и индуктивностей вводов генераторных ламп ( $\sigma$ ) применены две «холодные» лампы N, на которые не подается напряжение питания (ниже рис. 6а). Изменение индуктивности катушек  $L_{\text{н}}$ , необходимое для нейтрализации каскада при смене волны, производится при помощи

ползунков, которые механически спарены и имеют общий привод с выведенной на переднюю панель ручкой, снабженной заранее отградуированной по диапазону шкалой.

Весьма интересное схемное и конструктивное решение вопроса о построении выходного каскада в диапазоне ультракоротких волн было дано Догерти; по этой схеме построен выходной каскад частотно модулированного ультракоротковолнового передатчика [Л. 1]. В основу положена старая идея нейтрализации каскада помощью параллельного резонансного контура между анодом и сеткой, настроенного на рабочую волну, благодаря чему промежуток анод-сетка приобретает очень большое сопротивление. Во избежание понижения характеристики анодного контура из-за емкости анода на землю (здесь применена лампа с принудительным воздушным охлаждением и соответственно развитым анодным радиатором) анод лампы заземлен; колебательный контур, осуществленный в виде настроенного отрезка концентрической линии, находится в катодной цепи. Катод находится под переменным потенциалом контура  $U_{\text{к}}$ , и для создания возбуждающего напряжения между катодом и сеткой  $U_{\text{г}}$  в цепь возбуждения сетки должна быть введена э. д. с., равная  $U_{\text{к}}$ . Это достигается тем, что провод, идущий от предыдущего каскада к сетке, проходит концентрически внутри линии, образующей колебательный контур. Рассмотрение этой схемы показывает, что, несмотря на наличие емкости сетка-катод, в схеме нет прямого прохождения колебаний и обратной реакции на предыдущий каскад, если пренебречь небольшой индуктивностью той части катодного ввода, которая находится вне описанной выше концентрической конструкции. Нейтрализующий контур между сеткой и анодом осуществлен также в виде концентрической линии. Так как внешние цилиндры обоих контуров и анод лампы заземлены, то в результате получается чрезвычайная простота и «прозрачность» конструкции с минимальным применением изоляции: основные элементы каскада представляют три трубчатых вертикальных конструкции, из которых одна образует воздухопровод с лампой, а две других — катодный и нейтрализующий контур.

**Стабилизация частоты.** В передатчиках стационарного типа еще до войны осуществлены нормы, предложенные международной конференцией в Каире для радиостанций, устанавливаемых после 1940 г. —  $(1 \pm 2) \cdot 10^{-5}$ . В периодической литературе военного времени продолжалась публикация работ, посвященных кварцевым вопросам. За последние годы достигнут значительный прогресс в методе серийного производства кварцевых пластин, даже в диапазоне ультракоротких волн.

Что касается передатчиков подвижного типа с плавным диапазоном, то достигнутые к началу войны степени стабильности были значительно ниже требований, диктуемых условиями действительной эксплуатации. Война показала, насколько важна в условиях одновременной работы большого количества станций возможность

<sup>1</sup> Такой способ нейтрализации был в свое время предложен проф. В. В. Татаринovem.

бесподстроечной связи или по крайней мере возможность беспоискового вхождения в связь. Повышение стабильности генераторов с плавным диапазоном шло, главным образом, по пути конструктивного улучшения деталей и применения высококачественных материалов. В современных генераторах с плавным диапазоном при наличии кварцованных опорных точек и точных шкально-верньерных устройств может быть получена если не неподстроечная связь, то во всяком случае беспоисковое вхождение в связь даже на волнах порядка нескольких десятков метров. Применение кварцевых пластин косых срезов с температурным коэффициентом частоты порядка  $10^{-6}$  в широком интервале температур и стабильных деталей обеспечивает на фиксированных волнах стабильность частоты порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  у передатчиков подвижного типа, работающих в условиях значительно изменяющихся внешних температур, а использование кварца для стабилизации и гетеродина приемника при осуществимых в настоящее время допусках может представить систему беспоисковой и неподстроечной связи.

Недостаток такой системы заключается в том, что число рабочих волн поневоле не может быть большим, так как он определяется количеством наличных кварцевых пластин. Чрезвычайно интересное решение этого вопроса дано в немецкой самолетной ультракоротковолновой станции ФУГ XV, которая позволяет осуществить 200 жестких каналов связи без применения кварцев, определяющих рабочую волну. Задача была решена в результате применения оригинальной системы установки частоты, чрезвычайно низкого температурного коэффициента частоты (порядка  $2 \cdot 10^{-6}$ ) контура генератора с плавным диапазоном, использования принципа автоподстройки в приемнике и оригинальной схемы, у которой настройка контура при работе станции на передачу совпадает с его настройкой при переходе на прием (двухсторонняя связь ведется на одной и той же волне).

У этой станции переменный конденсатор контура может быть установлен в одно из двух-

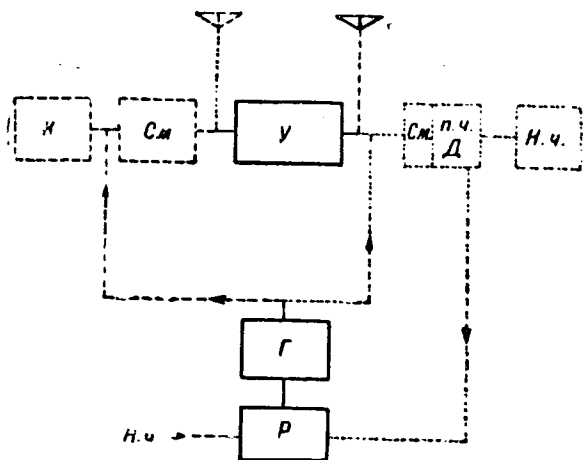


Рис. 4.

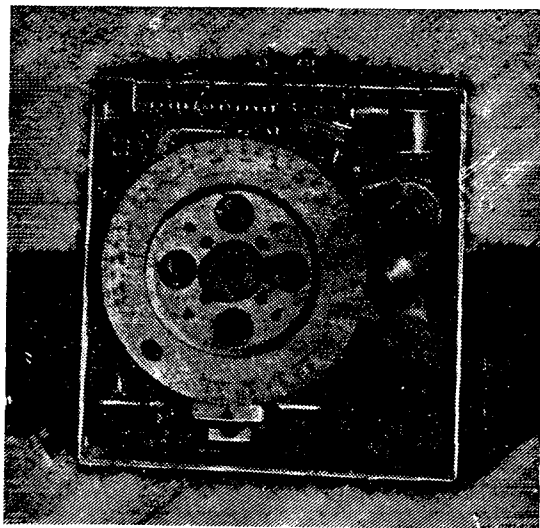


Рис. 5.

сот фиксированных положений; кроме этого конденсатора предусмотрен еще один небольшой подстроечный конденсатор. На каждой фиксированной волне емкость этого подстроечного конденсатора может быть индивидуально подобрана помощью одного из установочных винтов, число которых примерно соответствует числу фиксированных волн: при установке основного конденсатора в то или иное фиксированное положение емкость подстроечного конденсатора определяется соответствующим установочным винтом. Таким образом, при первоначальной регулировке станции здесь не производится градуировка шкалы по соответствующим частотам, а наоборот, емкость контура подгоняется на каждом фиксированном положении под готовую шкалу.

Скелетная схема станции приведена на рис. 4; здесь элементы, участвующие только при приеме, обозначены точечным пунктиром, а элементы, участвующие только при передаче, штриховым пунктиром. При приеме генератор  $\Gamma$  служит гетеродином и работает на частоте, превышающей принимаемую на 12 MHz (промежуточная частота). Автоподстройка приемника осуществляется помощью дискриминатора и реактивной лампы  $P$ . При передаче в антенну поступает частота на 12 MHz ниже частоты генератора  $\Gamma$ , так как его колебания модулируются частотой в 12 MHz, получаемой от вспомогательного кварцевого генератора  $K$ , и в усилителе  $У$  выделяется нижняя боковая частота. Та же реактивная лампа служит при передаче для осуществления частотной модуляции передатчика. Эта система позволяет осуществить прямо-передатчик, на передней панели которого отсутствуют органы настройки: выбор волны производится дистанционно при помощи электромагнитной системы, воздействующей на храповик, поворачивающий конденсатор в одно из двухсот фиксированных положений.

На рис. 5 показан вид прямо-передатчика с отнятой передней панелью.

Задача стабилизации волны частотно-модулированных передатчиков, которая находится в некотором противоречии с требованием широкой девиации частоты при модуляции, изящно решена в широко применяемой в настоящее время схеме Кросби [Л. 2] и ее модификациях.

**Эксплуатационные качества и конструктивные особенности.** Война послужила широким полем для проверки конструктивных и эксплуатационных качеств передатчиков подвижного типа. Она внесла ряд существенных поправок, которые учитывались «на ходу» во время войны и дадут богатый материал при проектировании новых станций. Сюда относится целый комплекс весьма разнообразных вопросов, которые являются специфичными для передатчиков того или иного применения и которые здесь не могут быть подробно освещены.

Что касается стационарных передатчиков, то в качестве одного из характерных явлений, в известной степени связанных с условиями войны и возможностью помех, можно отметить то обстоятельство, что даже в наиболее мощных объектах (всех диапазонов), построенных во время войны, предусматривается быстрый переход на любую волну диапазона. Система волнового переключения, методы осуществления связи с антенной, а также антенной коммутации современных передатчиков английских и американских фирм описаны в литературе [Л. 3]. В ряде типов мощных коротковолновых передатчиков задача получения настройки в широком диапазоне волн решается применением контура, осуществленного в виде двухпроводной линии. Не все эти системы обладают достаточно гибким волновым управлением. Среди передатчиков германского производства интересна система волнового управления и построение выходного каскада упомянутого выше 160/200-kW передатчика.

На рис. 6а дана принципиальная схема выходного каскада, а рис. 6б дает представление о компоновке основных элементов схемы. Индуктивность контура образует система Лехера из двух труб длиной в 3 м, заключенных в экран. Эта индуктивность меняется помощью закорачивающего подвижного мостика  $P$ , представляющего собой сплошную заземленную медную доску с большим количеством радиально расположенных контактных роликов  $p$ . Так как всю эту конструкцию удобно держать под потенциалом земли, то здесь применена параллельная схема анодного питания: разделительный конденсатор относительно большой емкости образуют пластины  $a$  и  $b$ ; передвижением пластин  $c$ , соединенных с антенным фидером, изменяется связь с антенной. На диапазоне самых коротких волн к основной лехеровой системе, образующей антенный контур, подсоединяется параллельно еще одна такая же лехерова система, не показанная на рисунке. На среднем поддиапазоне работает только одна лехерова система, а на последнем поддиапазоне в контур включается добавочная емкость  $C_1$  (рис. 6б).

Задача дросселирования в широком диапазоне волн (70—12 м) цепи постоянного тока при

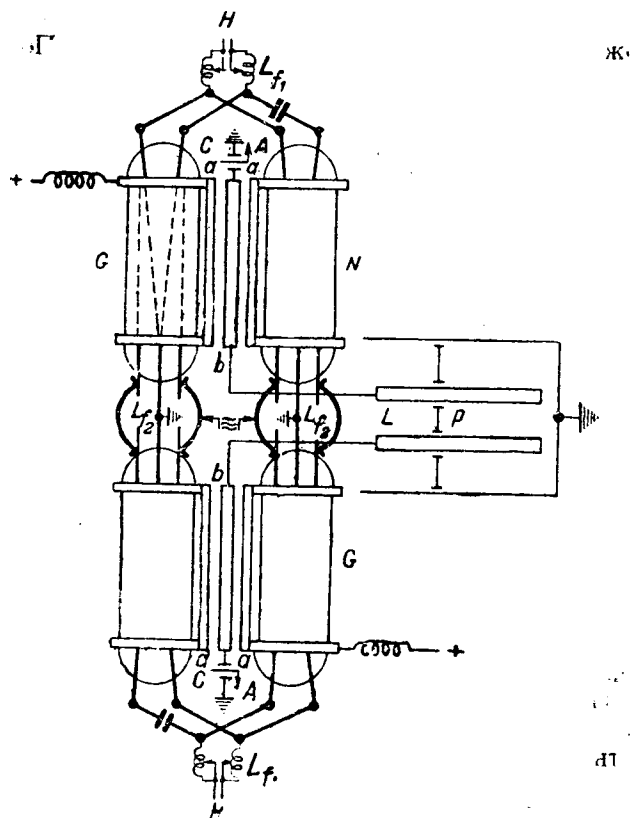


Рис. 6а.

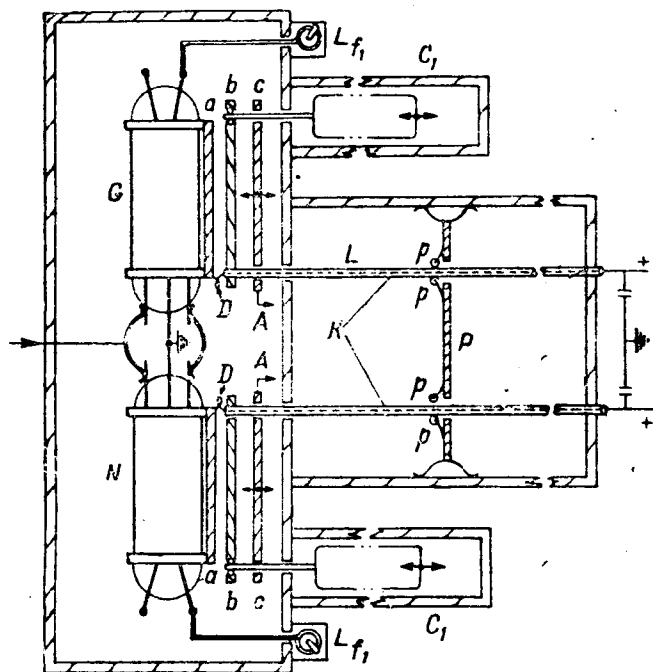


Рис. 6б.

параллельной схеме анодного питания решена следующим оригинальным способом: провода анодного питания  $K$  (рис. 6б) пропущены через трубы, образующие лехерову систему анодного контура, и присоединены к анодам ламп через небольшие дроссели  $D$ . Таким образом, на питающие провода наводится э. д. с, которая лишь

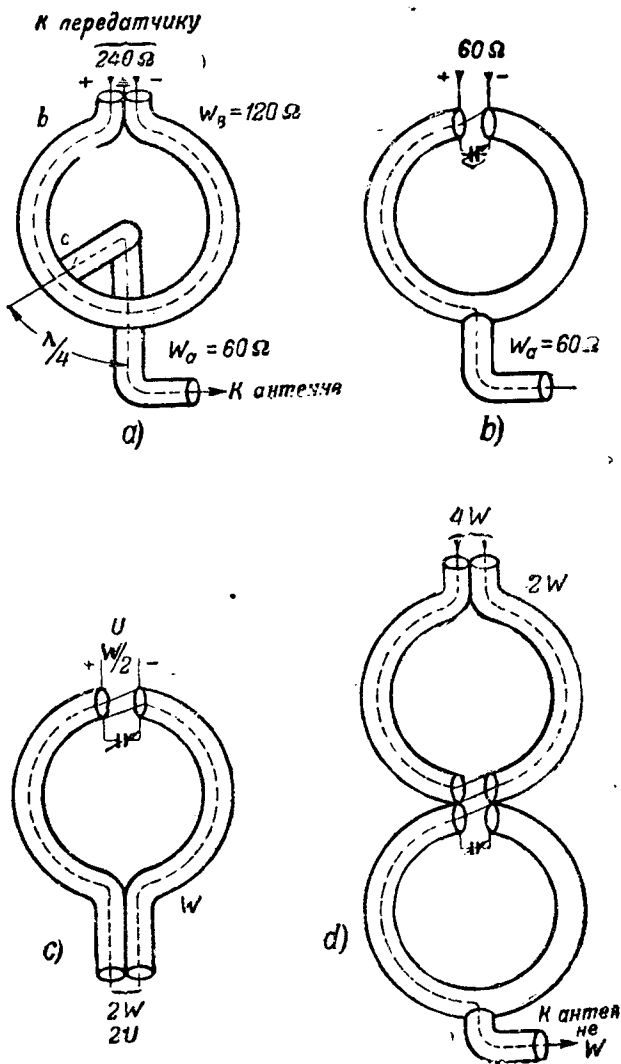


Рис. 7.

немногом меньше переменного напряжения на аноде ламп.

Чтобы уяснить, как решается здесь вопрос о связи с несимметричным антенным фидером, рассмотрим сначала уже описанную в литературе систему, примененную в 50-kW коротковолновых передатчиках фирмы Телефункен (рис. 7,а). Здесь выполняется условие симметричной нагрузки контура при отсутствии отражения; при этом контур оказывается нагруженным сопротивлением, равным  $4 \sqrt{V_a}$ . Недостатком этой системы является наличие однотоктной волны второй гармоники на антенном фидере. Этого недостатка нет в системе, изображенной на рис. 7,б, где внешний провод линии *b* настроен в резонанс помощью конденсатора переменной емкости; однако, здесь нагрузка на контуре получается в четыре раза меньше, чем в предыдущем случае. Для трансформации сопротивления может быть применена система, показанная на рис. 7,с. Здесь происходит трансформация напряжения два раза, а сопротивление — четыре раза. Соединение устройств систем рис. 7б и 7с, дает систему 7д — свободную от однотоктных волн четырех гармоник при входном сопротивлении, в четыре раза большем

волнового сопротивления антенного фидера. На 160/200-kW радиостанции переходное устройство (рис. 6,б) и трансформатор (рис. 7,с) имеют форму вытянутого прямоугольника; они расположены друг над другом в общем экранирующем коробе длиной в 4 м; настройка производится помощью конденсатора и подвижного закорачивающего мостика.

Стремление повысить надежность работы передатчиков, снизить эксплуатационные расходы (а также капитальные затраты) привело к широкому внедрению в Америке ламп с принудительным воздушным охлаждением, мощность которых доходит до 100 kW. Этим же стремлением и целесообразностью освобождения радиостанций от машинного зала и вращающихся агрегатов объясняется применение переменного тока для непосредственного питания накала ламп. Кроме известных методов уменьшения фона от питания накала переменным током, отметим применение в некоторых американских передатчиках схемы избирательной противосвязи, уменьшающей основную компоненту спектра шумов тракта высокой частоты. Эти меры позволяют обеспечить уровень шумов — 60 db и меньше.

Помимо перечисленных можно привести ряд других усовершенствований, повышающих эксплуатационные качества и облегчающих настройку передатчиков, как, например: применение трансформаторов накала с большим рассеянием, ограничивающих пусковой ток и избавляющих от необходимости постепенного повышения напряжения накала; применение быстродействующих выключателей анодного тока с автоматическим повторным включением; применение фазоиндикаторов для облегчения и сокращения времени настройки многоконтурных систем и т. п. Указанные фазоиндикаторы собираются по дифференциальной системе и снабжаются прибором с нулем посредине шкалы. Так, при настройке связанных контуров используется то обстоятельство, что при резонансной настройке вторичного контура токи в контурах сдвинуты на  $90^\circ$ , при этом индикатор дает нулевое показание, независимо от абсолютного значения токов; такой же прибор, но дающий нулевое показание при сдвиге в  $180^\circ$ , применяется для настройки анодного контура, при этом используется то обстоятельство, что при правильной настройке сдвиг фаз между напряжениями на аноде и сетке равен  $180^\circ$ . Аналогичные приборы применяются для индикации активного характера нагрузки, подбора связи и т. п. В результате применения таких приборов при настройке сложных систем исключается необходимость в ряде последовательных операций по методу последовательного приближения.

**Многоканальное использование передатчиков.** Стремление максимально использовать оборудование станции привело к внедрению способов многоканальной передачи. На коротких волнах устоялась система многоканальной передачи одной боковой полосой нескольких каналов, из которых каждый занимает свой спектр частот; на приеме каналы разделяются помощью вторичной частотной селекции. Интересные работы по одно-



временному использованию передатчика для телеграфии (частотная манипуляция) и телефонии (амплитудная модуляция), по многократной радиотелеграфии с частотно-временным разделением каналов производились в СССР<sup>1</sup>.

Многоканальность осуществляется за счет уменьшения эффективной мощности на каждом канале и расширения полосы частот. Тем не менее многоканальность оправдывается экономическими и эксплуатационными соображениями, в частности, возможностью использования избытка мощности коротковолнового передатчика в часы хорошего прохождения и лучшим использованием занимаемой полосы частот; на достаточно коротких волнах при передаче каждого канала помощью отдельного передатчика пришлось бы из-за нестабильности расставлять относительно далеко несущие частоты отдельных передатчиков. Так как помимо этого на весьма высоких частотах легко осуществляется широкополосная передача, то вопросы, связанные с многоканальностью, приобретают особую актуальность в развивающейся области ретрансляционных линий связи.

Здесь до недавнего времени общепринятым был метод частотной модуляции несущей частоты передатчика спектром, получающимся в результате амплитудной модуляции каждым каналом своей поднесущей частоты и выделения одной боковой полосы. Разделение каналов производится на месте приема методом вторичной частотной селекции.

Громоздкость аппаратуры для сложения каналов на передатчике и их разделения в приемнике, трудности, связанные с возникновением взаимных помех между каналами, резкое понижение помехоустойчивости с увеличением числа каналов при частотной модуляции вызвало поиски других систем для ретрансляционных линий связи. Значительное внимание привлекает к себе вопрос об импульсных способах модуляции. То обстоятельство, что этот вопрос стал актуальным, именно в настоящее время, и что он связывается с ретрансляционными линиями связи, не является случайным. Действительно, практически оправдавшиеся достоинства частотной модуляции естественно вызвали мысль о том, что она является, может быть, не единственным и не наилучшим способом модуляции, использующим широкую полосу частот; с другой стороны, радиолокация вызвала развитие импульсной техники и привлекла к ней внимание значительного числа специалистов. Далее, дециметровый и сантиметровый диапазон позволяет осуществить передачу и прием весьма коротких импульсов; наконец, можно было предполагать, что импульсные методы позволят избежать недостатков, характерных для описанной выше многоканальной системы.

<sup>1</sup> Работы А. А. Магазаника.

Импульсная система в некоторых из практически продвинутых вариантов предполагает наличие коммутационной электронно-лучевой трубки на передающем и приемном пунктах. В принципе действие системы можно представить таким образом: электронный луч передающей трубки, синхронно с которым вращается луч приемной трубки (с частотой, по крайней мере вдвое превышающей максимальную частоту модуляции), обходит поочередно расположенные по окружности ламели, из которых каждая связана со своим каналом. Таким образом, здесь осуществляется временная селекция. Во время нахождения луча на любой ламели каждый раз подается импульс, причем фаза его появления сдвигается пропорционально модулирующему напряжению данного канала. На месте приема эти фазовые сдвиги в каждом канале преобразуются в пропорциональные изменения напряжения.

Не останавливаясь на подробностях, отметим, что теоретически здесь расширение полосы (т. е. сужение импульса при соответствующем увеличении его амплитуды) не приводит к порогу помехоустойчивости, как это имеет место при частотной модуляции. Заметные преимущества в смысле помехоустойчивости достигаются при относительно большом количестве каналов, и этот выигрыш растет с их числом.

Предлагался и ряд других методов импульсной модуляции, которые не дошли до стадии эксплуатационной проверки. В частности, была разработана импульсная самолетная радиостанция (ФУГ XIII) с применением модуляции частоты появившейся групп, каждая из которых состоит из трех импульсов, определенным образом сдвинутых во времени один относительно другого (та или иная комбинация сдвигов в группе может быть заранее выбрана). Задача была решена весьма простыми средствами схемного порядка, однако имеющиеся данные не позволяют считать, что цель разработки — повышение помехоустойчивости, возможность работы на одной волне нескольких станций и затруднительность приема без знания выбранной комбинации импульсов в группе — действительно достигнута.

Во всяком случае следует считать, что в области ретрансляционных высокочастотных линий связи импульсные методы должны, несомненно, получить в перспективе развитие главным образом вследствие значительного упрощения низкочастотной аппаратуры (сложения и разделения каналов) и обеспечения борьбы с междуканальными помехами.

#### Литература

1. A. A. Skene, N. C. Olmstead. A new frequency-modulated broadcasting transmitter PIRE, v. 30, № 7, 1942.
2. A. K. Wing, J. E. Young. A transmitter for frequency-modulated broadcast service. RCA Review, v. V, № 3, 1941.
3. Б. Ф. Высокый. Коротковолновые радиовещательные центры США. Американская техника и промышленность, № 3, 1943.



# Опыт односторонне направленного вещания на длинных волнах

Доктор техн. наук, проф. А. Л. МИНЦ, доктор техн. наук, проф. З. И. МОДЕЛЬ и кандидат техн. наук, доц. С. В. ПЕРСОН

Москва

**Выбор односторонне направленной антенны.** Пусть антенная система составлена из излучателя и рефлектора. Обозначим соотношение токов в рефлекторе  $I_2$  и излучателе  $I_1$ :

$$\frac{I_2}{I_1} = ae^{\psi}. \quad (1)$$

Тогда активное и реактивное сопротивления излучателя будут:

$$r_{A3} = r_A \left[ 1 + a \frac{|z_{12}|}{r_a} \cos \left( \psi + \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} \right) \right], \quad (2)$$

$$x_{A3} = x_A \left[ 1 + a \frac{|z_{12}|}{x_a} \sin \left( \psi + \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} \right) \right]. \quad (3)$$

Соответственно у зеркала:

$$r_{3A} = r_3 \left[ 1 + \frac{1}{a} \frac{|z_{12}|}{r_3} \cos \left( -\psi + \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} \right) \right], \quad (4)$$

$$x_{3A} = x_3 \left[ 1 + \frac{1}{a} \frac{|z_{12}|}{r_3} \sin \left( -\psi + \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} \right) \right]. \quad (5)$$

Здесь  $r_A, x_A$  — собственные активное и реактивное сопротивления излучателя при отсутствии зеркала;  $r_3, x_3$  — собственные активное и реактивное сопротивления зеркала при отсутствии излучателя (обычно  $r_A = r_3$ );  $r_{A3}, x_{A3}$  — сопротивления излучателя при наличии зеркала;  $r_{3A}, x_{3A}$  — сопротивления зеркала при наличии излучателя;  $z_{12} = R_{12} + jx_{12}$  — сопротивление связи между излучателем и зеркалом,  $a, \psi$  — модуль и фаза соотношения токов в зеркале и антенне.

При пассивном зеркале

$$\left. \begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{R_{12}^2 + x_{12}^2}{r_3^2 + x_3^2}}, \\ \psi &= 180 + \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} - \arctg \frac{x_3}{r_3}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Из (2)–(5) следует, что любое изменение соотношения токов (1) по модулю или по фазе вызывает изменение сопротивлений излучателя и рефлектора. Это предопределяет трудности

За последние 15 лет получило значительное распространение односторонне-направленное вещание на волнах короче 600 м. В довоенные годы были поставлены опыты односторонне-направленного вещания на волнах длиннее, чем 1500 м. Результаты этих опытов описываются в данной статье.

настройки антенны с активным зеркалом: а) затруднен выбор элементов настройки, так как по максимуму тока нельзя судить о характере

настройки; б) весьма сложна настройка фидера на бегущую волну; в) затруднен подбор связей фидеров с генератором; г) из-за больших расстояний между антенной и зеркалом трудно контролировать фазовые соотношения между их токами и пр.

Применительно к средним волнам наиболее рациональная методика настройки антенны предложена Брауном [Л. 3.]. Эта методика, основанная на предварительных измерениях и расчетах, может быть сведена к следующим операциям.

1. Определяется сопротивление связи между излучателем и рефлектором. Для этого измеряются  $r_A, x_A$  (при отключенном зеркале) и соответственно  $r_3, x_3$ ; далее  $r_{A3}, x_{A3}$  — при пассивном зеркале, подстроенном в резонанс ( $x_3 = 0$ ) по максимуму тока в нем. Тогда из уравнений (2), (5) и (6) следует:

$$r_{A3} = r_A - \frac{|z_{12}|^2}{r_3} \cos 2 \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}}, \quad (7)$$

$$x_{A3} = x_A - \frac{|z_{12}|^2}{r_3} \sin 2 \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}}. \quad (7')$$

Совместное решение уравнений (7) и (7') позволяет определить сопротивление связи

$$z_{12} = \sqrt{r_3 \left[ (r_{A3} - r_A)^2 + (x_{A3} - x_A)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$\psi = \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} = \frac{1}{2} \frac{x_{A3} - x_A}{r_{A3} - r_A}, \quad (9)$$

$$R_{12} = |z_{12}| \cos \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} = |z_{12}| \cos \psi; \quad (10)$$

$$x_{12} = |z_{12}| \sin \psi. \quad (11)$$

Уравнение (9) определяет два значения угла  $\psi$ , отличающиеся на  $180^\circ$ . Поэтому величина угла устанавливается из (7) и (7'), учитывая, что если  $r_{A3} > r_A$ , то

$$\cos 2 \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} < 0,$$

если же  $r_{A3} < r_A$ , то

$$\cos 2 \operatorname{arctg} \frac{x_{12}}{R_{12}} > 0.$$

Когда одна из разностей  $x_{A3} - x_A$  или  $r_{A3} - r_A$  очень мала и вычисления (8) и (9) не будут достаточно точными, можно пассивное зеркало расстроить, придав ему некоторое известное реактивное сопротивление  $x_3$ , после чего повторно измеряют  $r_{A3}$  и  $x_{A3}$ . В этом случае сопротивление связи определяется формулами:

$$z_{13} = \sqrt[4]{r_3^2 + x_3^2} \cdot \sqrt[4]{(r_{A3} - r_A)^2 + (x_{A3} - x_A)^2}, \quad (8')$$

$$\operatorname{arctg} \frac{x_{12}}{R_{12}} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3} + \frac{1}{2} \frac{x_{A3} - x_A}{r_{A3} - r_A}. \quad (9')$$

2. На основании измерений сопротивлений связи рассчитываются ожидаемые активные и реактивные сопротивления излучателя и зеркала при желательных соотношениях токов, после чего фидеры питания нагружаются эквивалентами полных сопротивлений излучателя и зеркала при отключенной антенне и настраиваются на бегущую волну.

3. Если разность электрических длин фидеров питания не обеспечивает желательной разности фаз токов излучателей, то электрическая длина одного из фидеров изменяется введением в него Т- или П-образного удлинительного звена. После этого можно прислушаться к нормальной работе с извештой уверенностью, что получившаяся настройка обеспечит требуемое соотношение токов, а следовательно, и желательную полярную диаграмму излучения.

Очевидно, что подобная настройка весьма сложна в эксплуатации, затрудняет переход с волны на волну, а также реверсивные излучения, если оно требуется.

Несравненно проще настройка при пассивном зеркале. Если расстояние между излучателем и зеркалом составляет 0,2—0,3 волны, соотношение токов  $\alpha > 0,6$ ; если зеркало настроено в резонанс или ему придана некоторая индуктивная реакция (соответствующая, например, минимуму излучения назад), то можно быть уверенным, что односторонняя полярная диаграмма и увеличение коэффициента направленности системы приблизительно в два раза будут обеспечены. Очевидно, реверсирование излучения тут также не представляет затруднений.

Основным условием получения хорошей направленности при пассивном зеркале является достаточно высокий его к. п. д., что не всегда имеет место на длинных волнах.

Распространяя на низкие антенны доказанную для диполей еще Абрагамом пропорциональную зависимость между сопротивлениями связи и излучения отдельного излучателя  $r_{\Sigma 1}$ , имеем:

$$R_{13} = M r_{\Sigma 1}, \quad (12)$$

$$x_{12} = N r_{\Sigma 1}. \quad (12')$$

Предполагая, что зеркало и излучатель выполнены одинаково, к. п. д. зеркала будет:

$$\eta_3 = \frac{r_{\Sigma 1}}{r_3}. \quad (13)$$

Согласно (6),

$$\alpha = \frac{\sqrt{M^2 + N^2} \cdot r_{\Sigma 1}}{\sqrt{r_3^2 + x_3^2}} = \sqrt{M^2 + N^2} \cdot \eta_3 \cos \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3} = \alpha_m \cos \frac{x_3}{r_3}, \quad (14)$$

$$\psi = 180^\circ + \operatorname{arctg} \frac{N}{M} - \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3} = \psi_m - \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3}. \quad (15)$$

Соответственно

$$r_{A3} = \left[ 1 - \alpha_m \cos \left( 2 \operatorname{arctg} \frac{x_{12}}{R_{12}} - \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3} \right) \right] r_A, \quad (16)$$

$$x_{A3} = x_A - r_A \alpha_m \sin \left( 2 \operatorname{arctg} \frac{x_{12}}{R_{12}} - \operatorname{arctg} \frac{x_3}{r_3} \right). \quad (17)$$

Здесь  $\alpha_m$ ,  $\psi_m$  — модуль и фаза соотношения токов при настройке зеркала в резонанс.

Из (14) следует, что ток в зеркале пропорционален к. п. д., и, следовательно, для получения хорошей направленности к. п. д. должен быть достаточно высок. Вторым существенным требованием к зеркалу является достаточно высокий декремент затухания для обеспечения удовлетворительного прохождения частот в пространстве.

Из уравнений (14)—(17) следует, что прохождение боковых частот получается асимметричным, так как полное сопротивление зеркала значительно и асимметрично изменяется в пределах пропускаемой полосы. Асимметричность частотной характеристики усугубляется в различных направлениях пространства, поскольку в результате изменения соотношения токов по модулю и по фазе деформируются полярные диаграммы для различных боковых частот. Например, зеркало настроено в резонанс, и следовательно,  $x_3$  для нижней боковой полосы имеет емкостный, а для верхней — индуктивный характер; так как сдвиги фаз  $\psi$  для первой приближаются к  $180^\circ$ , то полярные диаграммы нижней боковой полосы из односторонних преобразуются в двусторонние [Л. 2]. Эти недостатки выражены в тем большей степени, чем меньше декремент антенны. Расчеты показали, что на самых длинных волнах радиовещательного диапазона у нормальных Т-образных антенн, подвешенных на 220-м мачтах, они выражены весьма резко.

В 1930 г. нами была исследована антенна типа Александерсона, составленная из трех Т-образных секций и позволившая хорошо разрешить основные проблемы построения сетей для вещания на длинных волнах, а именно — увеличение к. п. д. и декремента затухания и облегчение изоляции при большой мощности [Л. 1].

Относительно большой разнос между сниже-

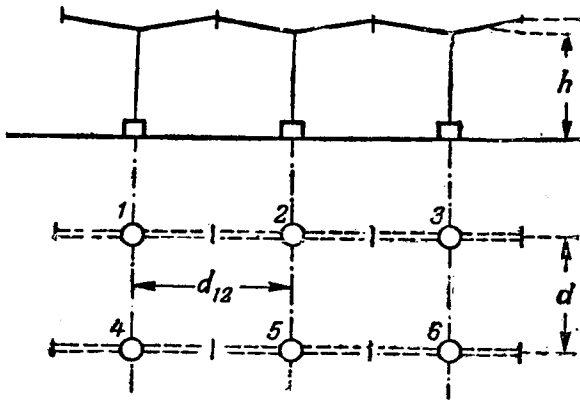


Рис. 1.

ниями позволил, кроме того, придать полярной диаграмме излучения антенны приближенно эллиптическую форму, которая лучше соответствовала территории, обслуживаемой вещанием.

Было решено применить две аналогичные системы для получения односторонне направленного излучения. В зависимости от направления излучения одна из сетей служила излучателем, а другая пассивным зеркалом (рис. 1). Ниже приводятся расчеты и результаты экспериментальной проверки такой системы.

**Результаты расчетов и экспериментального исследования.** Относительная высота каждого снижения

$$\frac{h}{\lambda} = 0,1.$$

Относительное расстояние между снижениями одной сети

$$\frac{d_{12}}{\lambda} = 0,173.$$

Относительное расстояние между полотнами сетей

$$\frac{d}{\lambda} = 0,23.$$

Для предварительных расчетов направленности системы при пассивном зеркале необходимо было определить к. п. д. отдельной сети, который обычно не поддается точному расчету. С этой целью были рассчитаны сопротивления излучения одной Т-образной секции по формуле Ван-дер-Поля и полной синфазной антенны, отнесенной к току одного снижения, причем сопротивления связи между снижениями здесь и в дальнейших расчетах определялись по формулам Бехмана<sup>1</sup>.

Однако, экспериментальное измеренное полное сопротивление как синфазной антенны, так и ее отдельной Т-образной секции оказалось гораздо меньше расчетного сопротивления излучения, а это дало основание предполагать, что к. п. д. вследствие несовершенства заземления ниже ожидаемого. Результаты расчетов и измерений приведены в табл. 1.

<sup>1</sup> Независимо от Бехмана эти формулы получены для активной части [Л. 4] М. И. Канторовичем, а для реактивной части Г. С. Раммом, исходя из более общих положений.

Таблица 1

	Сопротивление излучения (по расчету), $\Omega$	Полное сопротивление (по измерению), $\Omega$
Т-образная антенна (одна секция) . . . . .	$r'_{\epsilon 1} = 14,0$	$r_{a1} = 13,5$
Полная сеть из трех Т-образных секций . . . . .	$r'_{\epsilon A} = 95,0$	$r_{aA} = 68,5$

Сравнение экспериментальных данных позволило рассчитать к. п. д. сетей, причем было предположено, что сопротивление связи между секциями пропорционально сопротивлению излучения, причем коэффициент пропорциональности был определен из расчетных данных (полные сопротивления каждой одиночной секции согласно измерениям получились одинаковыми).

Сопротивление одиночной Т-образной антенны

$$r_{A1} = r_{\Sigma 1} + r_{\Omega 1}. \quad (18)$$

Сопротивление антенны из трех Т-образных секций, отнесенных к одному снижению [Л. 1]:

$$r_{aA} = 3r_{A1} + (4M_{12} + 2M_{13})r_{\Sigma 1}. \quad (19)$$

Здесь  $M_{12} = \frac{R_{12}}{r_{\Sigma 1}}$  — коэффициент пропорциональности активного сопротивления связи между первым и вторым снижением;  $M_{13}$  — коэффициент пропорциональности активного сопротивления связи между первым и третьим снижением.

$$\text{Для } \frac{d_{12}}{\lambda} = 0,172 \text{ и } \frac{d_{13}}{\lambda} = 2 \frac{d_{12}}{\lambda} = 0,344$$

$$M_{12} = 0,785 \text{ и } M_{13} = 0,32.$$

Совместное решение (18) и (19) позволяет определить сопротивление излучения одной Т-образной секции:

$$r_{\Sigma 1} = \frac{r_{aA} - 3r_{A1}}{4M_{12} + 2M_{13}} = \frac{68,5 - 3 \cdot 13,5}{4 \cdot 0,785 + 2 \cdot 0,32} = 7,4 \Omega. \quad (20)$$

Следовательно, к. п. д. одиночной Т-образной антенны

$$\eta_{a1} = \frac{r_{\Sigma 1}}{r_{a1}} = \frac{7,4}{13,5} = 0,55.$$

Сопротивление излучения синфазной антенны

$$r_{\Sigma A} = \frac{r_{\Sigma 1}}{r'_{\Sigma 1}} r'_{\Sigma A} = \frac{7,4}{14,0} \cdot 95 = 50,3 \Omega. \quad (21)$$

Коэффициент полезного действия синфазной антенны

$$\eta_{aA} = \frac{r_{\Sigma A}}{r_{aA}} = \frac{50,3}{68,5} = 0,74.$$

Действительные сопротивления связи между излучателем и рефлектором определялись тем же методом; предварительно из расчетных данных определялись коэффициенты пропорциональности для активной и реактивной составляющих сопротивлений связи между отдельными снижениями излучателя и рефлектора, приведенные в табл. 2. Полученные значения умножались на величину, рассчитанную по (20).

Таблица 2

Расстояние между снижениями	M	N
$d = d_{14}$	$M_{14} = 0,605$	$N_{14} = -0,503$
$d_{15}$	$M_{15} = 0,440$	$N_{15} = -0,563$
$d_{16}$	$M_{16} = 0,0216$	$N_{16} = -0,548$

Сопротивление связи между излучателем и рефлектором, состоящим из одиночных Т-образных антенн,

$$R_{12} = M_{14} r_{\Sigma 1} = 0,005 \cdot 7,4 = 4,5 \Omega,$$

$$x_{12} N_{14} r_{\Sigma 1} = -0,506 \cdot 7,4 = -3,74 \Omega.$$

Сопротивление связи между синфазными антеннами, состоящими из трех Т-образных секций,

$$R_{12} = (3M_{14} + 4M_{15} + 2M_{16}) r_{\Sigma 1} = 28,2 \Omega, \quad (22)$$

$$x_{12} = (3N_{14} + 4N_{15} + 2N_{16}) r_{\Sigma 1} = -38,2 \Omega. \quad (23)$$

Было решено настраивать зеркало в резонанс. Тогда соотношение токов зеркала и излучателя при одиночных Т-образных антеннах согласно уравнению (14) будет:

$$\alpha_{1m} = \eta_{a1} \sqrt{M_{14}^2 + N_{14}^2} = 0,43.$$

Соотношение токов зеркала и излучателя при синфазной антенне:

$$\alpha_m = \frac{\sqrt{R_{12}^2 + x_{12}^2}}{r_a} = \frac{\sqrt{28,2^2 + 38,2^2}}{68,5} = 0,7.$$

Угол сдвига между токами в зеркале и излучателе при настройке зеркала в резонанс

$$\psi_m = 180^\circ + \arctg \frac{x_{12}}{R_{12}} = 180^\circ - 54^\circ = 126^\circ.$$

Сопротивление антенны при зеркале, настроенном в резонанс,

$$r_{a3} = r_{a3} \left[ 1 + \alpha_m^2 \cos 2 \arctg \frac{x_{12}}{R_{22}} \right] = 79 \Omega.$$

Полярная диаграмма поля синфазной антенны без зеркала, рассчитанная по формуле

$$\Phi_1 = 1 + 2 \cos \left( \frac{2\pi d_{12}}{\lambda} \cdot \sin \varphi \right), \quad (24)$$

приведена в относительном масштабе на рис. 2 (кривая B). Полная диаграмма излучения синфазной антенны с зеркалом, рассчитанная по формуле

$$\Phi_1 \Phi_2 = \left[ 1 + 2 \cos \left( \frac{2\pi d_{12}}{\lambda} \sin \varphi \right) \right] \times \sqrt{1 + \alpha_m^2 + 2\alpha_m \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \varphi + \psi_m \right)}, \quad (25)$$

приведена в соответствующем масштабе на рис. 2 (кривая C). Коэффициент направленности (выигрыш мощности) антенн по отношению к одиночной Т-образной антенне ( $\varphi = 180^\circ$ ): для отдельной антенны без зеркала ( $\Phi_1 = 3$ )

$$\frac{P_A}{P_1} = \frac{r_{a1}}{r_A} \cdot \Phi_1^2 = \frac{13,5}{68,5} 3^2 = 1,77. \quad (26)$$

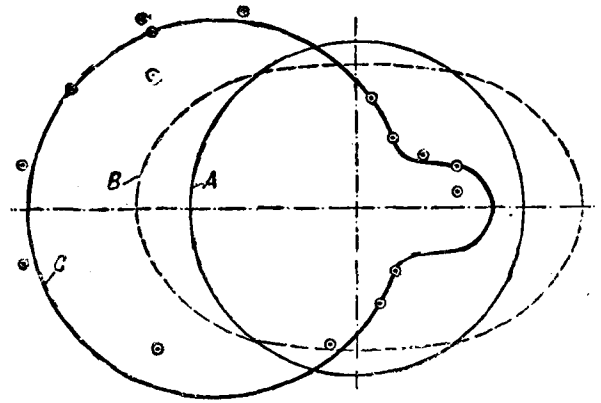


Рис. 2.

Для антенны с пассивным зеркалом ( $\Gamma_2 = 1,63$ )

$$\frac{P_{A3}}{P_1} = \frac{r_{a1}}{r_{A3}} \Phi_1^2 \Phi_2^2 = \frac{13,5}{79,0} \cdot 3^2 \cdot 1,63^2 = 4,1. \quad (27)$$

Для сравнения на рис. 2 построена круговая диаграмма одиночной антенны (кривая A).

Экспериментальная проверка подтвердила достаточную точность расчета (табл. 3).

Таблица 3

	Данные расчета	Данные измерения
$\alpha_{im}$	0,43	0,4
$\alpha_{Am}$	0,7	0,73
$r_{A3}$ в $\Omega$	79,0	82,0

Характерно резкое возрастание соотношения токов при переходе от Т-образной антенны к синфазной антенне, что подтверждает значительное увеличение к. п. д. последней.

Результаты экспериментально снятой полярной диаграммы излучения нанесены на рис. 2 (кружки). Как видно, они также хорошо совпадают с расчетом. В главном направлении была измерена частотная характеристика станции, которая получилась вполне удовлетворительной.

Настоящий опыт убеждает в целесообразности применения односторонне-направленного вещания на волнах длиннее 1500 м при вышеописанной системе антенн.

### Литература

1. А. Л. Минц, З. И. Модель, М. И. Канторович, С. В. Персон. Антенна 500-киловаттной радиостанции. Техника радио и слабого тока, № 5-6, 1932.
2. З. И. Модель, С. В. Персон. Направленные антенны для радиовещания. Радиотехника, № 3, 1937.
3. H. Brown. Directional antennas, PIRE, № 1, 1937.
4. Г. С. Рамм. Расчет токов и напряжений в сложных длинноволновых антеннах. Известия электропромышленности слабого тока, № 10, 1935.



# Компенсация погрешностей трансформаторов тока подмагничиванием сердечника полем рассеяния

Доктор техн. наук, проф. Г. Н. ПЕТРОВ и инж. С. С. ОКУНЬ

Московский энергетический институт им. Молотва

Разработанный в предвоенные годы метод компенсации погрешностей подмагничиванием сердечника полем рассеяния<sup>1</sup> был использован<sup>2</sup> в катушечном трансформаторе тока типа „О“ класса точности 0,5 на номинальное напряжение 500 V. Сердечник 4 (рис. 1) этого трансформатора тока собирается из Г-образных пластин трансформаторной стали. Вторичная обмотка состоит из двух последовательно соединенных катушек 2 и 3, расположенных на верхнем и нижнем стержнях. Первичная обмотка состоит из одной катушки, расположенной на верхнем стержне. Между первичной катушкой и нижней вторичной катушкой вставляется магнитный шунт 5, представляющий собой пакет прямоугольных пластин из той же листовой стали.

**Магнитное поле трансформатора.** Для выяснения сущности компенсации обратимся к рис. 1, где схематически показано распределение намагничивающих сил обмоток и создаваемого ими магнитного поля трансформатора. При нагрузке трансформатора током  $I_2$  этот ток создает на нижнем стержне намагничивающую силу  $I_2 W_3$ , где  $W_3$  — часть вторичных витков, расположенных на нижнем стержне.

На верхнем стержне намагничивающая сила создается совместно вторичной и первичной обмотками. Намагничивающая сила вторичной обмотки верхнего стержня равна  $I_2 W_2$ , где  $W_2$  — часть вторичных витков, расположенных на верхнем стержне.

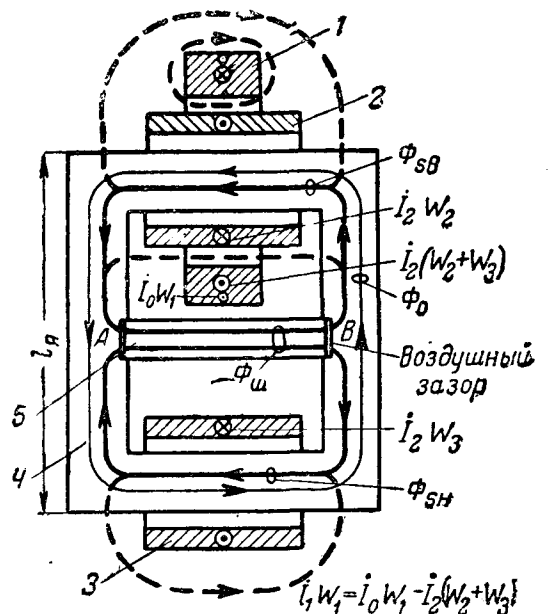
Для более удобного анализа магнитного поля разложим намагничивающую силу первичной обмотки  $I_1 W_1$  на две составляющие. Первая из них, равная  $-I_2 (W_2 + W_3)$ , компенсирует ампер-

В измерительных трансформаторах тока для уменьшения погрешностей и получения небольшого веса применяются различные методы компенсации погрешностей, разработанные рядом иностранных фирм. В СССР в 1939 г. был предложен и получил применение метод компенсации погрешностей подмагничиванием сердечника полем рассеяния. В статье дан анализ этого метода, позволяющего по сравнению с ранее известными методами компенсации получить более точные и легкие аппараты.

витки вторичной обмотки, вторая, равная  $I_0 W_1$ , создает так называемое основное магнитное поле.

Поле, создаваемое совместным действием намагничивающей силы вторичной обмотки  $I_2 W_2 + I_2 W_3$  и равной ей составляющей

намагничивающей силы первичной обмотки  $-I_2 (W_2 + W_3)$ , можно рассматривать как поле рассеяния. Индукционные линии этого поля проходят, главным образом, через магнитный шунт и сердечник, как это видно из рис. 1.



- Поле рассеяния в шунте, создаваемое в верхнем стержне ампер-витками  $I_2 W_2 - I_2 (W_2 + W_3) = -I_2 W_3$ , в нижнем стержне — ампер-витками  $I_2 W_3$
- Поле рассеяния в воздухе
- Основное магнитное поле, создаваемое ампер-витками  $I_0 W_1$ .

Рис. 1.

<sup>1</sup> Реестр изобретений СССР. Окунь С. С. Авторское свидетельство № 51661.

<sup>2</sup> Трансформаторы тока типа „О“ выпускались Люберецким комбинатом НКВД.

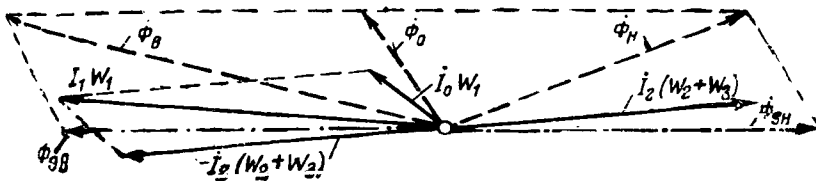


Рис. 2.

Наличие магнитного шунта и раздельное расположение вторичной обмотки на обоих стержнях приводят к значительному насыщению магнитной системы всего трансформатора полем рассеяния. Это насыщение может значительно превосходить то, которое получается под действием основного поля<sup>3</sup>, создаваемого намагничивающей силой  $I_0W_1$ . Повышенное насыщение магнитной системы трансформатора увеличивает магнитную проницаемость, так как работа трансформатора протекает на восходящей части кривой зависимости  $\mu = f(H)$ .

**Векторная диаграмма ампервитков и магнитных потоков.** Вектор намагничивающей силы вторичной обмотки  $I_2(W_2 + W_3)$  находится в противофазе с вектором  $-I_2(W_2 + W_3)$  — составляющей вектора намагничивающей силы первичной обмотки, равного  $I_1W_1 = I_0W_1 - I_2(W_2 + W_3)$ . Вектор потока рассеяния  $\Phi_{sn}$  в нижнем стержне несколько отстает по фазе от вектора  $I_2W_3$  [или от вектора  $I_2(W_2 + W_3)$ ]. Сдвиг по фазе между этими векторами невелик и обусловлен потерями в стали (рис. 2). Аналогично вектор потока  $\Phi_{sb}$  в верхнем стержне будет отставать практически на тот же угол от вектора  $-I_2W_3$  [или от вектора  $-I_2(W_2 + W_3)$ ], так как в верхнем окне сердечника поле рассеяния создается намагничивающей силой

$$I_2W_2 - I_2(W_2 + W_3) = -I_2W_3.$$

Результирующие потоки в верхнем и нижнем стержнях могут быть найдены из векторной диаграммы, если геометрически сложить вектора  $\Phi_{sb}$  и  $\Phi_{sn}$  с вектором основного потока  $\Phi_0$ , сдвинутым на некоторый угол от вектора  $I_0W_1$ . Таким образом вектор результирующего потока в верхнем стержне будет равен  $\Phi_B = \Phi_{sb} + \Phi_0$ , аналогично в нижнем стержне

$$\Phi_n = \Phi_{sn} + \Phi_0.$$

**Векторная диаграмма э. д. с.** Электродвижущая сила  $E_{sn}$ , наводимая потоком рассеяния нижнего стержня, сдвинута относительно вектора  $\Phi_{sn}$  на угол  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 3) и равна:

$$E_{sn} = 4,44 \cdot f \Phi_{sn} W_3 \cdot 10^{-8} \text{ [V]}. \quad (1)$$

Аналогично, э. д. с.  $E_{sb}$ , наводимая потоком

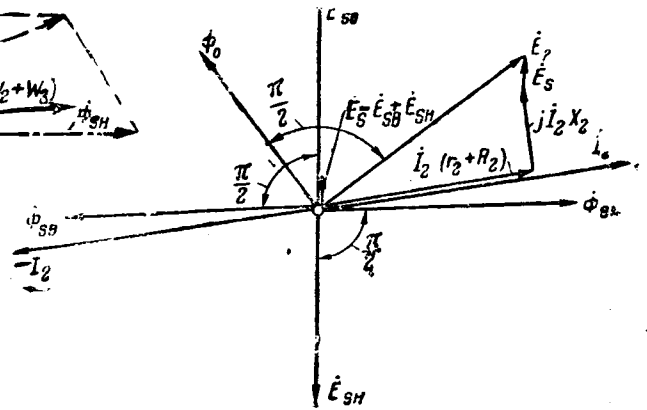


Рис. 3.

рассеяния верхнего стержня, сдвинута относительно вектора  $\Phi_{sb}$ , на угол  $\frac{\pi}{2}$  и равна

$$E_{sb} = 4,44 f \Phi_{sb} W_2 \cdot 10^{-8} \text{ [V]}. \quad (2)$$

Как видно из векторной диаграммы, э. д. с.  $E_{sn}$  и  $E_{sb}$  практически находятся в противофазе и, следовательно, результирующая э. д. с. рассеяния вторичной обмотки, равная геометрической сумме  $E_{sn} + E_{sb} = E_s$ , в то же время равна их арифметической разности  $E_{sb} - E_{sn} + E_s$ .

Суммарная э. д. с.  $E_2$ , действующая во вторичной цепи трансформатора тока, может быть представлена в виде суммы:

$$E_2 = I_2(r_2 + R_2) + jI_2X_2 + E_s, \quad (3)$$

где  $r_2$  — активное сопротивление всей вторичной обмотки,  $R_2 + jX_2$  — полное сопротивление внешней цепи.

Следует отметить, что в общем случае э. д. с.  $E_s$  не будет находиться в квадратуре с током  $I_2$ , поскольку вектор потоков рассеяния сдвинут по фазе относительно вектора тока  $I_2$ . Поэтому э. д. с.  $E_s$  рассматривается нами отдельно от члена  $jI_2X_2$ . Векторная диаграмма э. д. с. позволяет найти вектор  $\Phi_0$  обычным способом:

$$\Phi_0 = j \frac{E_2 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f (W_2 + W_3) \mu}. \quad (4)$$

**Определение намагничивающих ампервитков  $AW_0$ .** Для определения численного значения и фазы намагничивающих ампервитков обратимся к расчету магнитной цепи трансформатора. Разобьем магнитную цепь на две части — верхнюю и нижнюю, граница между которыми определяется магнитным шунтом (точки A и B рис. 1). Как и в любом трансформаторе, полные намагничивающие ампервитки  $AW_0$  должны быть равны геометрической сумме ампервитков отдельных последовательно расположенных участков магнитной цепи. В рассматриваемом случае мы можем написать:

$$AW_0 = AW_n + AW_B. \quad (5)$$

<sup>3</sup> Индукционные линии поля, создаваемого токсом  $I_0$ , практически не проходят по шунту, ввиду относительно большого магнитного сопротивления воздушных зазоров.

Как видно из рис. 4, ампервитки

$$A\dot{W}_H = A\dot{W}_{Ha} + A\dot{W}_{Hr}. \quad (6)$$

Каждая из слагаемых — активная  $A\dot{W}_{Ha}$  и реактивная  $A\dot{W}_{Hr}$  — определяется обычным путем, по индукции в отдельных участках нижней части сердечника.

Аналогичным путем находятся ампервитки верхней части сердечника:

$$A\dot{W}_B = A\dot{W}_{Ba} + A\dot{W}_{Br}. \quad (7)$$

Так как направление намагничивания полем рассеяния в верхней и нижней частях сердечника получается различным (рис. 2), то при соответствующем подборе параметров ампервитки  $A\dot{W}_H$  и  $A\dot{W}_B$  могут быть получены приблизительно равными друг другу и сдвинутыми между собой на угол, близкий к  $180^\circ$ . Это дает возможность получения достаточно малого значения ампервитков  $A\dot{W}_0$ , что, как известно из теории трансформаторов тока, понижает их погрешность.

Возможность изменения ампервитков  $A\dot{W}_0$  при данном значении тока  $I_2$  путем соответствующего подбора магнитных параметров шунта и одновременного изменения э. д. с. рассеяния  $E_s$  (путем подбора, в свою очередь, отношения  $E_{sH}/E_{sB}$ ) является основной особенностью рассматриваемого метода компенсации. Эта возможность позволяет легче, чем в других методах компенсации, менять характеристики трансформатора и получать более благоприятный характер кривых погрешностей в широком диапазоне изменений вторичного тока  $I_2$ .

**Определение погрешностей.** Обозначим ампервитки, создающие поле рассеяния, через  $A\dot{W}_s = \sqrt{2} I_2 W_3$ , которые определяются по заданному значению тока  $I_2$  и числу витков, намотанных на нижнем стержне. По ампервиткам  $A\dot{W}_s$  могут быть найдены потоки  $\Phi_{sH}$  и  $\Phi_{sB}$ . Для этого необходимо произвести расчет магнитной цепи поля рассеяния трансформатора или иметь опытные данные о зависимости  $\Phi_{sH}$  и  $\Phi_{sB}$  от  $A\dot{W}_s$ .

Наличие воздушных зазоров у магнитного шунта приводит к тому, что между векторами  $\Phi_{sH}$ ,  $\Phi_{sB}$  и  $I_2$ , ( $-I_2$ ) сдвиг фаз получается весьма малым и потому в дальнейшем мы будем эти вектора считать совпадающими по фазе.

По найденным значениям  $\Phi_{sH}$  и  $\Phi_{sB}$  находим результирующие э. д. с. рассеяния вторичной обмотки:

$$E_s = 4,44 f (W_2 \Phi_{sB} - W_3 \Phi_{sH}) \cdot 10^{-8} \text{ [V]}. \quad (8)$$

При  $W_2 \Phi_{sB} > W_3 \Phi_{sH}$  э. д. с.  $E_s$  опережает ток  $I_2$  на угол  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 3), при  $W_2 \Phi_{sB} < W_3 \Phi_{sH}$  соответственно отстает на тот же угол.

Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки определяется из равенства:

$$x_2 = \frac{E_s}{I_2}. \quad (9)$$

Согласно (3) находим:

$$\dot{E}_2 = [(r_2 + R_2) + j(x_2 + X_2)] I_2 \quad (10)$$

и по формуле (4) определяем значение  $\Phi_0$ .

В основу дальнейшего расчета положим векторную диаграмму, приведенную на рис. 5а.

Из этой диаграммы, проектируя все вектора на две взаимноперпендикулярные оси, находим:

$$\Phi'_0 = \Phi_0 \sin \alpha, \quad (11)$$

$$\Phi''_0 = \Phi_0 \cos \alpha, \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x_2 + X_2}{r_2 + R_2}, \quad (13)$$

где, кроме того, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_e &= \sqrt{(\Phi_{sB} + \Phi'_0)^2 + \Phi''_0{}^2}, \\ \Phi_H &= \sqrt{(\Phi_{sH} - \Phi'_0)^2 + \Phi''_0{}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\sin \beta_e = \frac{\Phi''_0}{\Phi_e}, \quad (15)$$

$$\sin \beta_H = \frac{\Phi''_0}{\Phi_H}. \quad (16)$$

От векторной диаграммы *a* переходим к диаграмме ампервитков *b* рис. 5. Ампервитки  $A\dot{W}_H$  и  $A\dot{W}_B$  определяются соответственно из расчета участков магнитной цепи между точками *A* и *B* (рис. 1) обычным способом по (6) и (7).

Далее находим:

$$\sin \gamma_H = \frac{A\dot{W}_{Ha}}{A\dot{W}_H}, \quad (17)$$

$$\sin \gamma_B = \frac{A\dot{W}_{Bb}}{A\dot{W}_B}. \quad (18)$$

Из рис. 5 имеем:

$$A\dot{W}'_H = A\dot{W}_H \cos(\beta_H + \gamma_H), \quad (19)$$

$$A\dot{W}''_H = A\dot{W}_H \sin(\beta_H + \gamma_H) \quad (20)$$

и

$$A\dot{W}'_B = A\dot{W}_B \cos(\beta_B - \gamma_B), \quad (21)$$

$$A\dot{W}''_B = A\dot{W}_B \sin(\beta_B - \gamma_B), \quad (22)$$

причем при  $\beta_e < \gamma_e$ ,  $A\dot{W}''_e < 0$ .

Поэтому

$$A\dot{W}'_0 = A\dot{W}'_H - A\dot{W}'_B \quad (23)$$

$$A\dot{W}''_0 = A\dot{W}''_H + A\dot{W}''_B. \quad (24)$$

Согласно общей теории трансформаторов тока погрешности определяются из следующих соотношений:

$$\text{токовая погрешность } \Delta k = \frac{A\dot{W}_0}{A\dot{W}_1} 100\%,$$

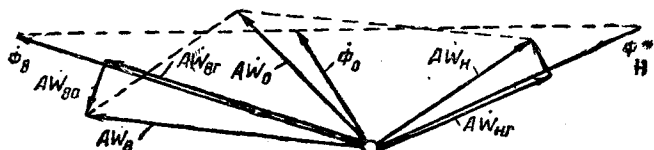


Рис. 4.



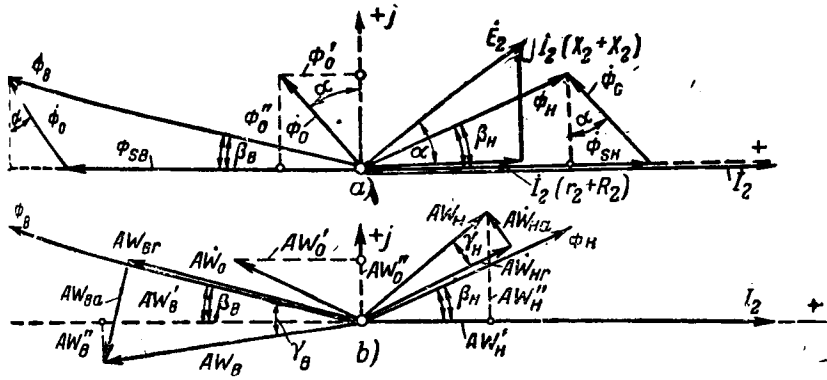


Рис. 5.

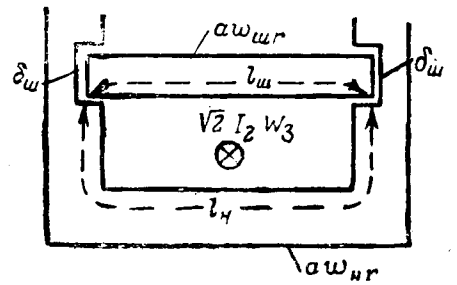


Рис. 6.

угловая погрешность  $\delta' = \frac{AW''_0}{AW_1} \cdot 3440$  [min],

где  $AW_1 = I_1 W_1$ .

**Расчет поля рассеяния.** Как было показано выше, для определения погрешностей трансформатора необходимо иметь зависимость  $\Phi_{SH}$  и  $\Phi_{SB}$  от  $AW_s$ . Эта зависимость может быть найдена расчетным путем или экспериментально из исследований опытных образцов. Точный расчет поля рассеяния представляет большие трудности ввиду весьма сложной его конфигурации. Ниже дается приближенный метод, который может быть положен в основу предварительных расчетов до изготовления опытных образцов.

Как видно из рис. 1, при наличии во вторичных обмотках намагничивающих сил  $I_2 W_3$  и  $I_1 W_2$  и в первичной обмотке намагничивающей силы  $-I_2 (W_2 + W_3)$  часть индукционных линий поля рассеяния проходит по магнитному шунту, другая (меньшая), по воздуху между ярами трансформатора.

Определим число потокоцеплений со вторичными обмотками индукционных линий поля рассеяния. Для этого рассчитаем магнитную цепь трансформатора. Полный ток нижнего окна равен  $\sqrt{2} I_2 W_3$ . Поэтому мы можем написать (рис. 6):

$$\sqrt{2} I_2 W_3 = a w_{ur} l_u + 1,6 \delta_u B_u + a w_{nr} l_n. \quad (25)$$

Правую часть равенства (25) разделим на две части:

$$AW_{ur} = a w_{ur} l_u + 1,6 \delta_u \cdot B_u \quad \text{и} \quad AW'_{cr} = a w_{nr} \cdot l_n,$$

где  $AW_{ur}$  и  $AW'_{cr}$  — амплитудные значения реактивных составляющих ампервитков.

Будем приближенно считать, что среднее магнитное напряжение всех индукционных трубок поля рассеяния, замыкающихся по воздуху между ярами, также равно  $AW_{ur}$ . Тогда магнитный поток рассеяния в воздухе

$$\Phi_{s\theta} = AW_{ur} \lambda_\theta, \quad (26)$$

где  $\lambda_\theta$  — магнитная проводимость. Согласно исследованиям Оллендорфа, приближенно

$$\lambda_\theta = k l_\theta,$$

где  $l_\theta$  — длина яра (рис. 1), а коэффициент<sup>4</sup>

$k \approx 2-2,5$ . Более точно этот коэффициент можно найти для данной конструкции экспериментально.

Задаваясь различными значениями потока в шунте  $\Phi_u$ , строят зависимость  $AW_{ur} = f(\Phi_u)$ . При этом следует иметь в виду, что  $\delta_u$  меняется в зависимости от  $B_u$ . Как показывают проведенные исследования, можно принять для трансформаторов типа "О", что  $\delta_u \approx \delta_0 + k_u B_u$ , где порядок  $k_u \approx 5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{см}}{\text{Г}}$ . Будем в дальнейшем называть  $\delta_u$  приведенным эквивалентным воздушным зазором.

По найденной зависимости  $AW_{ur} = f(\Phi_u)$  и по прямой  $AW'_{ur} = f'(\Phi_{s\theta})$ , получаемой из равенства (26), строим зависимость  $AW_{ur} = f_1(\Phi_u + \Phi_{s\theta})$  (рис. 7). Затем рассчитывается основная магнитная цепь сердечника между точками А и В (рис. 1), отдельно для верхней и нижней частей, поскольку индукции в них обычно различны.

По данным расчета строят (рис. 8) кривые  $AW'_{cr} = \psi(\Phi_{SH})$  и  $AW''_{cr} = \psi_1(\Phi_{SB})$ .

Последовательность расчета потоков рассеяния получается при этом следующая:

1. Задаются индукцией или потоком  $\Phi_{SH}$ , например, в нижнем стержне, и находят по кривой рис. 8  $AW'_{cr}$ .

2. Так как  $AW'_{cr} = AW''_{cr}$ , вследствие параллельного (для поля рассеяния) магнитного соединения стержней, то по полученному значению  $AW'_{cr}$  находят по кривой  $AW''_{cr} = \psi_1(\Phi_{SB})$  поток  $\Phi_{SB}$ , соответствующий заданному потоку  $\Phi_{SH}$ , и затем суммарный поток

$$\Phi_{SH} + \Phi_{SB} = \Phi_u + \Phi_{s\theta}.$$

3. По кривой  $AW_{ur} = f(\Phi_u + \Phi_{s\theta})$  (рис. 7) находят  $AW_{ur}$ , а следовательно, и  $\Phi_u$  и  $\Phi_{s\theta}$ , по двум другим кривым (рис. 7).

4. Находят  $AW_s = AW_{ur} + AW'_{cr}$  для заданного значения потока  $\Phi_{SH}$ .

5. Повторяя подобные расчеты для разных значений  $\Phi_{SH}$ , строят зависимость  $\Phi_{SH} = \psi_n(AW_s)$  и  $\Phi_{s\theta} = \psi_\theta(AW_s)$  и по ним находят искомые потоки  $\Phi_{SH}$  и  $\Phi_{s\theta}$  для различных значений  $AW_s$ .

<sup>4</sup> Рихтер. Электрические машины, т. III, стр. 41—42

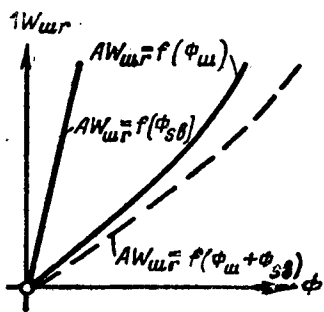


Рис. 7.

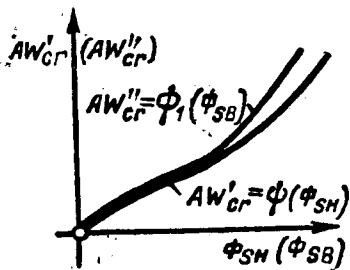


Рис. 8.

**Параметры компенсации.** Трансформаторы тока с компенсацией по рассматриваемому методу имеют следующие конструктивные параметры компенсации: 1) сечение магнитного шунта; 2) воздушный зазор между магнитным шунтом и сердечником, который легко может изменяться, например, путем изменения площади соприкосновения шунта и сердечника; 3) место расположения магнитного шунта между стержнями, влияющее на распределение (отношение) магнитных потоков  $\Phi_{сн}$  и  $\Phi_{сб}$ ; 4) отношение чисел витков  $W_2/W_3$ , определяющее ампервитки  $AW_3$ , создающие поле рассеяния, и влияющее на результирующую э. д. с. вторичной обмотки и на значение  $X_2$ ; 5) геометрические размеры сердечника и ярем, определяющие значение магнитного потока  $\Phi_{сб}$ .

Эти параметры дают возможность в широких пределах изменять характеристики погрешностей и, таким образом, устанавливать оптимальные условия для компенсации. Для примера укажем, что изменением только одного из параметров — воздушного зазора магнитного шунта — оказалось возможным изменять погрешности, как это показано на рис. 9, для четырех случаев последовательного уменьшения воздушного зазора.

**Эффективность компенсации.** Для оценки эффективности компенсации необходимо сравнить затраты материалов и получаемую точность трансформаторов тока.

Компенсация погрешностей подмагничиванием сердечника полем рассеяния была применена в катушечном низковольтном трансформаторе тока типа<sup>5</sup> „О“, который имел следующие данные: вес трансформаторной стали марки ЕС4А 1,4 кг; вес меди обмоток от 0,7 до 0,75 кг; общий вес трансформатора около 2,6 кг; класс точности 0,5; номинальное напряжение 500 В; номинальная вторичная нагрузка 0,2  $\Omega$ .

Сравнением весовых показателей установлено, что трансформатор тока типа „О“ весит меньше аналогичных заграничных трансформаторов с примененными в них другими методами компенсации (например, Вильсона, АЕГ), имея меньшие погрешности. Кривые погрешностей имеют нормальный характер, без перегибов и легко под-

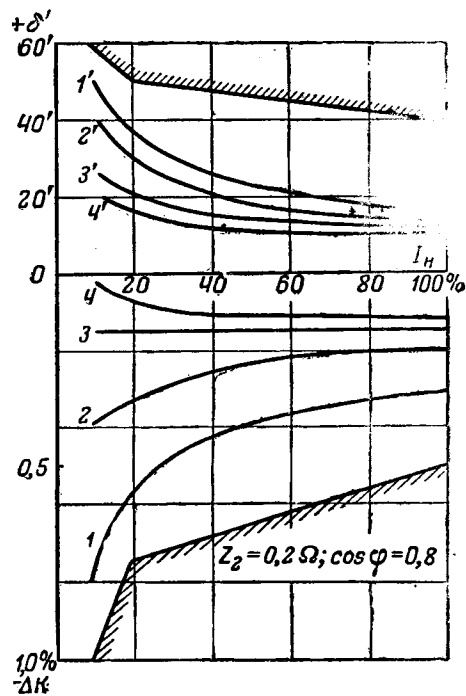


Рис. 9.

даются регулировке различными параметрами компенсации. При указанных весовых показателях возможно получить погрешности в пределах класса точности 0,2 (рис. 9, кривые 4—4'), причем при уменьшении тока  $I_2$  возможно даже уменьшение погрешностей тока.

Целесообразность применения компенсации в значительной мере определяется ее конструктивным выполнением. По своей конструктивной простоте и легкости выполнения компенсация подмагничиванием сердечника полем рассеяния превосходит все известные ранее предложенные методы.

В трансформаторах тока типа „О“ магнитный шунт выполнен из прямоугольных пластин трансформаторной стали, пакет которых вставляется в специальные пазы, выштампованные в сердечнике (рис. 1). Возможны, однако, и другие конструкции магнитного шунта с вынесением его из окна трансформатора наружу.

**Заключение.** Метод компенсации погрешностей трансформаторов тока подмагничиванием сердечника полем рассеяния является более эффективным и конструктивно более простым, чем другие методы компенсации. Дальнейшее исследование этой компенсации и выявление ее оптимальных параметров позволит повысить точность трансформаторов тока и снизить их вес.

Представляется целесообразным применить этот метод компенсации в высоковольтных трансформаторах тока. Возможность получения постоянного значения токовых погрешностей, даже при значениях тока ниже 10%  $I_n$ , делает особо желательным применение этого вида компенсации при изготовлении лабораторных трансформаторов тока высокой точности.

<sup>5</sup> Трансформаторы тока типа „О“ были разработаны в 1938—1939 гг. и являются первым опытом применения рассматриваемой компенсации.



# Закономерности прокалывающего пробоя силовых кабелей

Кандидат техн. наук И. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН

Московский энергетический институт им. Молотова

Механизм пробоя силовых кабелей, изолированных пропитанной бумагой, как известно, зависит от рода тока (постоянный, переменный), а при переменном токе и от длительности экспозиции. Исследованиями показано, что при пробое изоляции силовых кабелей импульсами, (переменным током), при кратковременных экспозициях, а также при постоянном токе, внешние признаки разрушения изоляции одинаковы. Нарушение внутренних связей изоляции при этих разновидностях электрического пробоя происходит под воздействием только сил соответствующего электрического поля и этому типу пробоя присвоено общее наименование прокалывающего (Puncture) или разрушающего (Destructive) пробоя.

Разновидности прокалывающего пробоя силовых кабелей, изолированных пропитанной бумагой, не изучены в достаточной степени. Выявление закономерностей этого вида пробоя имеет теоретическую ценность и большую практическую значимость в настоящее время, особенно в связи с проблемой передачи энергии при постоянном токе.

**Методика исследований.** а) Пробивная прочность кабелей, изолированных пропитанной бумагой, зависит от множества факторов. Поэтому описание явления пробоя и выявление его закономерностей могут быть выполнены надежно лишь на базе массовых наблюдений.

б) Известно, что воздействие электрического поля на диэлектрик обусловлено не только структурой диэлектрика, но и структурой поля. Исследование явлений пробоя в однородном поле позволяет абстрагироваться от всех факторов, связанных с структурой поля, и от вторичных явлений, вносимых при пробое неоднородностью поля. Потребность исследований кабельной изоляции в условиях возможно более однородного электрического поля привела к постановке опытов на отдельных фазах кабеля.

*Выяснение закономерностей и механизма пробоя слоистой изоляции силовых кабелей из пропитанной бумаги при кратковременных экспозициях под напряжением переменного тока и при постоянном токе существенно важно для конструирования и эксплуатации кабелей. Дан анализ экспериментально установленных закономерностей прокалывающего пробоя силовых кабелей с толщиной изоляции 1 мм и кабельных бумаг при переменном и при постоянном токах. На этой основе выявлены новые черты механизма прокалывающего пробоя и механизма рассеивания пробойных напряжений изоляции кабелей. Сделаны практические выводы о роли разных факторов в рассеивании пробойных напряжений изоляции кабелей и методике ее испытаний.*

в) Практикой изучения механизма пробоя, кроме того, установлено, что для выявления внешних признаков пробоя при лабораторных исследованиях особенно ценен метод визуальных наблюдений, нашедший широкое применение и в настоящем исследовании.

Изложенные соображения привели к следующей технике испытаний. Образ-

цы кабелей вскрывались, с них снимались свинцовая оболочка и поясная изоляция, и изолированные жилы разрезались на куски длиной 400—500 мм. Середина этих кусков покрывалась на длине 100 мм смесью графита на глицерине, после чего на покрытую смесь поверхность накладывался крепко стянутый снаружи станиоль. Напряжение прилагалось к токоведущим жилам, а станиолевые оболочки соединялись с землей. Покрытием названной смесью достигалось значительное уменьшение воздушных включений под оболочкой (рис. 1).

Образцы кабелей с обеих сторон станиолевой оболочки подматывались лентами пропитанной бумаги. Испытания таких образцов показали, что около 80% всех наблюдаемых пробоев происходило под станиолевым электродом и около 20% на краю и вне электрода.

Анализ зависимости пробойного напряжения  $U_n$  от величины площади электродов  $S$  (приложение 1) показывает, что при цилиндрических электродах длиной большей чем 100 мм (например, 5—10 м) значения пробойных напряжений и степень рассеивания пробоев получаются меньшими. Поэтому полученными результатами испытаний на пробой конденсаторов длиной 100 мм можно руководствоваться лишь для относительных сопоставлений величин пробивной прочности.

В местах пробоя образцов измерялись—шаг наложения изоляции  $L$ , зазор между лентами  $g$ , перекрытие  $l$  и толщины лент  $t$ ; по этим данным были составлены схемы намотки изоляции

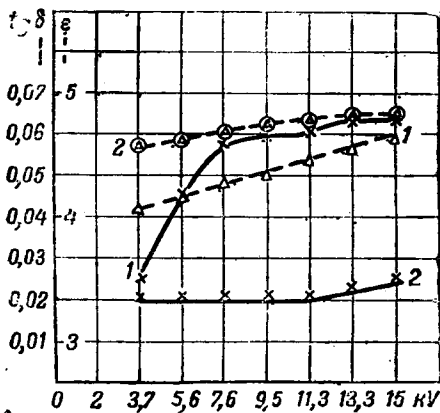


Рис. 1.  $\text{tg } \delta$  и  $\epsilon$  кабеля СБС,  $3 \times 50 \text{ мм}^2$ , 6 кВ.

Кривые 1. Сняты при наложении на жилу станиоловой оболочки длиной 100 мм. обвитой проволокой; кривые 2 — то же, что 1, но с предварительным покрытием жилы смесью графит-глицерина; второй образец (пунктирные кривые) расположен на расстоянии 250 мм от первого, считая вдоль кабеля.

для каждого образца. На эти схемы наносился путь пробоя по результатам измерений отклонений пути пробоя в продольной и поперечной плоскостях. Путем статистической обработки величин  $t$ ,  $l$ ,  $g$  и определения процента перекрытия  $k_i = 100 \frac{l_i}{L_i + g_i}$  устанавливались характеристики равномерности наложения изоляции, которые сопоставлялись с ее пробивной прочностью. Далее, статистическим методом была найдена закономерность попадания пробоя в зазоры между лентами. Бумажные ленты последовательно снимались со всех пробитых образцов и накладывались на лист бумаги, на котором вычерчивалось место пробоя каждой ленты и его относительное расположение от краев ленты по ширине.

Длительность подъема напряжения до про-

боя образцов кабелей составляла в среднем около 10 сек, а бумаги — около 5 сек.

Пробой бумаг осуществлялся между медными, тщательно отшлифованными электродами шар-плоскость. После каждого 50 пробоев электроды тщательно шлифовались в целях удаления небольших ямок и темных пятен копоти от искр, образующихся при пробое.

Анализ погрешности статистических характеристик изоляции образцов кабелей показал, что достаточным является число независимых наблюдений  $n = 100$ . Погрешность определения характеристик при таком числе наблюдений не превышала 5—10% (приложение 2). Свойства отдельных пропитанных бумаг более неравномерны, чем свойства слоистой изоляции кабеля. Поэтому при испытании бумаг было принято число независимых наблюдений  $n = 1000$ .

**Данные опытов.** Результаты опытов пробоя образцов кабелей (на 1 кВ) и бумаг при переменном и при постоянном токах представлены в табл. 1 и 2.

Типовые гистограммы распределения градиентов пробойного напряжения для образцов кабеля при пробое их на переменном и постоянном токах и для пропитанной бумаги при пробое на переменном токе показаны на рис. 2 и 3.

По данным аналогичных гистограмм построены кривые распределения максимальных градиентов пробойных напряжений при переменном и при постоянном токах для кабелей и для бумаг (рис. 4). Эти кривые позволяют сопоставить вероятности пробоя для разных по качеству кабелей и бумаг в различных областях градиентов пробойных напряжений.

По имеющимся экспериментальным данным пробоя кабелей и бумаг построены кривые распределения вероятностей пробоя —  $n = f(\Delta)$ , иллюстрирующие разницу рассеивания пробойной

Таблица 1

Объект испытания	Средняя толщина изоляции образцов, мм	Род испытательного напряжения	Средний градиент напряжения при пробое $G_{\text{ср}}$ , кВ/мм	Стандарт отклонения для величин $G_{\text{ср}}$ $\sigma_g$ , кВ/мм	Коэффициент изменчивости величины $G_{\text{ср}}$ (кВ/мм) $v = \frac{\sigma_g \cdot 100}{G_{\text{ср}}}$ %	Число пробоев по Holmes для 250 м кабеля при $U_n = 3,2 \text{ кВ}$
Кабель $3 \times 16 \text{ мм}^2$ , 1 кВ союзного изготовления март 1944 . . . . .	0,70	Переменно 50 Hz	27,8	10,23	36,8	5,80
		Постоянное	50,7	14,60	25,6	
Кабель $3 \times 6 \text{ мм}^2$ , 1 кВ союзный, август 1944 . . . . .	0,55	Переменно 50 Hz	41,7	8,32	19,8	0,30
		Постоянное	43,3	11,70	26,7	
Кабель $3 \times 6 \text{ мм}^2$ , 1 кВ союзный, март 1944 . . . . .	0,50	Переменное 50 Hz	46,0	12,00	25,1	1,27
Кабель $3 \times 6 \text{ мм}^2$ , 1 кВ, (изготовления фирмы General Cable Corporation, 1943)	0,75	Переменное 50 Hz	41,6	6,60	15,8	0,15
		Постоянное	30,8	11,90	30,0	

Примечания: 1. Температура окружающего воздуха при испытании — 23, 25° С.

2. В таблицу включены выборочные результаты испытаний.

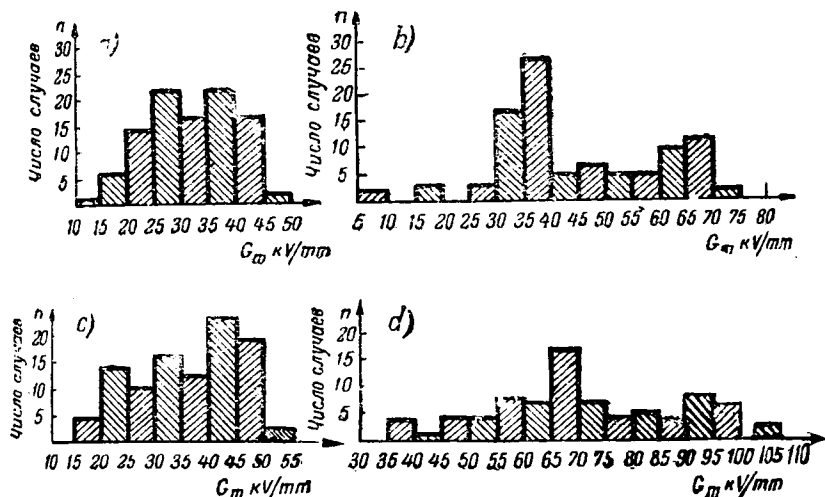


Рис. 2. Гистограммы максимальных пробойных градиентов напряжения для кабелей САД,  $3 \times 10 \text{ mm}^2$ , 1 кВ.

a, b—кабель союзного изготовления при испытании напряжением переменного (a) и постоянного (b) токов; c и d—кабель фирмы General Cable Corporation при испытании напряжением переменного (c) и постоянного (d) токов.

прочности испытанных объектов и показывающие степень соответствия экспериментальных кривых распределения с нормальным законом распределения Гаусса (рис. 5 и 6).

Далее найдено распределение пробоев в зазорах между лентами бумаги в зависимости от их расположения в изоляции кабелей и для разных областей величин градиентов пробойных напряжений при переменном и при постоянном токах (рис. 7, 8).

Оценка относительного расположения места пробоя по ширине бумажной ленты показала, что как при переменном, так и при постоянном токах имеется большое число пробоев на расстоянии около 1 мм от краев лент. Далее произведена оценка роли пробоев в зазорах между последовательными ловивами бумажных лент (рис. 9) и влияния степени равномерности наложения бумажных лент (рис. 10), на наблюдаемые рассеивания пробойных напряжений. Бумажные ленты, снятые с кабелей, экстрагировались и окрашива-

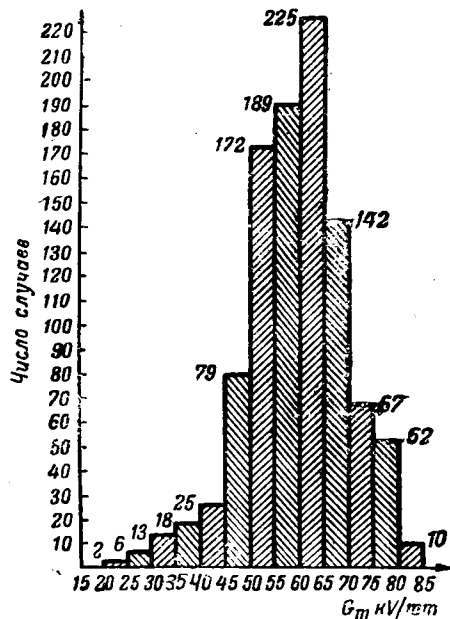


Рис. 3. Гистограмма пробойных градиентов напряжения для пропитанной бумаги кабеля союзного изготовления.

лись бриллиантовой зеленью, после чего они осматривались с целью выявления наличия ветвистых побегов углеродов, воска и его распределения.

Математическая обработка результатов пробоя. Найденные из опытов статистические совокупности обработаны методами математической статистики (приложение 2). Определены средние значения, стандарт и коэффициент изменчивости (табл. 1 и 2) и выявлено соответствие опытных кривых распределения с нормальной кривой распределения Гаусса [см. (8)]. Последнее производилось путем сопоставления частот  $n_x$ , найденных по уравнению нормальной кривой, с частотами  $n'_x$  для кривых, полученных из опытов. Для бумаг отношение  $\frac{n'_x}{n_x} \cdot 100$  оказалось в

Таблица 2

Объект испытания	Ряд испытательного напряжения	Среднее значение толщины бумаги, мм	Средний градиент напряжения при пробое, $G_{cm}$ кВ/мм	Стандартное отклонение для величины $G_{cm}$ (кВ/мм) $\sigma_g$	Коэффициент изменчивости для градиента напряжения $v = \frac{\sigma_g \cdot 100}{G_{cm}} \%$
Пропитанная бумага (союзного изготовления, 1940)	Переменное 50 Hz . . .	0,12	59,2	5,39	10,75
	Постоянное . . . . .	0,124	90,4	20,20	22,60
Пропитанная бумага (союзного изготовления, март 1944)	Переменное 50 Hz . . .	0,124	58,2	9,26	15,85
	Постоянное . . . . .	0,124	90,4	20,20	22,60
Пропитанная бумага (изготовлена фирмой General Cable Corporation, 1943)	Переменное 50 Hz . . .	0,142	59,5	5,40	9,10
	Постоянное . . . . .	0,142	100	19,20	19,20
Непропитанная бумага (союзного изготовления, 1940)	Переменное 50 Hz . . .	0,193	8,7	0,86	9,86

Примечание. Данные испытания на пробой бумаги, приведенные во второй строчке, произведены при средней температуре окружающего воздуха  $10^\circ \text{C}$ , остальные — при  $22^\circ \text{C}$ . Бумаги, указанные в строчках 1—3, сняты с соответствующих кабелей.

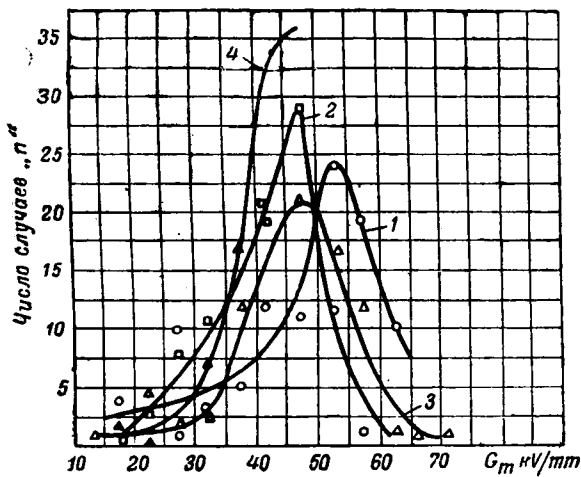


Рис. 4а. Распределение максимальных пробивных градиентов напряжения при переменном и при постоянном токах для кабелей.

1, 2, 3.—САД 3×6 мм<sup>2</sup> 1 кВ союзного изготовления март (1) и август (2, 3,) 1944; 4 —САД 3×6 мм<sup>2</sup> 1 кВ фирмы GSC, 1943; 1, 2, 4—напряжения переменного тока 50 Hz; 3—напряжение постоянного тока.

пределах 75—125%, а для образцов кабелей в пределах 50—250%. Следовательно, кривые распределения градиентов пробивных напряжений для кабелей не удовлетворяют закону распределения Гаусса. Поэтому в дальнейшем был произведен анализ этих кривых путем определения величин асимметрии  $K$  и  $\alpha$  и эксцесса  $E$  (приложение 2). Анализ показал следующее:

1. Большинство кривых распределения при постоянном и при переменном токах имеет отрицательную асимметрию.

2. Большинство кривых распределения при постоянном и при переменном токах имеет низковошинность или плосковершинность — платикуртическое распределение (эксцесс распределения отрицателен).

В связи с асимметрией распределения  $G_n$  для кабелей были определены для соответствующих кривых константы Пирсона  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и типовой критерий  $I$  (приложение 2). Расчеты обнаружили, что для всех кривых при постоянном и при переменном токах величины  $\beta_1 > 0$  и  $I > 0$ , иначе говоря, исследуемые совокупности могут быть представлены кривыми Пирсона 1 типа, биномиальным законом и законом Пуассона [Л. 2]. Дальнейший анализ экспериментальных кривых установил, что для образцов кабелей биномиальное распределение не имеет смысла, так как  $m$  в уравнении  $P(n) = C_n^m p^n (1-p)^{m-n}$  получает отрицательное значение. Затем было обнаружено, что для этих кривых может быть применено распределение вероятностей по закону Пуассона и что, например, для кабеля САД 3×16 мм<sup>2</sup> 1 кВ распределение вероятностей пробивных напряжений при переменном токе удовлетворяет уравнению;

$$P(n) = \frac{(27,8)^n \cdot e^{-27,8}}{n!}$$

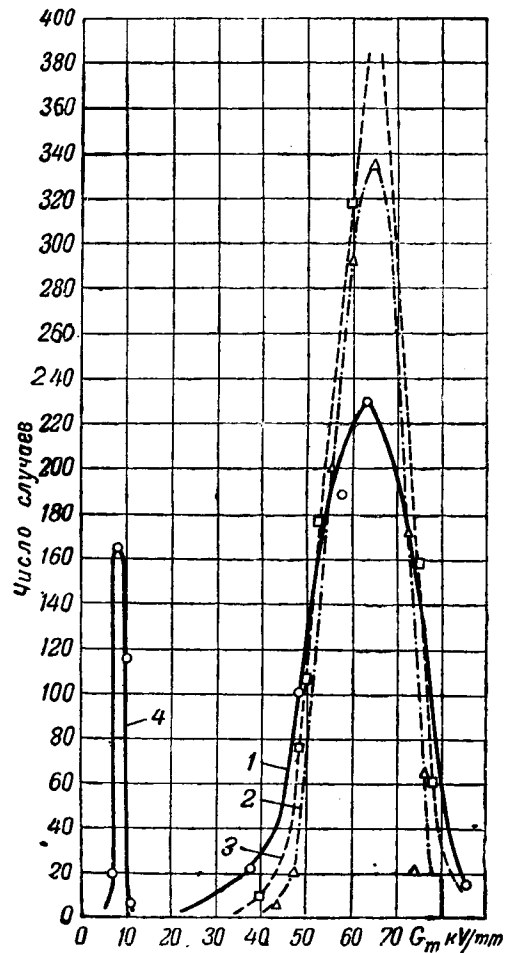


Рис. 4б. Распределение максимальных пробивных градиентов напряжения для бумаги (напряжение переменного тока 50 Hz).

1, 2, 3—пропитанная бумага, снятая с кабеля союзного изготовления 1944 (1) и 1940 (3) и с кабеля фирмы GSC (2); 4—непропитанная бумага.

**Механизм прокалывающего пробоя.** Опытами обнаружено отсутствие повышения температуры испытанных образцов кабелей при прокалывающем пробое на переменном и на постоянном токах. Это показывает, что рассматриваемый тип их пробоя происходит в области чисто электрического пробоя. Форма прокалывающего пробоя может быть также установлена из анализа зависимости пробивного напряжения для кабелей и для бумаг от длительности экспозиции [Л. 5], так как в интервале времени до 10 сек. отсутствует значительное уменьшение  $G_n$ .

Опыты далее показали отсутствие воскообразования и обуглероживания на бумажных лентах кабелей после их пробоя как при переменном, так и при постоянном токах. При напряжении постоянного тока вообще отсутствует длительный ионизационный процесс, в связи с чем естественно наблюдаемое отсутствие воскообразования. Из результатов опытов при переменном токе следует, что продолжительность ионизации газовых включений при рассматриваемом типе пробоя недостаточна для развития ее вторичных признаков — воскообразования.

Далее обнаружено, что отношение среднего арифметического значения максимального гради-

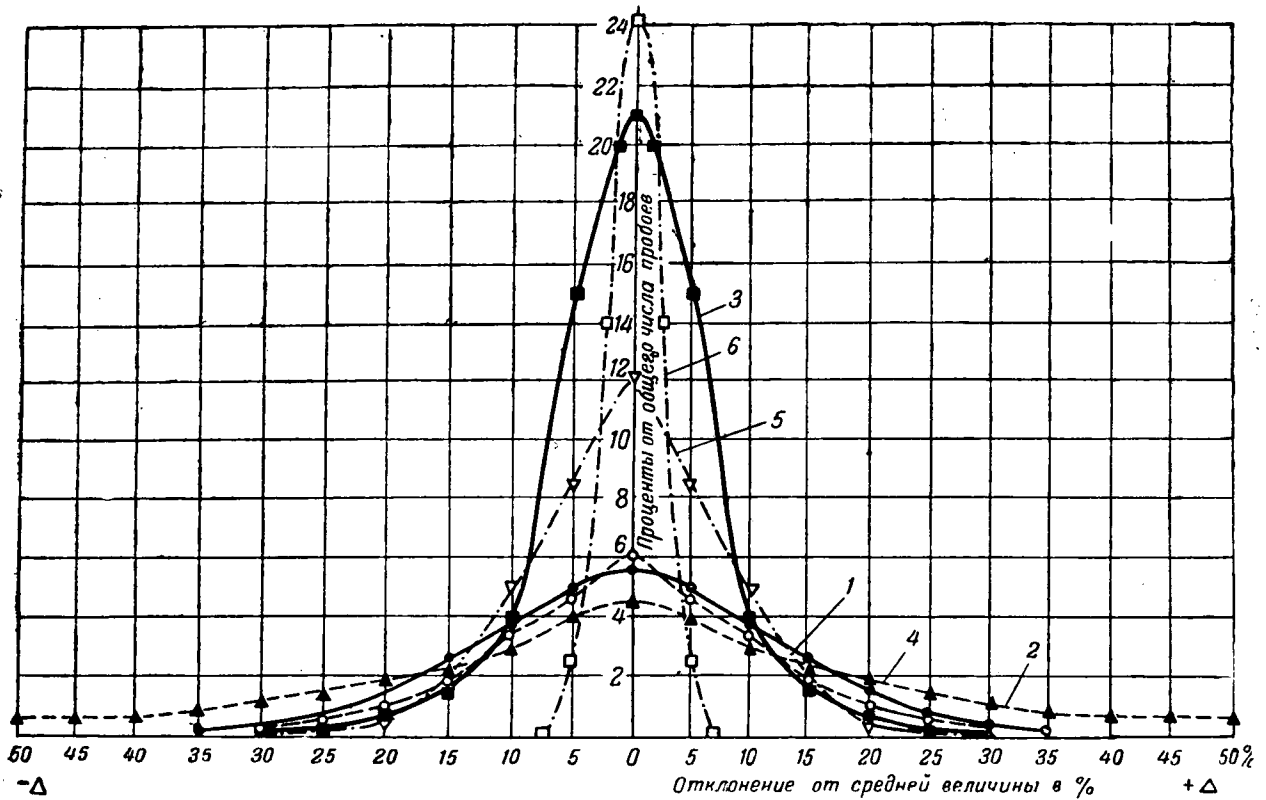


Рис. 5. Распределение вероятностей пробойной прочности  $n = f(l)$  для кабельных бумаг и для воздуха.

1 — пропитанная бумага, снятая с кабеля союзного изготовления, 1944,  $\sigma = 9,23 \text{ kV/mm}$ ,  $\frac{1}{\sigma V \sqrt{2\pi}} = 0,0431$  (напряжение переменного тока 50 Hz); 2 — то же,  $\sigma = 20,4 \text{ kV/mm}$ ,  $\frac{1}{\sigma V \sqrt{2\pi}} = 0,0195$  (постоянный ток); 3 — пропитанная бумага с кабеля фирмы GCS,  $\sigma = 5,4 \text{ kV/mm}$ ;  $\frac{1}{\sigma V \sqrt{2\pi}} = 0,0742$  (50 Hz); 4 — то же (постоянный ток),  $\sigma = 14,2 \text{ kV/mm}$ ,  $\frac{1}{\sigma V \sqrt{2\pi}} = 0,0208$ ; 5 — непропитанная кабельная бумага союзного изготовления,  $\sigma = 0,865 \text{ kV/mm}$ ,  $\frac{1}{\sigma V \sqrt{2\pi}} = 0,464$ ; 6 — воздух по Никурадзе,  $\sigma = 1,47 \text{ kV/mm}$ . 1, 2, 3, 4 и 5 построены по результатам 1 000 наблюдений. 6 — по результатам 500 наблюдений.

ента пробойного напряжения при постоянном токе к аналогичному значению при переменном токе для испытанных образцов кабелей оказалась равным в среднем единице (табл. 1). Это показывает, что происходящая при переменном токе ионизация воздушных включений в толще изолирующего слоя испытанных кабелей не оказывает заметного влияния на величину его электрической прочности.

Установлено далее, что при переменном и при постоянном токах максимальный пробойный градиент напряжения для отдельных слоев бумаги больше, чем для кабелей  $\frac{G_{млб}}{G_{млк}} = 1,5 - 2$

(табл. 3). Это снижение электрической прочности кабелей по сравнению с бумагами вызвано наличием в кабелях зазоров между последовательными повивами лент бумаги, заполненных пропиточным компаундом.

Изучение пути прокалывающего пробоя при переменном и при постоянном токах в испытанных силовых кабелях обнаружило отсутствие его отклонений в продольной и поперечной плоскостях. Это показывает, что при рассматриваемом типе пробоя указанных кабелей отсут-

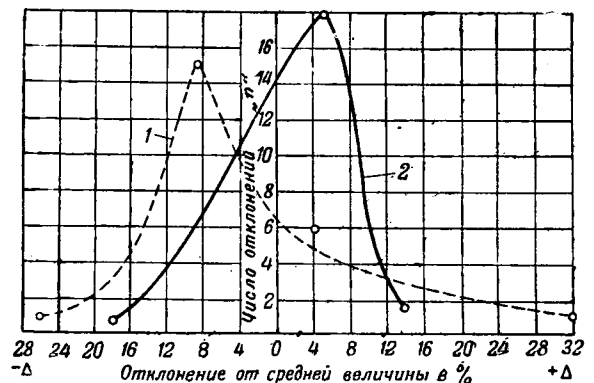


Рис. 6. Распределение вероятностей пробивной прочности кабеля CAD  $3 \times 10 \text{ mm}^2$  1 kV союзного изготовления.

1 — переменный ток 50 Hz; 2 — постоянный ток.

ствуют тангенциальные составляющие градиентов напряжения, обуславливающие отклонения пути пробоя от радиального направления.

Опыты показали, что максимальное число пробоев в зазорах между последовательными повивами лент бумаги при переменном токе при-

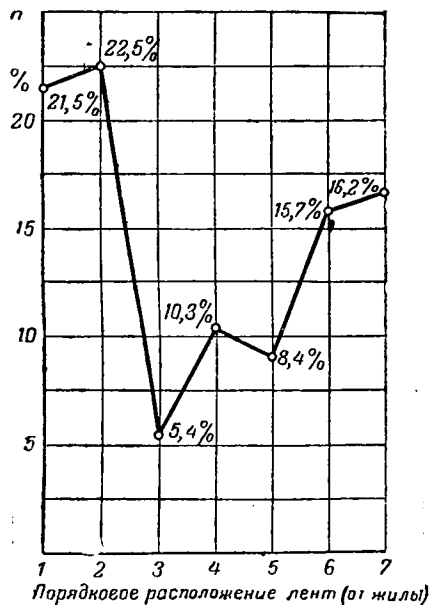


Рис. 7а. Распределение пробоев  $n$  (проценты к общему числу) при переменном токе 50 Hz в зазорах между лентами бумаги для кабеля CAD  $3 \times 16 \text{ mm}^2$  1 kV в зависимости от расположения лент бумаги.

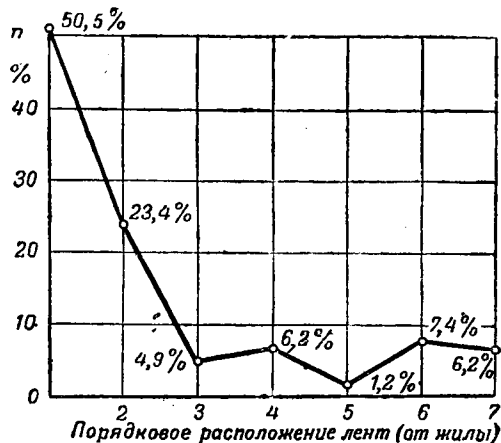


Рис. 7б. Распределение пробоев  $n$  (проценты к общему числу) при постоянном токе в зазорах между лентами бумаги для кабеля CAD  $3 \times 16 \text{ mm}^2$  1 kV в зависимости от расположения лент бумаги.

ходится на слой бумаги, расположенные у жилы и оболочки (рис. 7а).

При постоянном токе для всех испытанных кабелей обнаружено два экспериментальных факта: а) меньшее, чем при переменном токе число пробоев в зазорах между последовательными повивами лент бумаги; б) сравнительно большое число пробоев в зазорах для первой ленты при небольшом числе пробоев в зазорах между последовательными повивами лент внутри изоляции и у наружного электрода (рис. 7б). Из этих данных следует, что путь пробоя при постоянном токе проходит преимущественно не через зазоры, а через слои бумажной изоляции. Кроме того, рассмотрение соответствующих гистограмм показало, что пробой в зазорах имеют

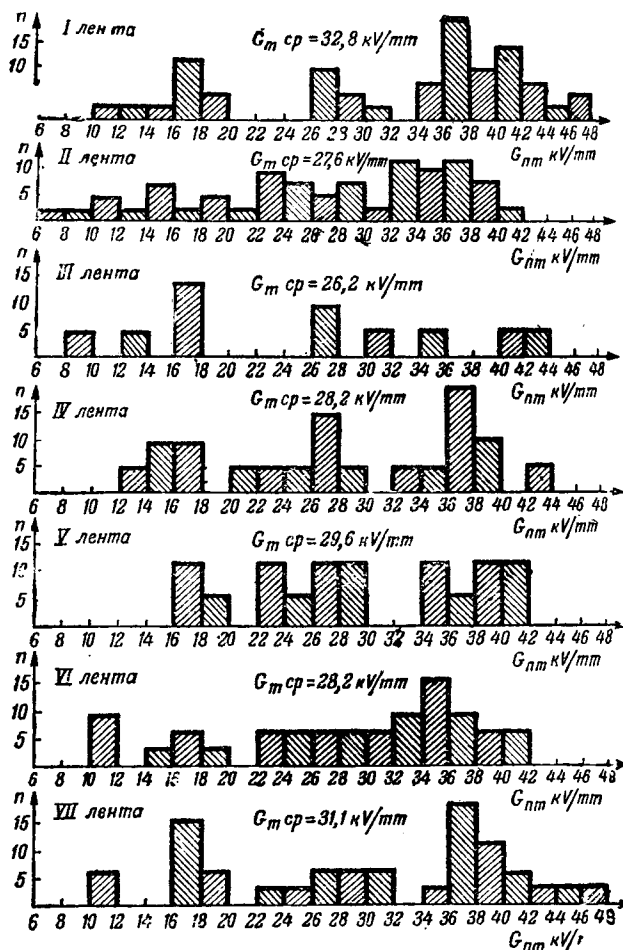


Рис. 8. Распределение пробоев в зазорах между лентами бумаги для кабеля CAD  $3 \times 16 \text{ mm}^2$  1 kV в зависимости от величины пробойных градиентов напряжения переменного тока. Счет лент от жилы кабеля;  $n$  — число пробоев в процентах к общему их числу через зазоры этой ленты.

место во всем интервале величин градиентов пробойных напряжений и что это распределение равномерно (рис. 8). Таким образом нет преимущественных значений градиентов напряжения, при которых происходят пробой в зазорах.

Обнаруженная локализация пробоев по отношению к ширине зазора (концентрация пробоев не в середине ширины лент и не в зазорах, а на расстоянии около 1 mm от края) может быть обусловлена тенденцией бумаг у краев зазоров изгибаться и отклоняться, и таким образом толщина включения прогрессивно уменьшается от краев к центру зазора. При этом распределение плотности электростатического потока в зазоре и вблизи него неравномерно и поэтому создаются оптимальные условия для пробоя за пределами зазора.

Из вышеизложенного следует, что при прокалывающем пробое силовых кабелей на переменном токе происходит непродолжительная ионизация газовых включений, пробой компаунда в зазорах между лентами и пробой самой пропитанной бумаги. Главную роль в прокалывающем пробое кабелей играет пробой самой пропитанной бумаги.



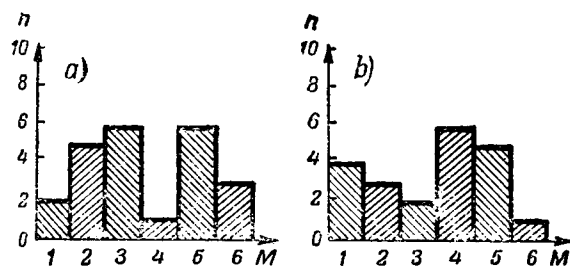


Рис. 9. Гистограммы попадания пробоя в зазоры лент бумаги для кабеля CAD  $3 \times 10 \text{ мм}^2$  1 kV (фирмы GCS, 1942) в разных областях величин максимальных пробивных градиентов напряжения переменного тока.

a — в интервале  $G_{mn} = 15-25 \text{ kV/mm}$  (13 образцов); b — в интервале  $G_{mn} = 45-55 \text{ kV/mm}$  (16 образцов); n — число случаев; M — номер ленты, считая от жилы.

Именно поэтому имеется большое соответствие закономерностей прокалывающего пробоя изоляции кабелей и отдельных слоев бумаги. Оно выявляется из рассмотрения уровня электрической прочности и ее неравномерности для исследованных кабелей и бумаг (табл. 1 и 2).

Результаты многочисленных работ [Л. 6, 7 и 8] по изучению механизма прокалывающего пробоя пропитанной бумаги могут быть сведены к следующим двум вариантам процесса пробоя: а) первоначально происходит пробой твердой фазы (теория разрыва силами электрического поля связей между волокнами бумаги и теория ионизирующего волокна), а затем пробивается и жидкая фаза; б) первоначально происходит пробой жидкой фазы — как наиболее слабой (каналов жидкости в бумаге), а затем пробивается и твердая фаза. Начинается ли пробой с твердой или жидкой фазы, зависит от свойств исходных материалов (пропиточного состава, структуры бумаги и свойств волокон бумаги).

**Механизм рассеивания пробойных напряжений.** Наиболее характерным признаком прокалывающего пробоя пропитанных бумаг и изоляции силовых кабелей является большое рассеивание величины пробойных напряжений (табл. 1 и 2). Вероятны следующие точки зрения на происхождение этого рассеивания.

1. Рассеивание вызвано различием в условиях испытаний образцов, как-то: неодинаково плотным прилеганием электродов к изоляции (например, станиоловой оболочке), неодинаковой влажностью образцов

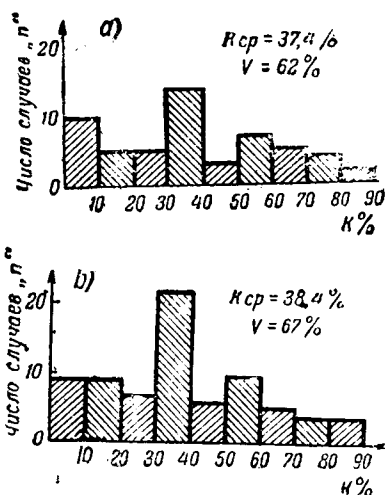


Рис. 10. Гистограммы перекрытий лент бумаги,  $K_i$  для кабеля CAD  $3 \times 10 \text{ мм}^2$  1 kV (фирмы GCS, 1942), в разных областях максимальных пробивных градиентов напряжения (переменный ток).

n — число случаев; a — в интервале  $G_{mn} = 15-25 \text{ kV/mm}$  (13 образцов); b — в интервале  $G_{mn} = 45-55 \text{ kV/mm}$  (16 образцов).

и т. п. Пробойное напряжение оказывается одинаковым, если эти различия удастся устранить [Л. 9].

Наши опыты и исследования других авторов [Л. 10] с несомненностью установили, что в практически одинаковых условиях испытаний электрическая прочность изоляции различна на разных участках изоляции одного кабеля или одной бумажной ленты. Отсюда следует, что эта точка зрения не соответствует опыту.

2. Рассеивание вызвано наличием слабых мест в изоляции (H. Gewecke und W. Krukowski [Л. 11]). Согласно положениям теории вероятности вероятность наличия слабых и нормальных мест в изоляции объектов одинакова. Если верна теория слабых мест, то кривая распределения градиентов пробойных напряжений должна обнаруживать два максимума, соответственно нормальным и слабым участкам. Наши опыты и исследования других авторов [Л. 10] показывают, что эти кривые имеют только один максимум. Для бумаг этот максимум соответствует среднеарифметическому значению пробойного напряжения, а для кабелей он сдвинут вправо от этого значения (асимметрия кривых отрицательна). Отсюда следует, что и эта точка зрения расходится с данными опытов.

Таблица 3

Место и время изготовления	Объект испытания					
	Средние значения максимального пробойного градиента переменного тока для кабелей и бумаг, kV/mm		Отношение градиентов $\frac{G_{стб}}{G_{стк}}$	Средние значения максимального пробойного градиента напряжения постоянного тока для кабелей и бумаг, kV/mm		Отношение градиентов $\frac{G_{стб}}{G_{стк}}$
	кабельная бумага	кабели		кабельная бумага	кабели	
СССР, 1944 . . . . .	58,5	33,8	1,78	90,4	48,5	1,86
США, 1942—1943 . . . . .	59,5	39,0	1,52	100,0	49,4	2,02

3. Рассеивание вызвано случайной вариацией электрической прочности (неоднородностью), в сторону усиления и ослабления около некоторой средней величины [Л. 12]. Эта точка зрения наиболее соответствует опыту.

Ожидаемые числа пробоев  $F$  определены по формуле Holmes (приложение 1) на основе результатов проведенных опытов по пробоем и сопоставлены для длины кабеля 250 м (при испытательном напряжении 3,2 kV, см. последнюю графу табл. 1). Эти данные могут быть использованы лишь для относительных сопоставлений, так как формула Holmes выведена на основе предположения о симметрии кривой распределения градиентов пробойных напряжений, между тем как наши опыты показали, что для кабелей она асимметрична. Из данных табл. 1 следует, что для испытанного импортного кабеля и для одного из кабелей союзного изготовления (август, 1944)  $F$  (ожидаемое число пробоев) минимально, а для другого кабеля союзного изготовления (март, 1944) оно несравненно больше.

Рассеивание пробойного напряжения изоляции образцов кабелей может быть обусловлено следующими основными факторами: а) рассеиванием пробойных напряжений отдельных слоев пропитанной бумаги; б) числом слоев бумаги в толще изоляции кабеля; в) неравномерностью наложения бумажных лент; г) наличием неравномерно распределенных зазоров между слоями бумаги; д) разбросом пробойных напряжений масла в зазорах; е) неравномерностью распределения включений (газа и пустот) по длине кабеля.

Результаты опытов показали, что в разных интервалах градиентов пробойных напряжений наблюдаются одинаковые гистограммы распределения пробоев в зазорах между последовательными повивами лент бумаги (рис. 9). Отсюда следует, что наблюдаемое рассеивание не вызвано преимущественным пробоем этих зазоров пропиточного состава в области небольших величин градиентов напряжения.

Результаты опытов далее обнаружили, что в разных интервалах градиентов пробойных напряжений перекрытие лент бумаги и ее неравномерность для этих образцов практически одинаковы (рис. 10). Из этих данных следует, что наблюдаемое рассеивание градиентов пробойных напряжений не обусловлено неравномерностью перекрытия лент бумаги.

Включения (газа и пустот) в толще изоляции не оказывают значительного влияния на величину пробойной крепости при прокалывающем пробое (см. выше). Поэтому неравномерность их распределения не является основной причиной рассматриваемого рассеивания.

Вышеизложенное позволяет установить, что рассеивание пробойного напряжения изоляции кабелей при прокалывающем пробое, главным образом, определяется соответствующим рассеиванием для отдельных пропитанных бумаг и числом слоев бумажных лент в изоляции. Экспериментально установлено, что неравномерность

пробойного напряжения уменьшается с увеличением числа слоев бумаги в толще изоляции кабелей. Неравномерность пробойной крепости пропитанной бумаги в свою очередь определяется свойствами бумаги и пропиточного состава.

Рассеивание пробойной крепости собственно пропитанной бумаги обусловлено в первую очередь неравномерностью расположения и размеров пор и каналов в бумаге. Далее, результаты многочисленных исследований пробоя жидких диэлектриков показывают весьма значительное рассеивание их пробойных напряжений, которое очень сильно зависит от степени увлажнения и чистоты жидкости [Л. 5, 13]. Поэтому свойства пропиточного состава — степень сушки и загрязнения его, представляют собой второй основной фактор, обуславливающий рассеивание пробойной крепости пропитанной бумаги.

Наконец, третьим фактором, вызывающим рассеивание, является неравномерность пробойной крепости волокон бумаги.

Результаты наших опытов далее обнаружили, что при постоянном токе имеет место сравнительно большее рассеивание величины пробойной крепости для кабелей и бумаг (табл. 1 и 2), характеризуемое величиной отношения соответствующих коэффициентов изменчивости для пробойной крепости  $P = \frac{U_{ном}}{U_{неп}} = 1,4—2,1$  при изготовлении кабелей для передачи энергии. Это увеличение рассеивания величины пробойной крепости на постоянном токе вызвано сравнительно большим влиянием проводимости на закономерности пробоя при постоянном токе. Поэтому при изготовлении кабелей для передачи энергии при высоком напряжении постоянного тока должно быть обращено особое внимание на предотвращение загрязнений пропиточного состава и кабельной бумаги. Далее следует сделать тот практически важный вывод, что контроль равномерности величины пробойной крепости изоляции из пропитанной бумаги лучше производить по результатам испытаний на постоянном токе.

**Выводы.** 1. Прокалывающий пробой пропитанной кабельной бумаги и силовых кабелей толщиной изоляции до 1 мм, изолированных пропитанной кабельной бумагой, происходит в области чисто электрического пробоя.

2. Кривые распределения градиентов пробойных напряжений для кабельных бумаг при переменном и постоянном токах удовлетворяют закону нормальной кривой Гаусса.

Соответствующие кривые для изоляции кабелей оказались асимметричными (в большинстве случаев имеющими отрицательную асимметрию и плосковершинность). Они могут быть выравнены по закону Пуассона или по кривым Пирсона I типа. Этот ход кривых распределения градиентов пробойных напряжений для кабелей указывает, что теоретические предпосылки формулы Гольдштейна [Л. 12] больше соответствуют физической природе явления пробоя, чем предпосылка для формул Milnor'a и Holmes'a, предполагаю-

щих симметричность кривых распределения (приложение 1).

3. Установление причин систематических пробоев кабелей при кратковременных испытаниях (ГОСТ, профилактические испытания и т. п.) следует производить на основе анализа кривых распределения пробойных напряжений при прокалывающем пробое соответствующих кабелей и пропитанных бумаг.

4. Закономерности прокалывающего пробоя силовых кабелей (толщина изоляции до 1 мм) при переменном и при постоянном токах определяются, главным образом, соответствующими закономерностями для пропитанных бумаг. Отсюда следует, что величины пробойной прочности кабелей и ее рассеивание обусловлены в основном соответствующими свойствами самой пропитанной бумаги.

5. При рассматриваемом типе пробоя кабелей имеет место радиальный выход места пробоя и путь пробоя не имеет отклонений в продольной и поперечной плоскостях.

Обнаружено, что при постоянном токе путь пробоя реже проходит через зазоры между последовательными повивами лент бумаги, чем при переменном токе, т. е. преимущественно пробиваются слои самой бумажной изоляции. Кроме того, найдено, что пробой при постоянном токе концентрируется в зазорах лент у жилы, тогда как при переменном токе они наблюдаются в зазорах у жилы и у оболочки.

6. Рассеивание пробойных напряжений силовых кабелей при прокалывающем пробое зависит от числа слоев бумаги, свойств пропиточного состава и соответствующего рассеивания для самой пропитанной бумаги. Это рассеивание обусловлено структурой бумаги, электрическими свойствами пропиточного состава и неравномерностью пробойной прочности самих волокон бумаги.

Установлено, что наблюдаемое рассеивание пробойных напряжений кабелей не вызвано неравномерностью перекрытия лент бумаги и преимущественным пробоем в зазорах между последовательными повивами лент бумаги в области наибольших величин градиентов напряжения.

Найдено, что рассеивание пробойных напряжений для кабелей и пропитанных бумаг при постоянном токе оказывается больше, чем при переменном токе. Поэтому контроль равномерности пробойной прочности изоляции лучше производить из опытов по пробоям при постоянном токе. Кроме того, при изготовлении кабелей для передачи энергии при постоянном токе практически важно обратить особое внимание на сохранение соответствующих величин проводимости для пропиточного состава и для кабельной бумаги, а также на предотвращение загрязнений при изготовлении самого изолирующего слоя кабеля.

В заключение автор считает своим долгом отметить, что изложенная работа была выполнена под общим руководством проф. С. М. Брагина в лаборатории МЭИ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Путем большого числа исследований диэлектрических материалов установлено, что среднее пробивное напряжение  $U_c$  диэлектриков в тонких слоях уменьшается при увеличении площади электродов  $S$ . Для зависимости  $U_c = f(S)$  известны формулы: а) Milnor'a, б) Holmes'a и в) Гольдштейна [Л. 14, 15, 12];

$$а) U_c = C_1 - C_2 \log S, \quad (1)$$

где  $S$  — поверхность электродов;  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные;

$$б) U_c = U_{cp} \left[ 1 - S \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{N-1}{2N} \right) \right], \quad (2)$$

где  $U$  и  $U_c$  — среднее пробивное напряжение материала при поверхности, равной некоторой условной единице и поверхности из  $N$  таких единиц, а  $\operatorname{erf}$  — символ интеграла Лапласа:

$$\operatorname{erf}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^k e^{-\frac{k^2}{2}} dk.$$

$$в) F = N \left[ \frac{1}{2} - \operatorname{erf} \left( \frac{1 - \frac{G_n}{G_{nc}}}{v} \right) \right], \quad (3)$$

где  $F$  — ожидаемое число пробоев;  $N$  — число единиц изоляции;  $G_n$  — градиент напряжения при испытании;  $G_{nc}$  — среднее значение пробойного градиента;  $v$  — коэффициент изменчивости пробойного градиента;

$$г) U_{x \min} = U_x \left[ 1 - C_v \int_{-\infty}^{+\infty} k \frac{d(\beta^v)}{dk} dk \right], \quad (4)$$

где  $U_{x \min}$  — пробойное напряжение самого слабого элементарного участка под электродом площади  $N$ ;  $U_x$  — математическое ожидание пробойного напряжения элементарных участков;  $C_v$  — неоднородность материала.

Из приведенных формул следует, что по мере увеличения площади электродов математическое ожидание пробойного напряжения падает, притом в замедляющемся темпе, что подтверждается и результатами опытов. Анализ этих формул далее показывает, что наибольшее падение  $U_n$  дает формула (2) Holmes'a, наименьшее формула Milnor'a. Формула Гольдштейна дает промежуточное значение, которое ближе к значению формулы Holmes'a. При увеличении площади электродов рассеивание отдельных пробивных напряжений вокруг их математического ожидания также уменьшается, так что результаты пробоя становятся более устойчивыми.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Среднеарифметическое значение признака  $\bar{x}$ , стандарт  $\sigma$  и коэффициент изменчивости  $v$   $x$  найдены из следующих выражений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (x - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%. \quad (7)$$

Таблица 4

Искомая характеристика	Объект испытания	Число наблюдений	Среднее арифметическое $\bar{x}$	Стандарт $\sigma_k$	Коэффициент изменчивости (%) $v$
Коэффициент перекрытия лент бумаги $k_i$ % для изоляции кабеля (%)	Кабель $3 \times 16 \text{ mm}^2$ , 1 kV (союзного изготовления, 1944)	534	26,7	15,1	56,5
То же	То же . . . . .	600	28,5	13,4	47,0
Пробойный градиент $G_i$ на жиле, при переменном токе 50 Hz	Кабель $3 \times 10 \text{ mm}^2$ , 1 kV (изготовления фирмы General Cable Corporation, 1942) . .	99	34	8,0	23,5
То же	То же . . . . .	99	36	8,9	24,4

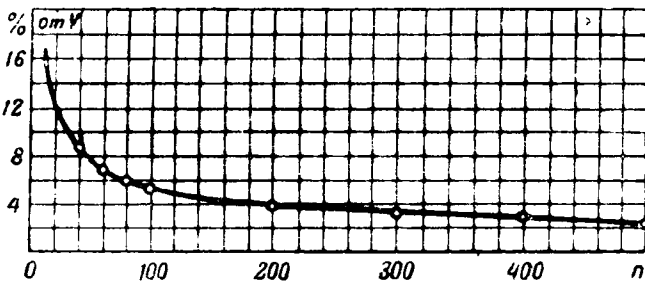


Рис. 11. Средняя квадратичная ошибка определения коэффициента изменчивости  $v$  (в % от  $v$ ) в зависимости от числа наблюдений  $n$ .

Нормальный закон распределения Гаусса определяет частоты из следующего равенства:

$$n'_x = \frac{n}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (8)$$

где  $n'_x$  — частота признака в рассматриваемом интервале  $dx$ ;  $n$  — объем рассматриваемой статистической совокупности;  $\sigma$  — стандарт признака;  $\bar{x}$  — среднее значение признака.

Из последнего соотношения определялись значения частот и сопоставлены с опытными частотами  $n'_x$  статистической таблицы. Если это сопоставление показывало хорошее соответствие, то распределение считалось нормальным. В противном случае определялись асимметричность и величина эксцесса  $E$  из следующих выражений:

$$K = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad \alpha = \frac{\bar{x} - Mo}{\sigma}, \quad E = \frac{\mu_4}{\mu^2} - 3, \quad (9)$$

где  $\mu_n$  —  $n$ -й центральный момент распределения;  $Mo$  — мода признака.

Если форма распределения признака была вовсе отлична от формы нормального распределения, то выявлялся тип эмпирических кривых распределения, удовлетворяющий данным опытов. Согласно теории кривых распределения определялись величины констант Пирсона  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и типовой критерий —  $I$ :

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= K^2 = \frac{\mu_3^2}{\mu_2^3}, \\ \beta_2 &= \frac{\mu_4}{\mu_2^2}, \\ I &= 3\beta_1 - 2\beta_2 + 6. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Закон для исследуемых кривых распределения выявлялся по сопоставлению найденных величин  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $I$  с соответствующими величинами типовой таблицы [Л. 2].

В связи с проведением массовых наблюдений на ограниченном числе образцов найдены степень точности и погрешности определения искомых статистических характеристик [Л. 2, 3 и 4].

Погрешности основных характеристик статистического ряда обратно пропорциональны корню квадратному из  $n$ . В частности, средняя квадратичная погрешность коэффициента изменчивости  $\sigma_v$ .

$$\sigma_v = \frac{v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2\left(\frac{v}{100}\right)^2}. \quad (11)$$

Из рис. 11 видно, что погрешность статистических характеристик значительно резко изменяется в области небольших значений числа испытаний. Основываясь на этом свойстве и на ходе изменения кривой рис. 11, принято, что при определении характеристик промышленной продукции достаточно 100 независимых наблюдений каждой характеристики.

Точность определения искомых характеристик и их погрешностей для исследуемых образцов кабелей при  $n = 100$  иллюстрирует табл. 4, где сопоставлены группы испытаний по определению перекрытия лент бумажной изоляции кабеля ( $k_i$ ) и пробойного градиента напряжения кабеля при прокалывающем пробое ( $G_i$ ).

Из таблицы видно, что при числе испытаний  $n = 100$  изменение определяемых характеристик находится в пределах 5 — 10%, причем точность определения пробойных градиентов напряжения  $G_i$  больше, чем точность определения коэффициента перекрытия лент бумаги  $k_i$ .

#### Литература

1. Л. Ландау и Е. Лившиц. Статистическая физика. ГТТИ, 1940.
2. Т. Фрай. Теория вероятностей для инженеров. ГТТИ, 1934.
3. В. Романовский. Математическая статистика. ГОНТИ, 1938.
4. П. И. Шолов. Способ наименьших квадратов. Геодеиздат, 1941.
5. А. Ф. Вальтер. Физика диэлектриков. ГТТИ, 1932.
6. T. Riley and T. R. Scott. Journ. IEE. v. 67, p. 946. 1929.
7. Ф. Квитнер. Труды 3-й Всесоюзной конференции по электроизолирующим материалам, т. III, 1934.
8. T. Goldman and B. Wul. Technical Physics of the USSR, v. III, № 6, 1936.
9. A. Schwaiger. Archiv für Electrotechnik, B. III, H. 10-11. 1912.
10. Buch and Moon. Trans. of AIEE, v. XLVI, p. 1025, 1927.
11. H. Gewecke und W. Krukowski. Archiv für Electrotechnik B. III, H. 2, 1914.
12. А. М. Гольдштейн. ЖТФ, т. IV, вып. 2, 1934.
13. А. Никурадзе. Жидкие диэлектрики. ОНТИ, 1936.
14. T. W. Milnor. Discussion of Farmers paper. Trans. AIEE, v. 32, p. 2128, 1913.
15. M. C. Holmes. Trans. of AIEE, December, 1931.



# Нерезонансные электрические цепи с переменным параметром

Кандидат техн. наук Я. З. ЦЫПКИН

Москва

Под нерезонансными цепями с переменным параметром мы подразумеваем электрические цепи, состоящие из соединенных последовательно сопротивления и индуктивности или емкости, причем один из параметров с течением времени изменяет свою величину по некоторому заданному закону.

В качестве примеров такого рода цепей можно указать на цепи угольного и конденсаторного микрофонов, индуктивных, емкостных и потенциометрических датчиков, синхронизаторов фототелеграфных импульсов, фотоэлементов и т. п.

В зависимости от того, какой параметр является переменным, нерезонансные цепи с переменным параметром можно подразделить на четыре типа:

- I.  $R = \text{var}$ ,  $L = \text{const}$ ; III.  $C = \text{var}$ ,  $R = \text{const}$ ;  
II.  $L = \text{var}$ ,  $R = \text{const}$ ; IV.  $R = \text{var}$ ,  $C = \text{const}$ .

Практическое применение находят себе первые три типа цепей.

Рассмотрению этих цепей посвящено значительное количество работ. В большей части из них [Л. 1—5] (цепь I), [Л. 6] (цепь II), [Л. 7, 8, 14] приводятся приближенные результаты. Сложность, а в общем случае и невозможность оценки погрешности лишают уверенности в правильности анализа и расчетов. В других работах дано принципиально точное решение. Однако незаконченность [Л. 9, 15] (цепь I) и сложность [Л. 10] (цепь III) делают его практически малоприменимым. Наконец, некоторые работы, [Л. 11] (цепь II), [Л. 12, 13] (цепь III) содержат явно ошибочные результаты.

Таким образом, несмотря на широкое распространение нерезонансных цепей с переменным параметром на практике и значительное количество исследований, посвященных им, до сих пор отсутствует достаточно точный и про-

*Рассматриваются цепи, состоящие из последовательно соединенных сопротивления и индуктивности или емкости; один из параметров этих цепей изменяется с течением времени по некоторому заданному закону. Дается точная теория этих цепей, на основании которой производится анализ электрических процессов в них. Построены графики позволяют произвести расчет цепей и определить как параметры, так и характеристики их.*

той метод анализа и расчета электрических процессов, протекающих в этих цепях.

Целью настоящей работы является восполнение этого пробела. Проведенное ниже исследование позволяет произ-

вести анализ цепей и рассчитать их с любой необходимой степенью точности.

В дальнейшем будем предполагать, что закон изменения переменного параметра имеет вид:

$$s(t) = s_0 + s_1 \sin \omega t$$

или

$$s(t) = s_0 (1 + \lambda \sin \omega t),$$

где

$$\lambda = \frac{s_1}{s_0} < 1$$

— коэффициент модуляции переменного параметра.

Схемы цепей типов I, II и III изображены в табл. 1. Там же приведены дифференциальные уравнения и законы изменения переменных параметров.

В табл. 1  $i$ ,  $\Phi$  и  $q$  обозначают соответственно ток, поток и заряд. Остальные обозначения ясны из схемы I, II и III.

Вводя обозначения  $\lambda$ ,  $a$  и  $y$ , указанные в табл. 1, и полагая  $\omega t = x$ , дифференциальные уравнения этих цепей можно привести к одному уравнению в безразмерных величинах

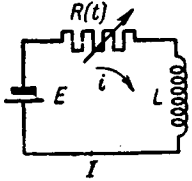
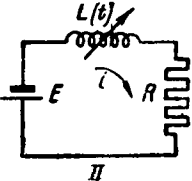
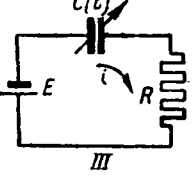
$$\frac{dy}{dx} + a(1 + \lambda \sin x)y = a. \quad (1)$$

Общее решение уравнения (1), как известно, можно записать следующим образом:

$$y = e^{-\int a(1 + \lambda \sin x) dx} \left\{ \int a e^{\int a(1 + \lambda \sin x) dx} dx + K \right\}, \quad (2)$$

где  $K$  — произвольная постоянная, значение которой будет определено в дальнейшем.

Таблица 1

Тип цепи	Схема цепи	Уравнение цепи	$s(t)$	$\lambda$	$a$	$y$
I		$L \frac{di}{dt} = R(t) i = E$	$R_0 + R_1 \sin \omega t$	$\frac{R_1}{R_0}$	$\frac{R_0}{\omega L}$	$\frac{i}{I_0}$ $I_0 = \frac{E}{R_0}$
II		$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R}{L(t)} \Phi = E$ $\Phi = L(t) i$	$\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_1} \sin \omega t$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{R}{\omega L_0}$	$\frac{\Phi}{\Phi_0}$ $\Phi_0 = L_0 I_0$
III		$R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C(t)} = E$ $q = \int i dt$	$\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} \sin \omega t$	$\frac{C_0}{C_1}$	$\frac{1}{\omega C_0 R}$	$\frac{q}{q_0}$ $q_0 = EC_0$

Решение дифференциального уравнения (1) состоит из двух частей:

$$y_1 = e^{-\int a(1 + \lambda \sin x) dx} \int a e^{\int a(1 + \lambda \sin x) dx} dx, \quad (3)$$

которая характеризует установившийся процесс в цепях, и

$$y_2 = K e^{-\int a(1 + \lambda \sin x) dx}, \quad (4)$$

существенно зависящей от произвольной постоянной и характеризующей переходный процесс.

Рассмотрим вначале установившийся процесс.

Уравнение установившегося процесса (3) можно представить в виде тригонометрического ряда:

$$y_1 = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos kx + B_k \sin kx. \quad (5)$$

Коэффициенты этого ряда даются выражениями:

$$Y_0 = 2 d_{0,0}^{(1)} + \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^r d_{r,r}^{(1)},$$

$$A_k = \sum_{r=0}^k (-1)^r d_{r,k-r}^{(1)} + \sum_{r=0}^{\infty} \left\{ (-1)^{r+k} d_{r+k,r}^{(1)} + (-1)^2 d_{r,r+k}^{(1)} \right\} \quad (6)$$

$$B_k = \sum_{r=0}^k (-1)^r d_{r,k-r}^{(2)} + \sum_{r=0}^{\infty} \left\{ (-1)^{r+k} d_{r+k,r}^{(2)} - (-1)^r d_{k,r+k}^{(2)} \right\}, \quad (7)$$

где  $d_{n,m}^{(1)}$  и  $d_{n,m}^{(2)}$  определяются формулами (23) приложения 1.

$d_{n,m}^{(1)} > 0$  и  $d_{n,m}^{(2)} > 0$  и с ростом индексов  $n$  и  $m$  убывают, поэтому согласно теореме Лейбница о сходимости знакопеременных рядов ряды в выражениях (6) и (7) сходятся. Погрешность, допускаемая при замене ряда конечным числом слагаемых, не превосходит первого из отброшенных членов. Например, если в этих рядах оставить  $(p-1)$  член, то погрешность, допускаемая в вычислении  $Y_0$ ,  $A_k$  и  $B_k$ , будет определяться соответственно неравенствами:

$$\Delta Y_0 < d_{p,p}^{(1)},$$

$$\Delta A_k < d_{p+k,p}^{(1)} + d_{p,p+k}^{(1)}, \quad \Delta B_k < d_{p+k,p}^{(2)} + d_{p,p+k}^{(2)}. \quad (8)$$

Неравенства (8) дают возможность определить, какое число членов ряда необходимо удержать, чтобы получить желаемую точность вычислений величин  $Y_0$ ,  $A_k$  и  $B_k$ . Практически, однако, нет необходимости вычислять все амплитуды  $A_k$  и  $B_k$  по формулам 6 и 7, достаточно лишь

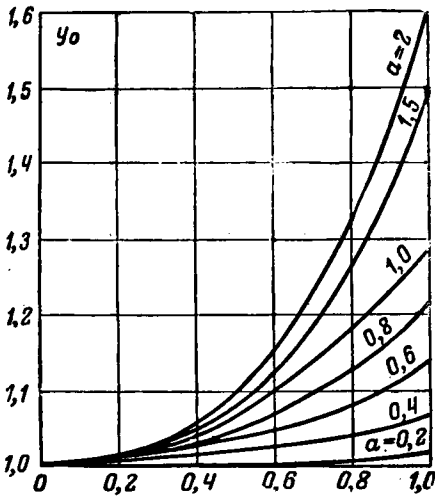


Рис. 1. Постоянная составляющая  $Y_0$  ряда (5) для установившегося процесса в зависимости от коэффициента модуляции  $\lambda$  и для различных значений  $a$ .

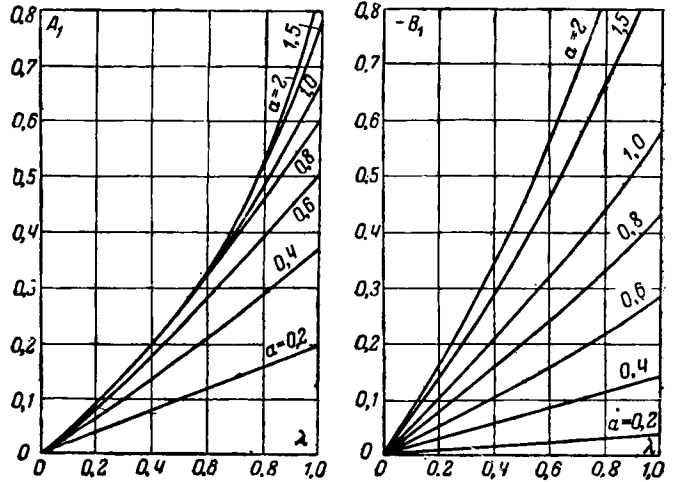


Рис. 2. Амплитуды  $A_1$  и  $-B_1$  основной частоты ряда (5) для установившегося процесса в зависимости от коэффициента  $\lambda$  и для различных значений  $a$ .

вычислить  $Y_0$ ,  $A_1$  и  $B_1$ . Амплитуды же всех высших гармоник  $A_k$ ,  $B_k$  определяются из рекуррентных соотношений:

$$A_{k+1} = -\frac{2k}{a\lambda} A_k + \frac{2}{\lambda} B_k + A_{k-1}, \quad (9)$$

$$B_{k+1} = -\frac{2k}{a\lambda} B_k - \frac{2}{\lambda} A_k + B_{k-1}, \quad (10)$$

в справедливости которых нетрудно убедиться<sup>1</sup> подстановкой в них выражений  $A_k$  и  $B_k$ . В этих рекуррентных формулах следует принимать  $A_0 = 2Y_0$  и  $B_0 = 0$ .

Зависимость  $Y_0$ ,  $A_1$  и  $B_1$  от  $\lambda$  при различных значениях  $a$  приведена на рис. 1 и 2.

При  $\lambda = 0$   $Y_0 = 1$  и  $A_k = B_k = 0$ , следовательно, в эквивалентных цепях постоянными параметрами ( $\lambda = 0$ )  $y_1 = 1$ . С увеличением коэффициента модуляции  $\lambda$  постоянная составляющая  $Y_0$  возрастает.

В нерезонансных цепях с переменным параметром постоянная составляющая  $Y_0$  всегда больше, чем установившееся значение ( $y_1 = 1$ ) в эквивалентных цепях с постоянными параметрами. Амплитуды  $A_1$  и  $B_1$  также возрастают с ростом  $\lambda$ . При малых значениях  $\lambda$  этот рост происходит по линейному закону.

Как видно из табл. 1, величину  $a$  можно записать в виде:

$$a = \frac{1}{\tau\omega}, \quad (11)$$

где  $\tau$  — постоянная времени эквивалентной цепи с постоянными параметрами.

Увеличение постоянной времени  $\tau$  и частоты изменения переменного параметра  $\omega$ , т. е. уменьшение  $a$ , влечет за собой уменьшение как постоянной составляющей  $Y_0$ , так и амплитуд основной частоты  $A_1$ -и  $B_1$ .

<sup>1</sup> Эти соотношения можно получить также формальной подстановкой решения (5) в уравнение (1).

Обозначим

$$\sqrt{A_k^2 + B_k^2} = M_k \text{ и } \psi_k = \arctg \frac{B_k}{A_k},$$

тогда уравнение установившегося процесса (5) представится в виде:

$$y_1 = Y_0 + \sum_{k=2}^{\infty} M_k \cos(kx + \psi_k).$$

Отсюда следует, что при изменении переменного параметра по гармоническому закону величина  $y$  меняется по закону некоторой сложной периодической кривой с периодом, равным  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . Это обстоятельство является

характерным свойством нерезонансных цепей с переменным параметром.

Чем больше величина амплитуды гармоник  $M_k$  по сравнению с амплитудой основной частоты  $M_1$ , тем сильнее установившийся процесс будет отличаться от закона изменения переменного параметра. Величина этого отклонения характеризует искажения, вносимые установившимся процессом в закон изменения переменного параметра, и может быть оценена отношениями

$$\gamma_k = \frac{M_k}{M_1}, \quad k = 2, 3, \dots \quad (12)$$

Отношения  $\gamma_k$  ( $k = 2, 3$ ) приведены на рис. 3. С ростом  $k$   $\gamma_k$  резко уменьшается, т. е. чем выше гармоника, тем амплитуда ее меньше. При  $k = \text{const}$   $\gamma_k$  увеличивается одновременно с коэффициентом модуляции  $\lambda$  и величиной  $a$  (с уменьшением  $\tau$ ).

Графики (рис. 3) позволяют определить искажения в цепях с переменным параметром, а также произвести расчет их с целью получения искажений, не превосходящих заданной величины.

Иногда нас могут интересовать не поток  $\Phi$  и заряд  $q$  в цепях II и III, а (как и в цепи I)

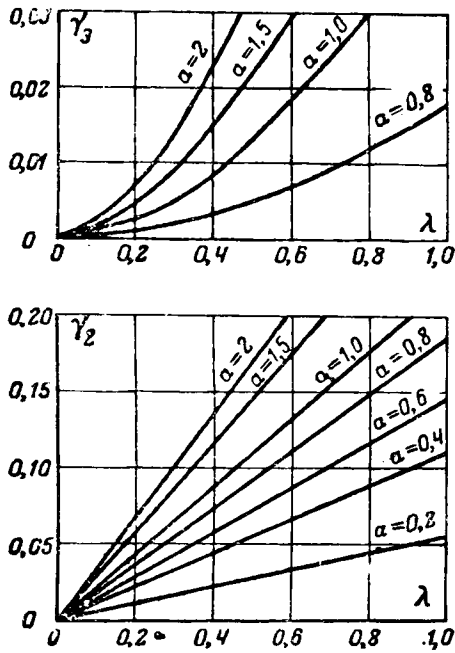


Рис. 3.  $\gamma_2, \gamma_3$  — отношения амплитуд второй и третьей гармоник к основной гармонике ряда (5) для установившегося процесса в зависимости от коэффициента модуляции  $\lambda$  и для различных значений  $\alpha$ .

ток  $i$ . Величина тока определяется весьма просто из соотношений, приведенных в табл. 1, по найденному выше решению  $y_1$ .

Значения токов в этих цепях приведены в табл. 2, где также указано среднее значение тока и амплитуды тока основной частоты в каждой цепи.

Так как согласно (5)

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= - \sum_{k=1}^{\infty} k [A_k \sin kx - B_k \cos kx] = \\ &= - \sum_{k=1}^{\infty} k M_k \sin(kx - \psi_k), \end{aligned}$$

то вычисление токов в цепях II и III, как видно из табл. 2 и выражения (13), производится по вышеприведенным графикам.

Таблица 2

Токи	Цепь I	II	III
$i(t)$	$I_0 y_1$	$I_0 \left[ 1 - \frac{1}{a} \frac{dy_1}{dx} \right]$	$I_0 \frac{1}{a_0} \frac{dy_1}{dx}$
$L_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$	$I_0 Y_0$	$I_0$	0
$I_1$	$I_0 M_1$	$I_0 \frac{M_1}{a}$	$I_0 \frac{M_1}{a}$

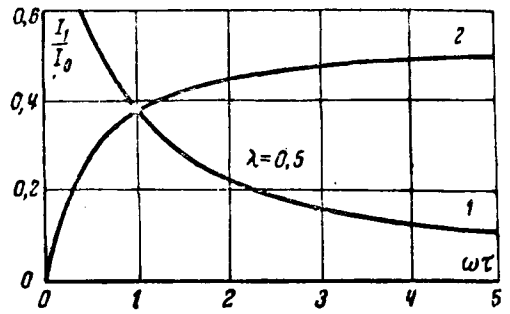


Рис. 4. Частотные характеристики при коэффициенте модуляции  $\lambda = 0,5$ .  
1 — цепь I; 2 — цепи II и III.

Из табл. 2 следует, что среднее значение тока в цепи I изменяется одновременно с  $\lambda$ , в цепи II оно постоянно, а в цепи III равно нулю.

Искажения, вносимые установившимся током в закон изменения переменного параметра, в цепи I меньше, чем в цепях II и III, так как

для цепи I  $\gamma_k = \frac{M_k}{M_1}$ , а для цепей II и III  $\gamma_k = k \frac{M_k}{M_1} \quad (k = 2, 3 \dots)$ .

Часто весьма важно установить зависимость амплитуды тока основной частоты изменения переменного параметра при постоянном коэффициенте модуляции переменного параметра ( $\lambda = \text{const}$ ).

Эта зависимость определяет частотные свойства цепей и может быть названа частотной характеристикой нерезонансных цепей с переменным параметром. Построение частотных характеристик производится на основании формул табл. 2 и графиков рис. 2.

На рис. 4 изображены частотные характеристики цепи I (кривая 1) и цепей II и III кривая (2) в безразмерных координатах  $\left( \frac{I}{I_0}, \omega\tau \right)$  для значения  $\lambda = 0,5$ .

Рассмотрим теперь переходный процесс

$$y_2 = K e^{-\int a(1 + \lambda \sin x) dx} \quad (13)$$

После очевидного интегрирования получаем:

$$y_2 = K e^{a\lambda \cos x} e^{-ax} \quad (14)$$

Произвольная постоянная  $K$  должна быть определена, исходя из начального условия  $x = 0, y = y_0$ . (15)

Если  $y_0 = 0$ , то переходный процесс рассматривается, как следствие включения источника напряжения в цепь. Если же  $y_0 = 1$ , то переходный процесс рассматривается, как следствие начала изменения переменного параметра при включенном источнике напряжения.

Определяя произвольную постоянную (см. приложение 2) и подставляя ее в уравнение переходного процесса (14), находим:

$$y_2 = - [Y_0 - y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k] e^{-a\lambda(1 - \cos x)} e^{-ax} \quad (16)$$



Для  $\lambda = 0$  получаем (при  $y_0 = 0$ )  $y_2 = -e^{-ax}$ , что соответствует переходному процессу в эквивалентных цепях с постоянными параметрами.

Из сравнения этих двух уравнений следует, что в отличие от цепей с постоянными параметрами в нерезонансных цепях с переменным параметром неstationарный процесс затухает не априодически, а колебательно. Однако, колебательный характер его проявляется лишь в том случае, когда  $a$  невелико, т. е. когда  $\tau$  и  $\omega$  велики, и тем резче, чем больше  $\lambda$ .

При больших значениях  $a$  член  $e^{-ax}$  успеет уменьшиться (при увеличении  $x$ , начиная с нуля) до весьма малой величины, в то время как член  $e^{-a\lambda(1-\cos x)}$  изменится незначительно по сравнению с единицей и практически, затухание будет происходить априодически. Предполагая, что переходный процесс прекращается, когда  $e^{-ax}$  достигнет значения, равного 0,1, длительность его найдем из соотношения:

$$a\tau_0 = 2,3 \text{ или } t_0 = 2,3\tau.$$

Если  $a \geq \frac{0,367}{n}$ , то в переходном процессе будет иметь место не менее чем  $n$  колебаний (см. приложение 3). Условием отсутствия колебаний будет  $a < 0,367$ .

Чем меньше  $\tau$ , тем меньше длительность переходного процесса. Но с уменьшением  $\tau$  увеличивается  $a$ , а следовательно, увеличиваются искажения  $\gamma_k$  ( $k=2, 3 \dots$ ) установившегося процесса.

Таким образом, требования, предъявляемые к цепям для получения малой длительности переходного процесса и малых искажений установившегося процесса, находятся в противоречии, которое частично может быть разрешено в каждом конкретном случае компромиссным путем.

Величина тока переходного процесса находится по формулам, приведенным в первой строке табл. 2, но с заменой в них  $y_1$  на  $y_2$ . Складывая уравнение установившегося (5) и переходного (16) процессов, получаем уравнение устанавливающегося процесса в окончательном виде:

$$y = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos kx + B_k \sin kx) - [Y_0 - y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k] e^{-a\lambda(1-\cos x)} e^{-ax}. \quad (17)$$

Пусть, например,  $a=1$  и  $\lambda=0,5$ . Определив значения  $Y_0$ ,  $A_k$  и  $B_k$  ( $k=1, 2, 3$ ) и подставляя их в уравнение (17), построим кривую устанавливающегося процесса (рис. 5).

Пунктирной кривой на рисунке показан закон изменения переменного параметра, а сплошной — устанавливающийся процесс.

Кривая 1 соответствует устанавливающемуся процессу при включении источника напряжения в цепь ( $y_0=0$ ), а кривая 2 — при возникновении

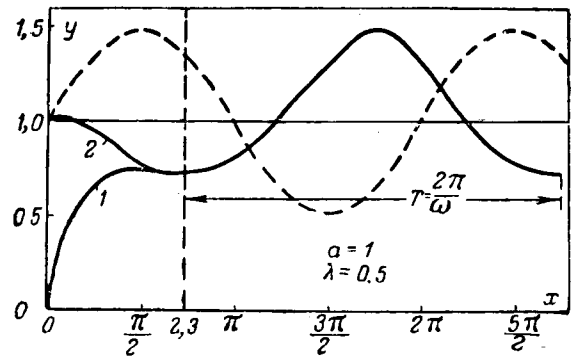


Рис. 5. Устанавливающийся процесс (сплошные кривые) при коэффициенте модуляции  $\lambda = 0,5$  и  $a = 1$ . 1 — случай включения в цепь источника напряжения ( $y_0 = 0$ ); 2 — случай возникновения изменения параметра при включении источника напряжения ( $y = 1$ ). Вертикальная пунктирная линия разделяет области переходного и установившегося процесса (пунктирной кривой показан закон изменения переменного параметра).

изменения переменного параметра и включенном источнике напряжения ( $y_0 = 1$ ). Область установления от области установившегося процесса отделена вертикальной пунктирной прямой. Установившийся процесс почти противоположен по фазе закону изменения переменного параметра и искажен по форме относительно него. Степень искажения согласно графикам рис. 3 оценивается величинами  $\gamma_2 = 0,125$ ,  $\gamma_3 = 0,013$ .

Уравнение (17) полностью решает поставленную задачу и позволяет определить все характеристики нерезонансных цепей с переменным параметром (ток, напряжение, энергетические соотношения и т. д.). Однако, здесь мы не будем касаться этого.

В заключение отметим, что применение безразмерных величин во всех основных расчетных соотношениях и графиках придает им универсальность и позволяет весьма просто рассчитывать любую нерезонансную цепь с переменным параметром и исследовать электрические процессы в ней.

### ПРИЛОЖЕНИЕ I

Производя элементарное интегрирование в выражении (3), получаем:

$$y_1 = e^{-ax} e^{a\lambda \cos x} a \int e^{ax} e^{-a\lambda \cos x} dx. \quad (18)$$

Для вычисления интеграла, входящего в уравнение (18), воспользуемся, аналогично тому, как это сделал Помей [Л. 9], известным разложением Неймана [Л. 16]:

$$e^{\pm a\lambda \cos x} = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n I_n(\pm a\lambda) \cos nx, \quad (19)$$

где

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & \text{при } n=0 \\ 2 & \text{при } n>0 \end{cases}$$

$I_n(a\lambda)$  — функция Бесселя первого рода мнимого аргумента. Подставляя  $e^{-a\lambda \cos x}$  из (19) в интеграл, входящий в решение (18), получим:

$$\int e^{ax} e^{-a\lambda \cos x} dx = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n I_n(a\lambda) \int e^{-ax} \cos nx dx, \quad (20)$$

так как

$$I_n(-a\lambda) = (-1)^n I_n(a\lambda).$$

Но интегралы, стоящие в правой части (20), равны

$$\int e^{-ax} \cos nx dx = e^{-ax} \frac{a \cos nx + n \sin nx}{a^2 + n^2}.$$

Следовательно,

$$\int e^{-ax} e^{-a\lambda \cos x} dx = e^{-ax} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \varepsilon_n I_n(a\lambda) \frac{a \cos nx + n \sin nx}{a^2 + n^2}. \quad (21)$$

Заменяя интеграл в (18) его значением из (21), а также  $e^{a\lambda \cos x}$  из (19), после очевидных тригонометрических преобразований получаем:

$$y_1 = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^8 (-1)^n \left\{ d_{n,m}^{(1)} [\cos(n+m)x - \cos(n-m)x] + d_{n,m}^{(2)} [\sin(n+m)x + \sin(n-m)x] \right\}, \quad (22)$$

где обозначено

$$d_{n,m}^{(1)} = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_m}{2} \frac{a^2}{a^2 + n^2} I_n(a\lambda) I_m(a\lambda), \quad d_{n,m}^{(2)} = \frac{n}{a} d_{n,m}^{(1)}. \quad (23)$$

Эти коэффициенты весьма просто подсчитываются по таблицам функций Бесселя мнимого аргумента [Л. 17].

Приведем выражение (22) для  $y_1$  к упорядоченному тригонометрическому ряду вида

$$y_1 = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos kx + B_k \sin kx.$$

Из выражения (22) следует, что постоянная составляющая  $Y_0$  будет составлена из коэффициентов  $d_{n,m}^{(1)}$  при  $\cos(n+m)x$ , удовлетворяющих условию  $n=m=0$ , и при  $\cos(n-m)x$ , удовлетворяющих условию  $n=m$ , т. е.

$$Y_0 = 2 d_{0,0}^{(1)} + \sum_{r=1}^{\infty} d_{r,r}^{(1)}.$$

Амплитуды гармоник  $A_k$  и  $B_k$  будут состоять из коэффициентов  $d_{n,m}^{(1)}$  и соответственно  $d_{n,m}^{(2)}$  при  $\frac{\cos(n+m)x}{\sin(n+m)x}$ , удовлетворяющих условию  $n+m=k$ , и при  $\frac{\cos(n-m)x}{\sin(n-m)x}$ , удовлетворяющих условиям  $n-m=k$ , т. е.

$$A_k = \sum_{r=1}^k (-1)^r d_{r,k-r}^{(1)} + \sum_{r=0}^{\infty} \left\{ (-1)^{r+k} d_{r+k,r}^{(1)} + (-1)^r d_{r,r+k}^{(1)} \right\},$$

$$B_k = \sum_{r=0}^k (-1)^r d_{r,k-r}^{(2)} + \sum_{r=0}^{\infty} \left\{ (-1)^r d_{r+k,r}^{(2)} - (-1)^r d_{r,r+k}^{(2)} \right\}.$$

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Общее решение дифференциального уравнения (1) будет:

$$y = y_1 + y_2, \quad (24)$$

где  $y_1$  определяется формулой (5), а  $y_2$  — формулой (14). При  $x=0$  согласно (15)  $y=y_0$ , следовательно,

$$y_{10} + y_{20} = y_0. \quad (25)$$

Но при  $x=0$  из (5) и (14) находим:

$$y_{10} = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \quad (26)$$

и

$$y_{20} = K e^{a\lambda}. \quad (27)$$

Подставляя (26) и (27) в (25), получаем:

$$Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k + K e^{a\lambda} = y_0.$$

откуда

$$K = -[Y_0 - y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k] e^{-a\lambda}.$$

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Член  $e^{-a\lambda(1-\cos x)}$  изменяется периодически от 1 (при  $x=2\pi n$ ) до  $e^{-2a\lambda}$  [при  $x=(2n-1)\pi$ ] с периодом, равным  $2\pi$ . Переходный процесс прекращается при  $x=x_0 = \frac{2,3}{a}$ . Следовательно, за время, равное длительности переходного периода, совершится  $n$  колебаний, если

$$x_0 = \frac{2,3}{a} \geq 2\pi n.$$

Откуда

$$a \leq \frac{2,3}{2\pi n} = \frac{0,367}{n}.$$

#### Литература

1. H. Barkhausen. Das Problem der Schwingungserzeugung, Leipzig, 1937.
2. E. Waetzmann. Physikalische Zeitschrift, Bd XV, S. 638, № 22, 1914.
3. B. Liebowitz. Proceedings of the Institut of Radio Engineering, p. 27, v. 3, № 3, 1915.
4. E. Guillemin. Communication Networks, New-York, v. I, 1931.
5. А. Сапожников. Известия электропромышленности слабого тока, стр. 27, № 2, 1937.
6. Т. Ромеу. Revue générale de l'électricité, v. XXXI, p. 475, № 15, 1932.
7. E. Wente. Physical Review, p. 39, v. 10, № 1, 1917.
8. А. И. Яковлев. Телеграфия и телефония без проводов, стр. 274, № 48, 1928.
9. Т. Ромеу. Revue Générale de l'électricité, v. XXXI, p. 235, № 8, 1932.
10. O. Schemmrich. Archiv für Elektrotechnik. Bd XXXIII, S. 229, № 4, 1939.
11. Т. Ромеу. Revue Générale de l'Electricité. v. XXXI, p. 237, № 8 1932.
12. П. Стендер. Известия электропромышленности слабого тока, стр. 29, № 8—9, 1936.
13. Н. Головин. Акустические артиллерийские приборы, Москва, ч. II, 1941.
14. W. Ernsthausen. Archiv für Elektrotechnik, Bd XXXI, S. 487, № 7, 1937.
15. W. Coulthard. Transient in Electric Circuits, London, 1941.
16. Р. О. Кузьмин. Бесселевы функции, Москва, 1935.
17. Е. Янке, Ф. Эмде. Таблицы функций, Харьков—Киев, 1934.



### Высокоинтенсивная дуга малой мощности

Кандидат техн. наук М. В. ВОРОПАНОВ

Всесоюзный электротехнический институт

Основной и определяющей характеристикой кинопроекторных углей постоянного тока является яркость положительного кратера. Увеличить освещенность экрана, улучшить степень равномерности освещенности, к которой в настоящее время предъявляются повышенные требования, возможно только путем увеличения яркости кратера и улучшения распределения этой яркости по кратеру.

Высокоинтенсивные дуги малой мощности для целей кинопроекции получили за границей широкое применение [Л. 1]. Угли эксплуатируются при средней скорости сгорания положительного угля порядка 200 мм/ч в лампах на ток 30 А и выше. В Советском Союзе применение постоянного тока в малых и средних кинотеатрах имеет достаточно широкое распространение. Для этой цели служат лампы ТОМП-4 и КЗС-22, работающие с простыми пламенными углями.

Очевиден тот интерес, который может представить для кинопроекции использование углей интенсивного горения малой мощности, тем более, что мощные угли интенсивного горения прочно вошли в практику больших кинотеатров.

**Яркостные характеристики положительного кратера.** Яркостные характеристики положительного кратера зависят от радиуса рассматриваемой зоны. Характеристики зависят также от угла  $\varphi$ , под которым наблюдается кратер. В итоге, кривые  $B(r, \varphi)$  дают достаточные данные о яркостном теле положительного кратера, необходимые для расчета светооптической системы кинопроектора.

Полные яркостные характеристики положительного кратера углей интенсивного горения малой мощности были сняты в условиях эксперимента, подробно описанного в нашей работе [Л. 2] о стилибамперных характеристиках положительного кратера. Зональная яркость по всем зонам кратера измерялась на специальной яркостной установке. Диаметр центральной зоны равнялся 1 мм. Каждая последующая кольцевая концентрическая зона имела диаметр на 1 мм больше, чем предыдущая зона. Малые размеры измеряемых зон кратера обеспечивали с достаточной точностью возможность исследования яркости кратера углей малых диаметров с их относительно малыми абсолютными значениями яркости и более резким спаданием значений яркости от центра к краям кратера. Для получения

яркостных характеристик все измерения яркости кратера произведены в шести направлениях к оси положительного угля: при  $\varphi = 5^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$  и  $55^\circ$  в горизонтальной плоскости.

Полные яркостные характеристики положительного кратера (рис. 1) получены для углей интенсивного горения малой мощности с фитилем диаметром 2,5 мм типа 8—40, где первая цифра означает диаметр угля, выраженный в мм, а вторая—номинальный ток в А. Эти угли близки по своему внешнему диаметру простым пламенным углям и имеют тот же номинальный ток.

Из рис. 1 видно, что в направлении  $\varphi = 55^\circ$  от оси положительного угля значения яркости кратера всегда меньше (на 15% и более), соответствующих значений яркости при  $\varphi = 5^\circ$ . Резкое спадание яркости кратера при  $r = 3$  мм объясняется тем, что внешний диаметр этой зоны совпадает с диаметром обгоревшего конца угля, в последующих зонах измеряется яркость только пламени дуги. По яркости центральной зоны кратера (41 ksb) наши опытные угли выгодно отличаются от немецких углей того же диаметра, которые по данным Патцельта [Л. 1] при токе 43 А дают максимальную яркость кратера 36 ksb.

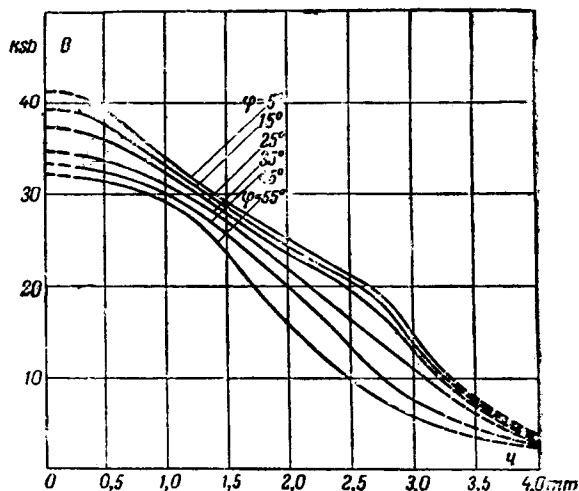


Рис. 1. Полные яркостные характеристики  $B(r, \varphi)$  положительного кратера высокоинтенсивной дуги малой мощности с углями типа 8—40.

С целью выяснения влияния диаметра фитиля положительного угля на форму яркостной кривой положительного кратера были сняты кривые  $B(r)$  углей типа 8—40 с разными диаметрами фитиля  $d_{\phi} = 2,0, 2,5, 3,0$  и  $4,0$  мм. Кривые для направлений  $\varphi = 5^\circ$  и  $\varphi = 55^\circ$  представлены на рис. 2 и 3.

В табл. 1 сведены данные об электрическом режиме горения дуги с указанными углями, глубине кратера и скорости сгорания положительного угля при постоянной длине дуги  $L = 10$  мм.

Таблица 1

Диаметр, мм		Электрический режим дуги		Глубина кратера мм	Скорость сгорания, мм/ч
угля	фитиля	Ток, А	Напряжение, В		
8	2,0	$40 \pm 2$	$61 \pm 2$	3,7	197
8	2,5	$40 \pm 2$	$55 \pm 2$	3,2	215
8	3,0	$40 \pm 2$	$55 \pm 2$	2,2	171
8	4,0	$40 \pm 2$	$45 \pm 2$	0,2	143

Рассматривая данные табл. 1 и яркостные кривые  $B(r)$  рис. 2 при  $\varphi = 5^\circ$ , можно отметить, что с уменьшением в известных пределах диаметра фитиля и повышением яркости центральной зоны кратера одновременно увеличивается яркость и внешних зон кратера, т. е. с уменьшением  $d_{\phi}$  кривая  $B(r)$  не становится более острой. Следует отметить более пологий ход яркостной кривой углей с максимальным диаметром 4 мм. Скорость сгорания положительного угля согласуется со значениями яркости кратера.

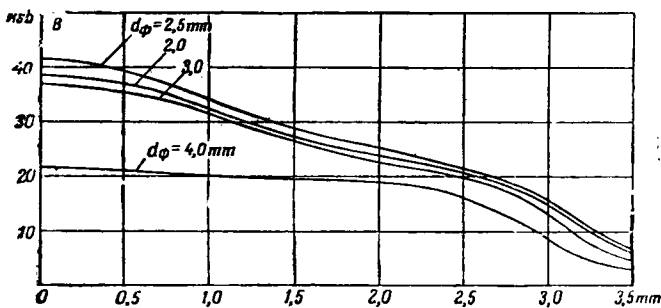


Рис. 2. Яркостные характеристики  $B(r)$  положительного кратера углей типа 8—40 с различными диаметрами фитиля  $d_{\phi}$  при  $\varphi = 5^\circ$ .

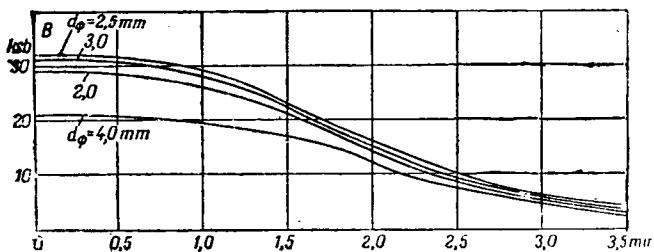


Рис. 3. Яркостные характеристики  $B(r)$  положительного кратера углей типа 8—40 с различными диаметрами фитиля  $d_{\phi}$  при  $\varphi = 55^\circ$ .

Из кривых рис. 2 и рис. 3 с очевидностью следует, что угли интенсивного горения типа 8—40 с диаметром фитиля 2,5 мм, обладая максимальной яркостью центральной зоны кратера, вместе с тем имеют максимальные значения яркости и для внешних зон кратера в пределах угла  $\varphi$  от  $5^\circ$  до  $55^\circ$ .

При  $d_{\phi} = 2$  мм яркость центральной зоны кратера, равным образом и яркость внешних зон кратера, соответственно меньше, чем яркость кратера углей оптимального варианта ( $d_{\phi} = 2,5$  мм), но превосходит яркость кратера углей с  $d_{\phi} = 3$  мм. Понижение яркости кратера при минимальном диаметре фитиля, повидимому, следует объяснить относительно малой концентрацией в кратере паров редкоземельных металлов.

Следует отметить относительно неравномерное изменение яркости кратера в зависимости от диаметра фитиля. Если при изменении диаметра фитиля с 2 до 3 мм наблюдается незначительное изменение яркости, то при изменении диаметра с 3 до 4 мм соответствующее изменение значений яркости кратера будет значительно больше.

Кривые для направления  $\varphi = 55^\circ$  (рис. 3) аналогичны кривым рис. 2. Они отличаются только более низкими абсолютными значениями яркости кратера. Кривые  $B(r)$  рис. 3 имеют ту особенность, что яркостная кривая углей с минимальным диаметром фитиля 2 мм располагается ниже не только оптимальной кривой, но ниже и кривой углей с диаметром фитиля 3 мм, в чем также обнаруживается дефектность этих углей.

Целесообразно сопоставить яркостные характеристики положительного кратера простых углеродистых фитильных углей равного диаметра или работающих при равной силе тока с рассмотренными углями интенсивного горения.

Кратер простой дуги, как температурный излучатель, при нормальной нагрузке порядка  $0,3$  А/мм<sup>2</sup> обладает постоянной яркостью порядка 16 ksb, представляя собой светящийся диск с распределением сил света, близким к закону Ламберта. Был предложен ряд эмпирических формул для подсчета размеров кратера положительного угля (площади сечения и диаметра). Во всех этих формулах размеры кратера в основном определяются в зависимости от тока дуги. В табл. 2 приведены расчетные значения диаметра кратера простых углей при токе дуги в 15 А и 40 А, полученные по указанным эмпирическим формулам.

Таблица 2

Метод подсчета	Расчетные значения диаметра положительного кратера, мм	
	Ток дуги 15 А	Ток дуги 40 А
Ж. Рея [Л. 4] . . . . .	3,8	7,9
Патцельта [Л. 5] . . . . .	4,9	8,0
Патцельта [Л. 1] . . . . .	5,8	9,5
Мотта и Кунцмана [Л. 6, 7] . . . . .	5,5	9,3

На рис. 4 наряду с яркостной кривой положительного кратера углей интенсивного горения типа 8—40 оптимального варианта приведены яркостные кривые простых фитильных углей диаметром 8 и 13 мм, соответственно при нагрузке дуги 15 и 40 А. Простые угли работали при плотности тока 0,3 А/мм<sup>2</sup> и при длине дуги, равной длине дуги с углями интенсивного горения (10 мм). Яркостные кривые всех трех типов углей сняты в направлении  $\varphi = 15^\circ$  к оси положительного угля.

Кривые рис. 4 позволяют заключить, что при одном и том же токе высокоинтенсивная дуга в два раза превосходит простую дугу по яркости своего кратера. Следовательно, высокоинтенсивная дуга превосходит простую дугу и по величине светового потока.

**Литература**

1. F. Patzelt. Klottechnik, № 7, 1947.  
2. М. В. Воропанов. Кинофототехника, № 3, 1941.

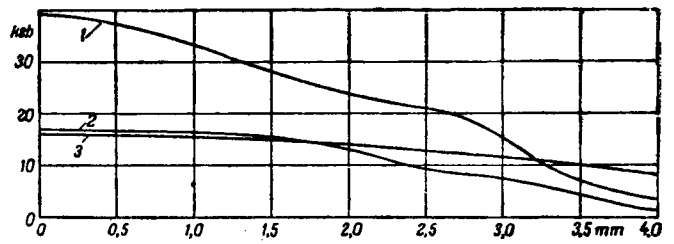


Рис. 4. Яркостные характеристики  $B(r)$  положительного кратера углей различных типов при  $\varphi = 15^\circ$ .  
1—высокоинтенсивные угли типа 8—40 с диаметром фитиля 2,5 мм  
2, 3—простые фитильные угли типа 8—15 (кривая 2) и 13—40.

3. М. В. Воропанов. Бюллетень ВЭИ, № 1, 1941.  
4. J. Rey. De la portée des projecteurs de lumière électrique, Paris, 1915.  
5. F. Patzelt. Цитир. Н. Schering Handbuch der Lichttechnik, I, 1938, Berlin.  
6. W. Mott and W. Kunzmann. Цитир. W. Kalb El. Eng. v. 53, № 3, 1937.  
7. D. Joy and A. Downes. JMPE, v. 16, June, 1931.



## Об эквивалентной схеме замещения электролитического конденсатора

Кандидат техн. наук В. С. НЕЛЕПЕЦ

Ленинград

Ряд исследователей [Л. 1—4] в своих работах касался вопроса об эквивалентной схеме замещения электролитического конденсатора.

Однако, авторы перечисленных работ при составлении эквивалентной схемы замещения рассматривали электролитические конденсаторы, как некоторые обособленные приборы вне связи со схемами, в которых эти конденсаторы применяются. Между тем, почти во всех схемах, где используются электролитические конденсаторы, имеет место приложение к ним, помимо переменных напряжений, еще некоторого постоянного (поляризующего) напряжения, именуемого рабочим. Рассматривая типовую вольтамперную характеристику электролитического конденсатора, представленную на рис. 1, видим, что приложение рабочего напряжения  $U_{\text{раб}}$  определяет рабочую точку  $a$  на характеристике  $i = f(U)$ .

Последняя аналитически может быть выражена:

$$i = f(U) = a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + \dots \quad (1)$$

Если к конденсатору с подобной вольтамперной характеристикой приложено некоторое переменное напряжение  $u$ , при рабочем напряжении  $U_{\text{раб}} = \text{const}$ , и, следовательно рабочей точкой будет точка  $a$  (рис. 1), то после разложения (1) в ряд Тэйлора и соответствующих

подстановок среднее значение тока через конденсатор за период определится:

$$i_{cp} = i_0 + \frac{di}{du} \frac{1}{T} \int_0^T u dt + \frac{1}{2} \frac{d^2i}{du^2} \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt + \dots + \frac{1}{6} \frac{d^3i}{du^3} \frac{1}{T} \int_0^T u^3 dt + \dots \quad (2)$$

Приняв в подинтегральных функциях  $u = U_m \sin \omega t$ , убедимся, что в рассматриваемой системе имеет место выпрямление, дающее в результате приложения синусоидального напряжения постоянную составляющую тока. Таким об-

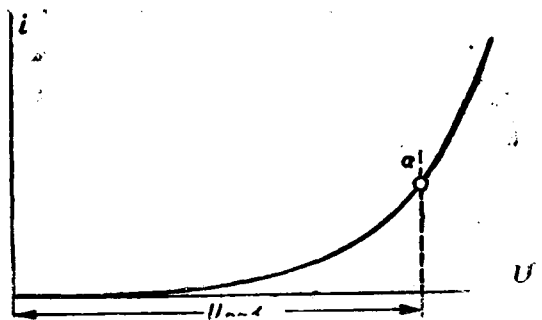


Рис. 1. Вольтамперная характеристика электролитического конденсатора.

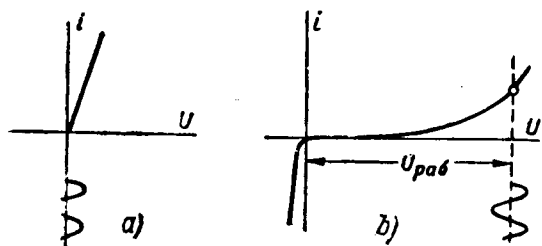


Рис. 2. Вольтамперные характеристики.  
а — нагревающий элемент в опыте Гюнтершульце-Линдемманна;  
б — электролитический конденсатор.

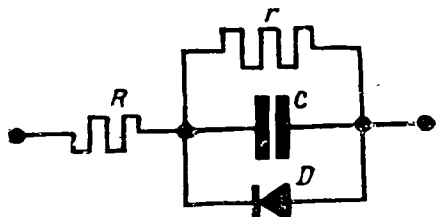


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения электролитического конденсатора

разом, эквивалентная схема системы должна содержать некоторый вентильный элемент.

Схемы Линдера и Килинского не содержат такого элемента и все процессы, связанные с односторонней проводимостью, не могут быть изучены с помощью этих эквивалентных схем.

В работе Гюнтершульце-Линдемманна дается эквивалентная схема, которую Гюнтершульце воспроизвел при помощи конденсатора и сопротивления. Выпрямляющее действие элемента с односторонней проводимостью выполнялось ртутной дугой, вольтамперная характеристика элемента униполярной проводимости представлена на рис. 2а. Здесь кривая переменного напряжения прокладывается к началу координат, что противоречит условиям эксплуатации электролитического конденсатора, о которых упоминалось выше. В действительности рабочая точка смещена по вольтамперной кривой от начала координат на величину рабочего напряжения. Следовательно, характеристика рис. 2а не пригодна для интересующего нас случая и должна быть заменена изображенной на рис. 2б.

В данной работе была поставлена задача создать такую эквивалентную схему замещения конденсатора, которая соответствовала бы его рабочему режиму. Очевидно, схема должна содержать помимо емкости и сопротивлений еще элемент, который воспроизводил бы эффект униполярной проводимости, следуя закону (1). Составленная принципиальная схема замещения показана на рис. 3, где:  $C$  — емкость конденсатора;  $k$  — последовательное сопротивление (эквивалентное потерям);  $r$  — сопротивление, эквивалентное утечкам;  $D$  — элемент униполярной проводимости.

Все элементы схемы легко выполнимы, кроме  $D$ . Во-первых, необходимо, чтобы вольтамперная характеристика элемента  $D$  наиболее близко подходила к (1). Во-вторых, включение такого элемента в общую схему не должно вызвать како-

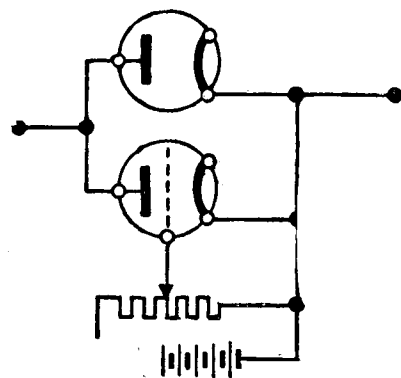


Рис. 4. Схема нагревающего элемента в схеме рис. 3.

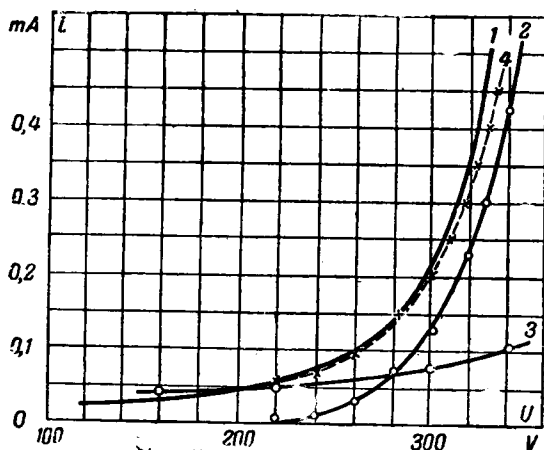


Рис. 5. Вольтамперные характеристики.  
1 — электролитический конденсатор; 2 — триод; 3 — диод; 4 — диод и триод совместно.

го-либо дополнительного эффекта в схеме. С этой целью была сделана попытка найти электронную лампу, которая обладала бы характеристикой  $i_a = f(U_a)$ , эквивалентной вольтамперной характеристике конденсатора. В результате экспериментов вопрос был решен сочетанием двух ламп — диода и триода, соединенных параллельно. Подбором режима накала ламп было выбрано нужное сопротивление постоянному току каждой ветви; напряжение смещения на сетке триода дополнительно определяло начало и форму кривой  $i_a = f(U_a)$  триода. Суммарная кривая токов обеих ламп воспроизводит вольтамперную характеристику электролитического конденсатора (рис. 5). Следовательно, вводя приведенную на рис. 4 комбинацию в схему рис. 3, получаем в ней точное воспроизведение электрических параметров электролитического конденсатора. Следует оговорить, что выполненная таким образом эквивалентная схема не является универсальной для широкого диапазона частот.

#### Литература

1. L. Linder. ENT, № 42, 1940.
2. E. Kilinski. ENT, v. 16, № 7, 1939.
3. F. W. Godsey. TAECs, № 61, 1932.
4. A. W. Günterschulze, R. Lindemann. Phys. Zeitschr. № 15, 1914.



# Динамический расчет приемника частотно-импульсного телеизмерения

Кандидат техн. наук С. А. ГИНЗБУРГ

Москва

Принципиальная схема простейшего приемника частотно-импульсного телеизмерения показана на рис. 1. Легко видеть, что средний ток, протекающий через указательный прибор, приближенно равен:

$$i_{cp} = 2Ucf, \quad (1)$$

где  $f$  — частота импульсов в приемном реле  $P$ .

Так как в действительности заряд конденсатора не успевает закончиться за период между переключениями якоря реле, то истинный ток будет несколько меньше. Относительное уменьшение его равняется:

$$\rho = \frac{\Delta i_{cp}}{i_{cp}} = e^{-\frac{1}{2fRc}}. \quad (2)$$

При этом отношение максимального значения тока к среднему его значению

$$\eta = \frac{I_{max}}{i_{cp}} = \frac{1}{2fRc} = -\ln \rho. \quad (3)$$

С точки зрения равномерности шкалы прибора и возможности суммирования токов от ряда приемников  $\rho$  должно быть минимальным. Если при номинальной частоте  $\rho = 0,5\%$ , то при 20% от номинальной частоты  $\eta = 26,5$ , что соответствует весьма тяжелым условиям для работы указательного прибора.

Трудность создания приемника при номинальной частоте порядка  $f = 5$  импульсов в секунду заключается в необходимости получения малых колебаний стрелки при острых пиках тока и одновременном обеспечении достаточно малого времени успокоения. Обычно применяемые сглаживающие контуры вызывают значительное отклонение от пропорциональности между средним током и частотой импульсов и являются часто источником дополнительных погрешностей.

Ниже дается приближенный метод расчета динамических параметров магнито-электрического прибора в схеме простейшего приемника частотно-импульсного телеизмерения по рис. 1. Работы же предшествующих авторов ограничивались в основном лишь анализом динамики в частных случаях [Л. 1, 2].

В основе метода расчета лежат следующие допущения: 1) действительный импульс зарядного тока заменяется импульсивной функцией Хевисайда-Дирака первого порядка; 2) в расчет принимается только первая гармоника ряда идеализированных импульсов; 3) время успокоения определяется точным графо-аналитическим методом.

Если разложить ряд импульсов зарядного

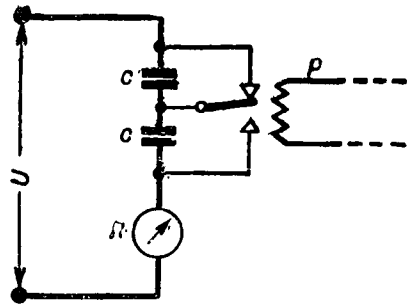


Рис. 1. Принципиальная схема приемника.

тока, протекающих через прибор, на гармонические составляющие, то амплитуда гармоники порядка  $m$  будет иметь вид:

$$A_m = \frac{I_{max}}{\pi \sqrt{\left(\frac{I_{max}}{2\pi i_{cp}}\right)^2 + m^2}}. \quad (4)$$

Чем меньшим желательно иметь  $\rho$ , тем большим должно быть  $\eta = \frac{I_{max}}{i_{cp}}$ , а при постоянной величине  $i_{cp}$ , тем большим должен быть  $I_{max}$ . Положив в пределе  $I_{max} = \infty$ , получим импульсивную функцию Хевисайда-Дирака первого порядка, т. е. импульс бесконечно большой по амплитуде и имеющий конечную площадь или физически — ток заряда конденсатора через бесконечно малое сопротивление [Л. 3].

Для этой функции

$$\lim_{I_{max} \rightarrow \infty} A_m = 2i_{cp}, \quad (5)$$

т. е. амплитуды всех гармоник одинаковы и равны удвоенному среднему току.

Фаза  $m$ -й гармоники ряда идеализированных импульсов

$$\varphi_m = \arctg \frac{I_{max}}{2\pi i_{cp} m} = \frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

Из этого уравнения следует, что фазы всех гармоник также одинаковы. Таким образом, гармоника порядка  $m$  функции

$$i_m = 2i_{cp} \sin \left( zm\tau + \frac{\pi}{2} \right) = 2i_{cp} \cos zm\tau, \quad (7)$$

где  $z = \frac{\omega}{\omega_0}$ , а  $\omega$  и  $\omega_0$  — круговые частоты соответственно приложенной силы и собственных ухнезатающих колебаний.

Как указано выше, в расчет принимается лишь первая гармоника приложенных импульсов. Для того, чтобы оценить ошибку, вызываемую этим приемом, проверим, какая величина добавляется к амплитуде колебаний от первой гармоники в результате действия всех остальных гармоник.

Амплитуда гармоники порядка  $m$  вынужденных колебаний подвижной части магнитоэлектрического указательного прибора под действием  $m$  й гармоники тока составит:

$$a_{ma} = \frac{2\alpha_{cp}}{\sqrt{(z^2 m^2 - 1)^2 + 4\beta^2 z^2 m^2}}, \quad (8)$$

где  $\alpha_{cp}$  — отклонение, вызываемое током  $i_{cp}$ , а  $\beta$  — степень успокоения подвижной части прибора.

Обычно величина  $\beta$  для указательного прибора близка к единице, а для приемника телеизмерения может достигать значения, равного 2—3. Для упрощения дальнейшего расчета примем  $\beta=1$ , чем внесем лишь незначительную погрешность в первом случае и преувеличим  $a_{ma}$  во втором. Так как при номинальной частоте  $f=5$  импульсов в секунду обычно  $z=5-10$ , то единицей в знаменателе после преобразования его можно пренебречь. Тогда колебание подвижной части прибора под действием  $m$ -й гармоники тока составит:

$$\begin{aligned} a_m &= \frac{2\alpha_{cp}}{z^2 m^2} \sin\left(zm\tau + \frac{\pi}{2} - \psi_m\right) = \\ &= \frac{2\alpha_{cp}}{z^2 m^2} \cos(zm\tau - \psi_m), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\psi_m$  — фаза вынужденных колебаний.

Амплитуда колебаний от первой гармоники достигается в моменты времени (в пределах от 0 до  $2\pi$ ):

$$\tau_1 = \frac{\psi_1}{z} \quad \text{и} \quad \tau_2 = \frac{\psi_1 + \pi}{z}.$$

Отношение отклонения под действием  $m$  й гармоники к амплитуде колебаний под действием первой гармоники для момента времени  $\tau_1$

$$\mu_1 = \frac{a_m(\tau = \tau_1)}{a_a} = \frac{1}{m^2} \cos \sigma, \quad (10)$$

где  $\sigma = m\psi_1 - \psi_m$ .

Для момента времени  $\tau_2$

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{a_m(\tau = \tau_2)}{(-\alpha_{1a})} = \frac{1}{m^2} \cos(m\pi + \sigma) = \\ &= (-1)^{m+1} \frac{1}{m^2} \cos \sigma. \end{aligned} \quad (11)$$

Однако, интересно не отклонение колеблющегося указателя от положения, соответствующего среднему току, а половина общего размаха колебаний, т. е. половина расстояния между крайними положениями стрелки. Отношение этой величины, обусловленной высшими гармониче-

скими, к амплитуде колебаний от первой гармоники импульсов составляет:

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} = [1 + (-1)^{m+1}] \frac{1}{2m^2} \cos \sigma. \quad (12)$$

Отсюда следует, что четные гармоники на амплитуду колебаний не влияют и их можно в расчет не принимать, а влияние нечетных гармоник определяется выражением (10). Относительное суммарное воздействие всех высших гармонических определяется неравенством:

$$R < \sum_1^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} = \frac{\pi^2}{8} - 1 = 0,234. \quad (13)$$

Таким образом, погрешность при отбрасывании всех высших гармонических безусловно меньше 23,4%.

Экспериментальное исследование, поставленное на гальванометре с собственным периодом  $T_0=6$  sec. для  $\beta=1$  и 2, при  $z=3-10$  показало, что в действительности погрешность значительно меньше и лежит в пределах 0—10% (точность, вполне достаточная для определения колебаний указателя). Это указывает на применимость разработанного метода для расчета приемника.

Кривая времени успокоения прибора в единицах  $\tau = \omega_0 t$  в зависимости от степени успокоения  $\beta$  рассчитана графо-аналитически для случая успокоения до 2% от первоначального отклонения.

Кривая  $\tau_y = \varphi_1[\beta]$  имеет своеобразный характер обладает рядом разрывов непрерывности в периодической части, соответствующих  $\beta=0,78; 0,53; 0,383; 0,296$  и т. д. Вид этой кривой, приведенной также Разумовским без вывода, и Gerzon-wicz с приближенным выводом, подобен функции  $t_y = \varphi_2[\beta]$  на рис. 2 и может быть воспроизведен из кривых этого рисунка, учитывая равенство  $\tau_y = \frac{2\pi}{T_0} t_y$  [Л. 4, 5]. Кривая  $\tau_y = \varphi_1[\beta]$  обладает резким минимумом  $\tau_{min}=3,6$  при  $\beta=0,78$ . Экспериментальная проверка кривой времени успокоения дала прекрасное совпадение с теоретическими данными.

К приемнику частотно-импульсного телеизмерения предъявляется требование чтобы амплитуда колебаний указателя при 20% от номинального показания не превышала 0,5% от последнего; при этом время успокоения должно быть возможно меньшим. Для оценки первого требования вводим величину отношения амплитуды приложенного колебания к амплитуде вынужденного.

$$K = \frac{2\alpha_{cp}}{\alpha_a} = \sqrt{(z^2 - 1)^2 + 4\beta^2 z^2}. \quad (14)$$

В рассматриваемом случае

$$K = \frac{2 \cdot 0,2\alpha_N}{0,005\alpha_N} = 80. \quad (15)$$



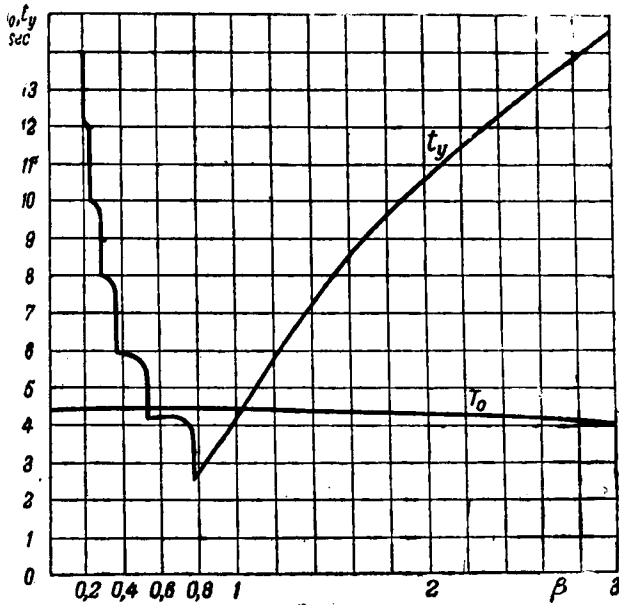


Рис. 2. Зависимость собственного периода  $T_0$  и времени успокоения  $t_y$  от степени успокоения  $\beta$ .

Чем ниже номинальная частота импульса  $f_N$ , при которой это требование выполняется, и чем меньше время успокоения  $t_y$ , тем выше динамическая добротность системы.

Последнюю можно выразить равенством:

$$Q = \frac{10}{f_N t_y} \quad (16)$$

(коэффициент 10 введен для удобства вычисления). Выражение (16) может быть преобразовано следующим образом:

$$Q = \frac{8\pi}{z \tau_y}, \quad (17)$$

где  $z$  — отношение частоты при двадцатипроцентном показании к собственной незатухающей частоте.

Определяя  $z = \varphi_3(\beta)$  при  $K=80$  из уравнения (14) и зная  $\tau_y = \varphi_1(\beta)$ , можно построить  $Q = \varphi_4(\beta)$ , что и сделано на рис. 3. Динамическая добротность имеет резкий максимум  $Q_{\max} = 0,79$  при  $\beta = 0,78$ .

Собственный период  $T_0$  и время успокоения  $t_y$  могут быть определены по формулам:

$$T_0 = 2,5 \frac{\sqrt{1 - 2\beta + \sqrt{4\beta^2(\beta^2 - 1) + K^2}}}{f_N} \approx 2,5 \frac{\sqrt{K}}{f_N}, \quad (18)$$

$$t_y = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \tau_y. \quad (19)$$

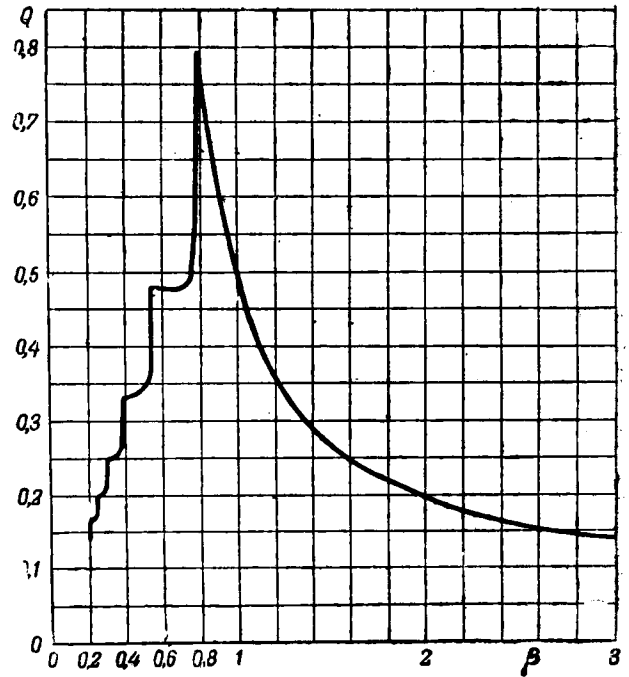


Рис. 3. Зависимость динамической добротности  $Q$  от степени успокоения  $\beta$ .

Для номинальной частоты  $f_N = 5$  импульсов в секунду и  $K = 80$  зависимости  $T_0$  и  $t_y$  от  $\beta$  построены на рис. 2.

Высокая механическая добротность по Кейнату для нормального магнито-электрического прибора не может быть совмещена с высокой динамической добротностью. В целях удовлетворения обоих требований целесообразно сконструировать специальный прибор для частотно-импульсного приемника с удлиненной в радиальном направлении подвижной частью при сохранении неизменного веса ее [Л. 6].

### Литература

1. E. Hudec. Über die Messung sehr kleiner Frequenzen und ihre Anwendung für Fernmessungen. ETZ, S. 380, H. 12, 1931.
2. М. И. Парецкий. Об импульсных методах телеизмерения и суммирования. Электричество, № 23, 1935.
3. А. И. Лурье. Операционное исчисление. ОНТИ, 1938.
4. Н. Н. Разумовский. Успокоение электроизмерительных приборов ЭТИ, вып. 6, лист 169, 1936.
5. S. Gerzonowicz. Estudio del retorno al cero de los galvanómetros. Revista Electrotecnica, № 4, 1940.
6. С. А. Гинзбург. Приборы частотно-импульсного телеизмерения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. МЭИ, 1944.



## К статье В. А. Голубцовой

«ВОПРОСЫ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ»

(Электричество, № 4, 1946)

*Редакция получила много откликов на статью директора Московского Ордена Ленина энергетического института им. Молотова инж. В. А. Голубцовой «Вопросы подготовки инженерных кадров для энергетики». В этих откликах\*, написанных деятелями высшей школы, научно-исследовательских учреждений и промышленности — учеными и инженерами, — отмечается важность и своевременность постановки указанных вопросов и выдвигается ряд новых предложений.*

**Чл.-корр. Академии наук Армянской ССР  
доктор техн. наук А. Г. ИОСИФЬЯН**

*Научно-исследовательский институт Министерства электро-  
промышленности СССР*

В современной технике наблюдается развитие в глубину узкой специализированной техники и параллельно с этим — развитие межотраслевой техники.

Для подготовки инженеров узкой энергетической специальности необходимо прежде всего заложить у студентов фундамент глубоких теоретических знаний в одной какой-либо узкой области (техника высоких напряжений, электрические машины, аппараты, газовые турбины и т. д.) и научить студента применять теоретические познания к конкретным расчетам, чтобы превращать расчетный материал в эскизы, в конструкцию, с учетом при этом особенностей современной технологии. В высшем техническом учебном заведении должны быть созданы высокооснащенные мастерские.

Для подготовки инженеров межотраслевой энергетики необходимо преподавать студенту широкие теоретические познания во всех основных областях техники. Он должен прослушать полный курс математики, физики, теоретической электротехники, механики, термодинамики, гидравлики, аэромеханики, сопротивления материалов, теории упругости и соответствующих специальных предметов. Время обучения студентов, которые должны работать в области межотраслевой энергетики, должно быть увеличено примерно до 6 лет. Курсовые проекты должны быть связаны с работами технических отделов крупнейших предприятий и с товарной серийной продукцией этих предприятий. Находясь на производственной практике, студент должен пройти все стадии создания продукции: от расчета, конструирования, технологической разработки до изготовления и испытания серийных, освоенных агрегатов и комплексных систем. Дипломные проекты студентов, получивших такое политехническое образование, должны носить межотраслевой характер, отличаясь хотя бы в некоторой степени оригинальностью и новизной.

Такая подготовка студентов, получающих фундаментальное политехническое образование, не исключает создания более высоких форм подготовки инженеров межотраслевой техники в виде академий для руководящих технических кадров страны. Такие академии, несомненно, должны быть созданы и комплектовать их следует из лиц, прошедших после высшей школы всестороннюю производственную закалку.

**Доктор техн. наук, проф. А. А. ГЛАЗУНОВ**

*Московский энергетический институт им. Молотова*

Размещение энергетических институтов в настоящее время имеет существенные недостатки. Московский

\* Публикуются в сокращенном виде.

и Ивановский энергетические институты находятся на расстоянии всего около 250 километров, а на Урале нет института, готовящего инженеров для работы в энергетических системах.

Действующий порядок зачисления студентов непосредственно на специальные факультеты не может считаться правильным. Необходимо вернуться к прежней структуре, восстановив общетехнические факультеты.

Учебные планы и программы сильно перегружены. Студенты не имеют возможности продумать материал и «берут памятью». Поэтому вскоре же после сдачи экзамена они забывают не только детали, но и некоторые основы дисциплины. Уменьшение изучаемого материала и повышение требований в лабораториях, при проектировании и на экзаменах, по моему мнению, приведет не к снижению, а к повышению качества подготовки инженеров. Незнание деталей и некоторых специальных вопросов, при наличии хорошей теоретической подготовки, может быть легко пополнено умелой самостоятельной работой инженера. Все инженеры должны работать над собой, пополняя и расширяя свои знания.

**Доктор техн. наук,  
проф. Э. А. МЕЕРОВИЧ**

*Энергетический институт им. Кржижановского  
Академии наук СССР*

Роль лекций в системе преподавания высшей школы должна быть весьма значительной. Желательно, чтобы практиковалось чтение одного курса параллельным потоком двумя лекторами; студентам должна быть предоставлена возможность посещать лекции любого из них по своему выбору.

Уровень теоретической подготовки выпускаемых в настоящее время инженеров-электротехников в сравнении, скажем, с уровнем теоретических знаний инженеров-радиотехников следует признать недостаточным. В теоретическом развитии студентов немалую роль могут сыграть научно-технические кружки.

Роль научно-технических кружков, в особенности на старших курсах, должна быть очень значительной. Преподавательский состав должен не только руководить кружками, но быть одновременно участником научной работы.

Упомянутая в статье В. А. Голубцовой система научных командировок и творческих отпусков должна применяться регулярно и продуманно.

**Доктор техн. наук, проф.  
А. М. ЗАЛЕССКИЙ**

*Ленинградский политехнический институт им. Калинина*

Вопрос о пересмотре сети высших технических и в том числе энергетических, учебных заведений, безусловно, назрел. Большая сеть мелких технических

учебных заведений приводит к распылению средств и научных кадров и к понижению качества подготовки инженеров.

Лабораторно-производственная база в высших учебных заведениях сильно отстает от современного оборудования промышленности. Необходимо, чтобы отпускаемые высшим учебным заведениям на лабораторно-производственное оборудование средства подкреплялись реальными фондами.

Учебники по специальным дисциплинам печатаются недопустимо медленно: обычно год и более. Учебники следует печатать только по устойчивым дисциплинам, медленно меняющимся, как математика, механика и т. д. По специальным дисциплинам следует печатать только учебные пособия.

Параллелизм и повторение материала в смежных курсах — частое явление. Для избежания этого следует укрупнить дисциплины, не допускать разбивки чтения лекций по одной дисциплине несколькими лекторами, тщательно просматривать и согласовывать программы по смежным кафедрам.

Необходимо коснуться также вопроса о распределении окончивших высшие учебные заведения инженеров. Комиссии по распределению нередко решают это дело формально и инженеры направляются на работу, к которой они не подготовлены. В комиссиях следует дать право голоса руководителям специальных кафедр, которые лучше знают, на каких предприятиях их питомцы могут быть использованы с наибольшим успехом.

### **Доктор техн. наук, проф. Г. И. ШТУРМАН**

*Харьковский электротехнический институт*

Процесс формирования инженера не может завершаться в высшей школе. Этот процесс всегда связан с начальным периодом практической деятельности молодого специалиста, в течение которой приобретаются организационные, производственные и эксплуатационные навыки.

Подготовку студентов к практической инженерной работе высшая техническая школа может успешно разрешить только при наличии мощной лабораторно-производственной базы. Внимательный пересмотр всей сети вузов должен быть неразрывно связан с определением возможностей создания таких баз. Излишнее количество высших учебных заведений с организацией в каждом из них электротехнического факультета породила существовавшая до сих пор ведомственная система высшего образования. Это вызвало также дублирование в пределах одного города лабораторий по всем основным электротехническим дисциплинам и распыление научно-педагогических кадров. Разве можно, например, в условиях г. Харькова оправдать существование подготовки инженеров-электриков в нескольких институтах?

Назрели и требуют пересмотра учебные планы и программы, а также сроки обучения. Существующее положение привело к недопустимому снижению времени, предоставляемого студенту для самостоятельной работы. Приобретение навыков в решении инженерных задач требует увеличения числа проектов, подлежащих выполнению в соответствии с учебными планами. Работа студентов над проектными заданиями не должна ограничиваться часами общего расписания. Время, выделяемое для этой цели, должно обеспечить достаточную концентрацию внимания на разрешаемых вопросах.

### **Доктор техн. наук, проф. И. Н. БУТАКОВ**

*Томский политехнический институт им. Кирова*

Удовлетворение потребности министерств в кадрах шло до сих пор по пути создания ими в своих технических учебных заведениях отдельных специальностей для каждой узкой отрасли производства с тем, чтобы закрепить за нею молодых людей еще во время учебы. Так создавались особые специальности по кабельной технике, вакуумной технике, по электрооборудованию предприятий, по электрической части станций и т. д. Такая же дифференциация обозначалась и по тепловым специальностям с разделением их на конструкторские и на эксплу-

тационные. Дело дошло до того, что специальности для инженеров дублировали специальности для техников. Специальности возникали стихийно, так как ни одна группа предприятий не могла остаться без соответствующих узких специалистов. Все это приводило к чрезмерной дробности и множественности профилей, к параллелизму в подготовке кадров одной и той же специальности, к распылению научно-педагогических сил, материальных средств и к понижению качества обучения в высших учебных заведениях.

Новое Министерство высшего образования должно в качестве одной из первоочередных мер провести упорядочение сети высших технических учебных заведений, превратив в техникумы ряд высших учебных заведений, которые фактически стоят на уровне техникумов.

В части организации учебного процесса В. А. Голубцова высказывает и такие мысли, с которыми трудно согласиться. Так, предоставление студенту 1—2 дополнительных дней в неделю, свободных от обязательного посещения института, было бы неправильным нововведением. Такой опыт был уже однажды проделан и дал отрицательный результат, ибо большинством студентов этот день стал рассматриваться, как лишний день отдыха. Учебные занятия должны происходить по расписанию ежедневно: 2 часа лекций и 4 часа практических занятий разного рода.

Положение с изданием учебников надо признать угрожающим. Нехватка учебников сделалась исключительно огромной. Существующая практика их издания нуждается в серьезных коррективах: издание сосредоточено преимущественно в Москве, рецензируют учебные пособия московские специалисты, принадлежащие к определенным направлениям и школам, что часто лишает возможности появления книги другого направления.

Необходимо организовать издание учебных пособий в нескольких городах, где сложились уже свои научные школы, около тех высших технических учебных заведений, которым предоставлено право приема кандидатских и докторских диссертаций.

### **Доктор техн. наук, проф. Ю. В. БУТКЕВИЧ**

*Всесоюзный электротехнический институт*

Многопредметность, особенно в части специальных прикладных дисциплин, не ведет к повышению качества инженера. Многопредметность ведет к поверхностному уровню знаний, к верхоглядству, т. е. к порче молодого специалиста. Защитники обилия в учебном плане специальных дисциплин, на мой взгляд, занимают глубоко ошибочную позицию.

Знания нужны именно базисные. Инженер-электрик должен быть подготовлен высшей школой теоретически (математика, физика, химия) и получить в высшей школе хорошее инженерное развитие (основы электротехники, сопротивление материалов, технология материалов, детали машин). Важно привить молодому инженеру понимание творческого духа в технике, способность не только понимать процессы технического развития, но прилагать свои знания к решению конкретных технических задач.

Нужна целеустремленная специализация на базе хорошей общей подготовки и при том на последнем курсе обучения. С этой точки зрения вряд ли можно согласиться с существующим, например, в МЭИ положением по специальности «Электроаппаратостроение». Студентам этой специальности преподносят, в числе прочих, следующие объемистые дисциплины: высоковольтная аппаратура, низковольтная аппаратура пуска и управления, измерительные трансформаторы и реакторы, реле, регуляторы, рентгеновская аппаратура. Разнообразные расчеты, конструктивных форм и схем. технология делает такую «специализацию» идейно несобранной, расплывчатой. В то же время такой, например, вопрос как «высоковольтные выключатели» мог бы вполне составить предмет специализации.

### **Инж. Ю. С. КРОНГАУЗ**

*Московский трансформаторный завод им. Куйбышева*

В статье В. А. Голубовой недостаточно освещен вопрос о том, чему и, главное, как нужно учить студента в высшей технической школе. Исходя из своего

20-летнего опыта инженерно-конструкторской и исследовательской работы, я могу следующим образом выразить свой взгляд на подготовку инженера.

Первое: учить надо не простому знанию явлений, а умению вникать в них и анализировать, ибо всему научить наперед нельзя.

Второе: школа должна научить будущего инженера умению инициативно и самостоятельно пользоваться на базе полученных теоретических знаний технической литературой и экспериментом для решения практических задач.

Из сказанного вытекают определенные требования к постановке всего учебного дела.

В основном в учебном плане должны быть представлены общие теоретические дисциплины; перегружать студента обилием специальных курсов, в частности, описательных, не следует. Вместо прохождения курсов различных электрических машин, аппаратов и приборов нужно, при изучении курса теоретической электротехники, заставлять студента самостоятельно производить разбор, анализ и экспериментальную проверку работы этих машин и аппаратов на базе преподанных ему теоретических положений.

Такая постановка учебного дела позволит, в условиях даже ускоренного курса (до 4 лет), подготовить инженера, одинаково способного работать и за столом конструктора, и за лабораторным пультом, и у машины в цеху.

Одной из решающих фигур технического прогресса является конструктор. Однако, наши высшие школы совершенно не готовят конструкторов. Необходимо на старших курсах высших технических школ отбирать наиболее способных студентов для придания им конструкторского уклона.

В высшие школы в большинстве попадает молодежь, не имеющая никаких практических производственных навыков, не имеющая достаточного представления о реальных машинах и процессах их изготовления. Поэтому целесообразно обсудить вопрос о введении обязательного годичного трудового стажа на промышленных предприятиях в качестве рабочих для лиц, желающих поступить в высшую техническую школу.

Вопреки мнению В. А. Голубцовой, производственную практику нужно проводить не в высшей школе, организуя для этого цехи, которые, хотя и этого или не хотят, всегда будут игрушечными. У нас имеется достаточно развитая промышленность, где студенты, работая на практике в качестве рабочих, но обязательно работая, а не «проходя практику», получают гораздо больше.

### **Доктор техн. наук Г. И. БАБАТ**

*Энергетический институт им. Кржижановского  
Академии наук СССР*

Молодому специалисту, только окончившему высшее техническое учебное заведение, трудно перейти к практической самостоятельной работе в промышленности. С этой точки зрения возможно было бы целесообразным, чтобы оканчивающие высшие учебные заведения сдавали государственные экзамены, а дипломный проект выполняли после годичного стажа производственной работы. Звание дипломированного инженера должно присуждаться лишь при наличии положительных отзывов с производства. Тема проекта должна быть реальной, а не являться компиляцией из учебников или журнальных статей.

Важен вопрос о подготовке конструкторских кадров. Конструктор — это самая тонкая, самая высокая инженерная квалификация и одна из дефицитных специальностей. Назрело время создать в ведущих технических учебных заведениях СССР надстройку над обычными факультетами, нечто вроде конструкторской академии.

### **Кандидат техн. наук, доц. А. В. КОЩИЦКИЙ**

*Министерство электропромышленности СССР*

Еще очень слаба подготовка инженеров для электропромышленности по технологии производства. В области электромашиностроения и аппаратостроения студенты в высшей школе по существу технологической подго-

товки не получают, вследствие чего наблюдается стремление молодых инженеров начинать работу в конструкторских отделах, лабораториях, на испытательных станциях, но не на производстве.

Необходимо создать глубоко разработанный курс технологии производства электрических машин и аппаратов, включающий изложение физических основ специфических процессов производства, изучение специального оборудования и т. д. Подобные курсы и даже специализированные технологические институты давно уже имеются в других отраслях народного хозяйства.

### **Инж. А. А. РАБИНОВИЧ**

*Завод «Динамо» им. Кирова*

Соотношение между необходимым промышленности числом инженеров и техников должно быть, с учетом потребности научных и проектных организаций, не ниже 1 : 2. Значительная часть молодых специалистов направляется в конструкторские отделы заводов и проектных организаций. Однако, далеко не все молодые инженеры и техники успешно справляются с обязанностью конструктора. Специальность конструктора требует разнообразных знаний, навыков, определенной направленности, хорошего художественного вкуса и ряда способностей, не исключая способностей к рисованию. Эти качества жалеательно выявлять и развивать еще в стенах средней, а затем высшей школы.

### **Кандидат техн. наук, доц. Б. М. ТАРЕЕВ**

*Московский энергетический институт им. Мологова*

При обучении в высшем техническом учебном заведении недостаточное внимание уделяется технике вычислений, в особенности приближенных, номографии, обработке результатов опытов, переводу сложных единиц и стандартизации. Необходимо также, чтобы студенты получали представление о составлении технической документации — отчетов, инструкций, актов, норм, стандартов и т. д.

Большее внимание в учебном плане должно быть обращено на вопросы технологии, выбора и эксплуатации электротехнических материалов для различных устройств, на вопросы экономики и организации труда. Особое значение должны получить эти вопросы с развитием специализации в электропромышленности.

### **Кандидат техн. наук, доц. П. Н. ГОРШКОВ**

*Завод Министерства электропромышленности СССР*

Положение с подготовкой инженеров для кабельной промышленности — совершенно неудовлетворительное. Количество ежегодно выпускаемых Московским энергетическим институтом инженеров кабельной и электроизоляционной техники измеряется единицами. Кафедра кабельной техники и электроматериаловедения при Ленинградском политехническом институте практически еще не восстановила своей работы. При окончательном рассмотрении вопросов подготовки кадров для энергетики и электротехники затронутый вопрос должен получить свое решение.

### **Доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ**

*Харьковский электротехнический институт*

Из-за большого разнообразия на предприятиях электропромышленности номенклатуры изделий, сложности их проектирования, изготовления и испытания электротехнические предприятия требуют относительно большого числа инженеров по отношению к общему количеству работающих.

Подготовка эксплуатационного инженера, работника проектно-монтажных организаций заводского конструктора или инженера-исследователя для лабораторий — не всегда односторонняя. Для специалистов по электроприводу важно хорошо изучить технологию и механизмы электрифицируемого производства. В ряде случаев решение вы-

двигаемых практикой задач требует высокой физической и математической эрудиции, далеко выходящей за рамки программ высших учебных заведений. Передовые иностранные фирмы включают специальные разделы математики в программу повышения квалификации инженеров; например, фирма GE выпустила фирменное издание книги Крона «Приложение тензорного анализа к вращающимся машинам» (1942 г.).

При современных темпах развития физики и техники учебники по профилирующим дисциплинам неизбежно стареют за 2—3 года, а в ряде случаев это происходит уже за время их издания. Американская и французская практика учебных книг со съемными листами (на скобах), разделения курсов на тетради и развития стеклографированных пособий и монографий по отдельным вопросам заслуживает большого внимания.

### Достоѳ техн. наук, проф. Н. Н. ЩЕДРИН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Важное значение для воспитания самостоятельности в работе студента имеет хорошо поставленное учебное проектирование. Овладение материальной частью современной техники, т. е. практическое умение обращаться с аппаратами, машинами и измерительными приборами, имеет первенствующее значение.

Лекционные курсы описательного характера представляют меньшую ценность среди других форм преподава-

ния. Однако, пока они применяются, необходимо использовать кинопоказ и хорошо обеспечить их пособиями (альбомы, описательные монографии и т. п.).

### Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ

Министерство электростанций СССР

Следует вновь обсудить целесообразность организации подготовки инженеров двух профилей: узкого, с обладанием практических навыков, с четырехлетним сроком обучения, и широкого — с развернутой теоретической и научной подготовкой в течение более длительного срока.

Работа средней школы улучшилась, но в высших учебных заведениях все еще особенно чувствуется два недостатка подготовки: плохое обучение чистописанию и умению считать. Часть студентов не умеет четко писать и точно считать и уверена, что это для будущего инженера... не обязательно!

Следует очень осторожно подходить к расширению обучения студентов производственным навыкам. Такие навыки инженер легко приобретает в первые годы своей практической деятельности, недостаток же в теоретической подготовке в большинстве случаев не удается уже самостоятельно восполнить в течение всей жизни. Методами лабораторного исследования студент должен овладеть полностью; однако, и здесь следует обращать больше внимания на глубину усвоения, чем на число проделанных работ.



## К статье И. С. Брука

### «О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ МЕХАНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ»

(Электричество, № 11, 1945)

#### Член-корр. АН СССР И. С. БРУК

В статье «О методах механического решения систем линейных алгебраических уравнений» (Электричество, № 11, 1945 г.) я указал на ряд обстоятельств, могущих привести к неправильным результатам при использовании схем с усилителями для решения систем алгебраических уравнений. Эти обстоятельства остались незамеченными авторами статей, указанных в моей работе, и поэтому я считал полезным обратить на них внимание читателей. В заметке, опубликованной (Электричество, № 3, 1946) в порядке обсуждения моей статьи, авторы Л. И. Гутенмахер, И. С. Градштейн, Н. В. Корольков и В. А. Тафт (они же, за исключением И. С. Градштейна, являются авторами упомянутых мной статей) не приводят никаких возражений против моих замечаний. Более того, появившаяся одновременно с заметкой статья этих авторов целиком посвящена затронутым мною вопросам о неустойчивости решений. Они отказываются (как это вытекает из текста заметки) от применения схем с усилителями для решения алгебраических уравнений. Я же указывал лишь на малую пригодность этих схем для рассматриваемой цели. О решении дифференциальных уравнений не было речи в моей статье. Поэтому несущественно, сколько места уделено этому вопросу в упомянутых мною статьях авторов заметки.

Таким образом внесена ясность в вопрос о применимости схем с усилителями для решения алгебраических уравнений. В этом и заключалась одна из целей моей работы. Вопрос о решении дифференциальных уравнений я предполагаю рассмотреть отдельно.

**Проф. Л. И. ГУТЕНМАХЕР,**  
**доцент И. С. ГРАДШТЕЙН;**  
**кандидат техн. наук В. А. ТАФТ,**  
**инж. Н. В. КОРОЛЬКОВ**

В связи с замечанием И. С. Брука, сообщаем:  
1. Необходимость исследования устойчивости была

отмечена нами еще до появления в печати статьи И. С. Брука (Известия ОТН АН СССР, № 4—5, 1945, стр. 444, стр. 7 снизу). Первая наша статья, посвященная исследованию устойчивости, также была сдана в печать в сентябре, т. е. до появления статьи И. С. Брука (Известия ОТН, № 1, 1946, стр. 63).

2. Мы не отказались от применения наших схем для решения алгебраических уравнений. Наоборот, в нашей статье (Электричество, № 3, 1946, стр. 40, левый столбец, строки 7 снизу и 18 сверху) мы писали о целесообразности применения этих схем для решения алгебраических уравнений, указав, при каких ограничениях такое решение возможно.

#### Член-корр. АН СССР И. С. БРУК

В заключение обсуждения моей статьи (Электричество, № 11, 1945) считаю полезным отметить следующее:

1. Возможно, что вопрос о неустойчивости схем с усилителями был ясен оппонентам до появления моей статьи и публичного выступления в апреле 1945 г. Вероятно поэтому они в своей статье (Электричество, № 4, 1945) не указали на это важное обстоятельство.

2. Я не ставил себе целью добиться согласия оппонентов с выдвинутым мною положением о непригодности схем для решения алгебраических уравнений. Смысл ссылки, обосновывающей несогласие оппонентов (см. выше), сводится к тому, что при помощи матричных схем можно решать алгебраические уравнения тогда, когда они этими схемами решаются. Впрочем в статье оппонентов (Электричество, № 3, 1946) уже прямо сказано, что нельзя требовать от схемы, чтобы она решала алгебраические уравнения, «источником которых являются, например, торговые операции, химия и т. п.» (разрядка моя—И. Б.).



## 90 лет со дня рождения Николы Тесла

ТЕЛЕГРАММЫ РЕДАКЦИИ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ И ПРЕЗИДИУМА ВНИТОЭ

ЮГОСЛАВИЯ, БЕЛГРАД

ИНСТИТУТУ ИМЕНИ НИКОЛЫ ТЕСЛА

Никола Тесла в девяностых годах прошлого столетия напечатал в журнале „Электричество“ ряд своих работ о поразивших весь мир физических экспериментах.

В день чествования памяти выдающегося ученого электротехника и замечательного сына Югославии редакция журнала „Электричество“ шлет дружеские пожелания научной общественности Югославии и героическому югославскому народу.

Ответственный редактор журнала „Электричество“  
академик Б. Е. ВЕДЕНЕВ  
Ответственный секретарь инж. Я. А. КЛИМОВИЦКИЙ

ЮГОСЛАВИЯ, БЕЛГРАД

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО ИМЕНИ НИКОЛЫ ТЕСЛА  
ДИРЕКТОРУ ИНСТИТУТА СЛАВКО БАКСКОМУ

От лица советских энергетиков, объединенных Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом энергетики, приветствуем Научно-техническое общество электриков имени Николы Тесла в памятный день рождения выдающегося югославского электротехника и изобретателя, одного из творцов современной электротехники, Николы Тесла.

Советские энергетики успешно работают над развитием электрификации страны и той области науки, во имя которой жил и творил Никола Тесла.

Мы знаем, что Никола Тесла высоко ценил усилия славянских народов, призванных играть важную роль в культурном развитии всех народов мира. Память о Тесла будет вечно жить.

По поручению президиума ВНИТОЭ:  
Председатель, член-корр. АН СССР М. А. ШАТЕЛЕН  
Зам. председателя А. С. РУМЯНЦЕВ



## Научно-техническая конференция Ленинградского политехнического института им. Калинина

С 22 по 29 марта 1946 г. в Ленинграде состоялась первая послевоенная научно-техническая конференция Ленинградского политехнического института им. Калинина, посвященная восьмидесятилетнему юбилею старейшего профессора института, одного из его основателей, заслуженного деятеля науки и техники, члена-корреспондента Академии наук СССР Михаила Андреевича Шателена.

М. А. Шателен был одним из наиболее убежденных сторонников политехнического образования в России и первым деканом электромеханического факультета Политехнического института. Им была создана научная электротехническая школа, сыгравшая выдающуюся роль в развитии русской электротехники и энергетики. Обладая замечательным талантом организатора, М. А. Шателен за период своей работы в институте, продолжающейся почти 50 лет, собрал вокруг себя большое количество учеников, привлекая к работе молодые и свежие научные силы. Большинство участников конференции — ученики М. А. Шателена, и их доклады представляют итоги деятельности за полтора года, прошедшие после возвращения института из эвакуации в Ленинград.

**1. Энергетическая секция конференции.** В связи с новым пятилетним планом восстановления и развития народного хозяйства вопросы энергетики и теплоснабжения Ленинграда требуют разрешения на совершенно иных основаниях, чем до войны. Энергетические кафедры института провели работу по анализу теплового и энергетического хозяйства города и его природных ресурсов топлива и энергии. Результаты этой работы позволили сделать выводы в отношении мероприятий, которые необходимы для рационализации энерго- и теплоснабжения Ленинграда и построить модель рациональной энергосистемы.

Первым в этой серии энергетических докладов был доклад проф. А. А. Морозова «Роль гидравлической энергии для Ленинграда».

Ленинград расположен среди мощных источников гидравлической энергии. На расстоянии не далее 300 км от него находятся такие крупные источники энергии, как Волхов, Свирь, Нарва, Вуокса, Нева и Мста, использование которых в 13 гидроэлектростанциях (гэс) может дать мощность, значительно превышающую мощность и выработку энергии всей ленинградской энергосистемы перед войной.

Режим стока рек достаточно благоприятен. Значительная озерность речных бассейнов выравнивает годовой сток, вследствие чего отношение выработки энергии маловодного (зимнего) полугодия к выработке многоводного (летнего) полугодия в среднем по стоку год составляет для всех 13 гидростанций около 77%. В меньшей степени сказывается регулирующее влияние озер на многолетнюю неравномерность выработки энергии. Отношение выработки среднемаловодного (90% обеспеченности) и средне-многоводного (10% обеспеченности) годов составляет для всех станций в среднем 61%.

Такая природная характеристика источников водной энергии позволяет сделать следующие выводы. В системе, использующей водную энергию с указанной годовой неравномерностью выработки, чрезвычайно полезно участие значительной доли теплофикационных электростанций (тэц), обладающих обратной неравномерностью выработки энергии. Введение конденсационных тепловых станций (кэс) необходимо, главным образом, для выравнивания многолетней неравномерности выработки гидравлической энергии. Поэтому построение будущего баланса энергии должно основываться на весьма значительной доле участия тэц. Наоборот, строительство кэс должно быть ограничено лишь необходимостью выравнивания многолетней неравномерности отдачи гэс.

Большие регулирующие емкости водохранилищ (озера Онежское, Ладожское и Чудское) позволяют производить годичное, а в некоторых случаях и многолетнее регули-

рование стока. Многие из существующих и намеченных в будущем гэс обладают прекрасной способностью работы с суточным регулированием расходов воды. В целом возможно использование большинства гэс для работы в пиковой части графика в период маловодья. Это повышает использование их мощности и определяет место тепловых электростанций в базисе графика нагрузок.

При надлежащем соотношении мощностей всех трех родов электростанций — гэс, тэц и кэс — может быть создана гибкая и гармоничная энергосистема.

Четыре существующие гидроэлектростанции — Волховская, Нижне-Свирская Энсо и Роухнала после устранения повреждений, причиненных врагами, и после окончания монтажа агрегатов на Энсо могут обеспечить около 60% довоенной выработки энергии ленинградской системы.

Очередность строительства новых гэс определяется: а) ценностью каждой гэс по ее энергетическим показателям, б) размерами капиталовложений и в) степенью подготовленности к строительству, строительными сроками и возможными сроками пуска.

Большой интерес представляет Нарвская гэс на р. Нарве. Благодаря простоте схемы (деривационная установка с коротким каналом длиной 2,5 км и невысокой плотиной) и сравнительно высокому напору 24 м она является наиболее выгодной по удельным капиталовложениям. В то же время она обладает хорошей маневренностью и способностью к суточному регулированию при достаточной равномерности годовой выработки (отношение выработки зимнего и летнего полугодий составляет около 0,90). Ее строительный срок 2,5—3 года.

Нижне-Вуоксинская гэс, располагающаяся при впадении Вуоксы в Ладожское озеро, в 75 км от Ленинграда, обладает также хорошей маневренностью, суточным и недельным регулированием и проектируется с относительно высокой установочной мощностью, как пиковая станция.

Невская гэс требует длительных строительных сроков (до 6 лет) при большом объеме землечерпательных работ (около  $11 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ) и сравнительно дорога благодаря очень низкому напору (макс. напор 4,6 м), имеет малую мощность, и не представляет большого интереса.

Особо стоят четыре гэс, проектируемые на р. Мсте. Сравнительно высокая их стоимость и удаление от Ленинграда не позволяют отнести их к первоочередным. Однако, они могут приобрести интерес для электрификации Октябрьской железной дороги, так как они очень удачно расположены примерно на середине ее трассы и могут обеспечить энергией участок Чудово—Калинин.

Докладчик считает целесообразным следующий порядок строительства новых гэс ленинградской системы (табл. 1).

Таблица 1

Название гэс	Год начала строительства	Год пуска первого агрегата	Год ввода всей мощности
Верхне-Свирская	1947	1949	1950
Нарвская . . . . .	1948	1950	1951
Нижне-Вуоксинская . . . . .	1950	1952	1954
Невская . . . . .	1952	1957	1958
Омутская . . . . .	1957	1959	1959
Мстинские (условно) . . . . .	1947	1949	1955

Доля гидроэнергии в ленинградской энергосистеме при ожидаемом ее росте достигнет при этом к 1950—1951 г. около 75% по выработке энергии и 61% по участию в покрытии максимума нагрузки, а к 1955—1955 г. соответственно 47,5 и 45%.

Осуществление намеченного строительства потребует вложения около 2 600 млн. руб. (без мстинских гЭС) и около 800 млн. руб. только для постройки мстинских гЭС. Наибольшая интенсивность вложений (в период 1948—1958 гг.) составляет около 200—250 млн. руб. в год без мстинских гЭС и 250—300 млн. руб. в случае осуществления последних.

Следующий доклад из этого цикла был сделан проф. В. П. Ивановым на тему «Сдвиги в топливном балансе и энергоснабжении Ленинграда, вызываемые газификацией города и использованием торфобрикетов».

Докладчик считает основной задачей энергетики ослабление того напряженного состояния, в котором находится топливный и энергетический баланс Ленинграда в последние годы. В части энергопотребления в последние пять лет перед войной наблюдался дефицит мощности и энергии в системе, вызвавший лимитирование потребления энергии. Ввод новых мощностей не соответствовал росту потребления, а дефицит топлива ограничивал выработку энергии. В структуре энергосистемы наблюдаются преобладание энергии кЭС, слабое развитие теплофикации и малая доля гидроэнергии. Так, в 1940 г. структура энергосистемы характеризовалась следующими цифрами (табл. 2):

Таблица 2

Тип электростанций	Выработка энергии, %	Мощность, %
кЭС . . . . .	76,0	58,9
тЭС . . . . .	3,0	6,1
гЭС . . . . .	21,0	35,0

После вступления в 1926—1927 г. Волховской гЭС до 1940 г. было введено в систему на гЭС 25% и на тепловых электростанциях 75% общей мощности новых станций. Роль гЭС по их выработке непрерывно снижалась, составляя в 1926—1927 г. 60,9%, в 1932 г. 29,9% и в 1940 г. 21,0%.

Удовлетворение теплом в 1940 г. составляло около 88%, а в части печного отопления всего 50%, считая по самым скромным нормам. Централизованное энергоснабжение составляло всего 7,4% общего потребления тепла. Теплофикация обслуживала, главным образом, промышленность, коммунальные предприятия и учреждения. Жилые здания отапливались на 83,4% печами, на 14,2% центральными котельными и лишь на 2,4% пользовались теплом от тЭС. Такое положение приводило к расходованию дальнепривозного топлива (угля и нефти) и дров для печного отопления. Торф и сланец составили лишь около 10% всего топлива Ленинграда.

Необходимыми мероприятиями для улучшения энергоснабжения города докладчик считает: 1) увеличение установленных мощностей системы; 2) увеличение мощности гЭС; 3) уменьшение потерь энергии, соблюдение постоянства напряжения и частоты; 4) развитие теплофикации; 5) вытеснение дров и увеличение использования торфа и сланцев.

Использование сланцев представляется в форме газификации, освобождающей от транспорта этого малокалорийного и многозольного топлива. Торфобрикеты явятся заменой дров для печного отопления в частях города, которые по своему расположению и малой плотности населения затруднительно перевести на теплофикацию или газификацию.

К 1950 г. предполагается относительное увеличение удельного веса тЭС, примерно в 10 раз и гЭС в 2,5 раза, при резком уменьшении роли кЭС. Благодаря этому, несмотря на увеличение выработки энергии, примерно на 30%, будет достигнута в 1950 г. экономия топлива по сравнению с 1940 г. на 40% в средний по водности год и на 15% в маловодный год.

Особенностью газификации Ленинграда явится использование газа для отопления жилых зданий. Из общего

количества  $1\,270 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  газа предполагается расходовать:

Для приготовления пищи и нагревания воды . . . . .	31,6%
Для отопления . . . . .	29,6%
Для коммунальных предприятий . . . . .	19,6%
Для промышленности . . . . .	18,3%
Для технических нужд учебных заведений . . . . .	0,9%

Газ, применяемый в городском хозяйстве, эквивалентен 600 000 т условного топлива. Учитывая же более высокий к. п. д. его использования, можно считать, что он заменит до 950 000 т условного топлива. Намеченный объем теплофикации дает экономии до 930 000 т условного топлива и торфобрикетный завод на 250 000 т брикета еще 160 000 т условного топлива. Всего в городском хозяйстве будет получена экономия 1 900 000 т условного топлива. Кроме того, за счет тепла от тЭС и газа в промышленности можно достичь экономии до 500 000 т условного топлива.

При этом будет достигнуто полное удовлетворение промышленности и населения теплом и энергией, создана культура быта и в значительной мере вытеснены из баланса Ленинграда дальнепривозное топливо и дрова.

Третий доклад был сделан проф. В. В. Болотовым на тему «Структура перспективного электробаланса Ленинградской энергетической системы».

Проблема электроснабжения не может быть рационально разрешена независимо от проблемы топливоснабжения и в известной степени подчинена последней. Неблагоприятные условия топливоснабжения ставят вопрос об экономии топлива. Разрешения его следует искать в направлении максимальной централизации теплоснабжения, обеспечивающей повышение к. п. д. топочных устройств, и максимального развития теплофикационных установок, дающих дополнительную экономию топлива.

В основу анализа баланса мощности были положены графики нагрузки, подобные имевшим место в 1935 г., когда в системе был избыток производственных возможностей и отсутствовали ограничения потребителей. Рассмотрены два этапа развития системы, характеризующиеся мощностью пика нормального рабочего дня 700 и 1 200 тыс. kW при годовой выработке энергии соответственно  $4\,150$  и  $7\,100 \cdot 10^3$  kWh. Первый этап может быть отнесен к 1950 г., второй, при годовом приросте в 10%, примерно соответствует 1957 г. График нагрузки зимнего рабочего дня характеризуется величинами средней суточной мощности 81% от максимума нормального рабочего дня и минимальной мощности 53%. Абсолютный максимум в декабре может доходить до 105%. Средняя за год нагрузка нормального рабочего дня 72%. Годовой коэффициент нагрузки 64%, что дает 5 630 h использования.

После осуществления строительства гЭС будет возрастать роль тепловых электростанций. Для наилучшего удовлетворения топливного баланса Ленинграда необходимо максимальное развитие теплофикации. С другой стороны, требование минимальной выработки энергии на электростанциях, расположенных в черте города, приводит к полному отказу от выработки на тЭС электроэнергии по конденсационному циклу, т. е. к строительству тЭС, оборудованных турбинами с противодавлением. Электрическая мощность тЭС должна быть ограничена по сравнению с ее тепловой мощностью, чтобы обеспечить устойчивость электрической мощности независимо от потребления тепла.

При этих условиях мощность тЭС должна составить не менее 300 тыс. kW, из которых на первом этапе будет освоено по предположению докладчика 120 тыс. kW. При температурах наружного воздуха от +2 до +5°С электрическая мощность будет обеспечена на протяжении не менее 5 зимних месяцев. В летнее время будет иметь место снижение мощности на 50—30%. Это отчасти компенсируется снижением нагрузки летом примерно на 15% и повышением выработки энергии гЭС около 20%.

КЭС должны располагаться за городом и работать на местном топливе (торфе). Их роль, главным образом, заключается в покрытии остальной части графика нагрузки



и в компенсации уменьшения выработки гЭС в маловодные годы.

Даже в маловодные годы гЭС могут участвовать в покрытии максимума нагрузки в суточном разрезе значительной долей своей установленной мощности благодаря хорошим возможностям суточного и недельного регулирования. Наиболее тяжелыми периодами в работе системы, когда потребуется участие КЭС, будут часть апреля, когда прекращается отопительная нагрузка, а выработка гЭС перед паводком еще сравнительно мала, и часть осени перед началом отопительного сезона, т. е. до 15 октября.

Режим работы КЭС на первом этапе весьма неравномерен в течение года и в многолетнем разрезе. В течение суток КЭС несут базисную нагрузку, предоставляя пики графика гидроэлектрическим станциям. На втором этапе работа КЭС в годовом разрезе становится более равномерной.

Использование гЭС в максимуме нагрузки наиболее характерных месяцев года на первом этапе развития системы характеризуется следующими данными (табл. 3):

Таблица 3

Обеспеченности стока для данного года, %	10	50	90
<b>Участие гЭС в максимуме нагрузки:</b>			
<b>А п р е л ь</b>			
Мощность, тыс. kW . . .	516	468	426
% установленной мощности	96	87	79
<b>О к т я б р ь</b>			
Мощность, тыс. kW . . .	536	432	333
% установленной мощности	100	81	73
<b>Д е к а б р ь</b>			
Мощность, тыс. kW . . .	475	394	363
% установленной мощности	89	73	68

Действительное использование мощности будет выше, так как агрегаты гидроэлектростанции используются как нагрузочный и аварийный резервы. Так, в декабре маловодного года может быть использована мощность 35 тыс. kW в качестве нагрузочного резерва и 50 тыс. kW как аварийный резерв. Используемая мощность составит 448 тыс. kW, или 84% вместо 68%.

В качестве основных выводов из анализа перспективного баланса ленинградской энергосистемы докладчик пришел к следующим положениям:

1. Строительство ТЭС должно вестись до удовлетворения требований централизованного теплоснабжения. Необходимо перейти на новый тип ТЭС, оборудованных турбинами с противодавлением.

2. Строительство ГЭС должно покрыть прирост электропотребления, который не удовлетворяется сооруженными ТЭС.

3. Конденсационная мощность нужна для компенсации снижения выработки энергии в маловодные годы. Существующие конденсационные мощности надолго достаточны для этой цели и строительство новых КЭС должно быть временно прекращено.

4. Будущая энергосистема Ленинграда будет состоять из большого числа станций разнообразных и своеобразных типов. Разработка методов оперативного управления и схемы диспетчерского регулирования составляет серьезную задачу проектирования системы.

По трем вышеизложенным докладам прения протескали совместно. Существенное добавление к выдвинутым докладчиками положениям сделал проф. М. Д. Каменский. Он указал на систематическое отставание проектирования и строительства электросетей. Между тем, недостаточное развитие сетей часто является существенным препятствием к правильной эксплуатации станций. Необходимо своевременно подготавливать сети для принятия и присоединения генерируемой энергии.

Оживленные прения вызвали тезисы доклада, направленные к ограничению строительства конденсационных станций и применению турбин с противодавлением. Представитель Теплоэлектропроекта гл. инж. Авербух отметил, что строительство и, особенно, восстановление конденсационных станций могут дать более скорый ввод мощностей, чем строительство гидростанций, а тЭС с противодавлением являются весьма не гибкими в эксплуатации.

Проф. Л. А. Мелентьев возразил против этого, указывая, что строительство и восстановление КЭС будет тормозить теплофикацию, что в результате вызовет увеличение потребления топлива и нарушит топливный баланс Ленинграда. Строительство КЭС неминусом должно возникнуть по мере приближения к исчерпанию гидроресурсов. Новые КЭС должны при этом строиться за пределами города и использовать местное топливо.

Далее были заслушаны доклады по вопросам топливного хозяйства Ленинграда. Первым из них был доклад проф. В. Н. Шреттера на тему «Котельное хозяйство Ленинграда в условиях перестройки на новое энергоснабжение города».

Котельное оборудование промышленных предприятий и коммунального хозяйства Ленинграда находится в малоудовлетворительном состоянии. Еще до войны очень много котлов и котельных города не соответствовало по качеству оборудования сколько-нибудь современным требованиям.

Простой котлов во время блокады, порча оборудования от мороза и необходимость работать на сортах топлива, к которым котельные не приспособлены, способствовали сильному износу оборудования. По ряду испытаний, которые ставились на небольших котлах, к. п. д. большинства из них не выше 45%. Для отопительных котлов, не приспособленных к сжиганию пламенных сортов горючих, средние к. п. д. едва ли превышают 35—40%.

Только полный разрыв с ориентировками на наследие старой котельной и отопительной техники может поднять надлежащим образом котельное хозяйство Ленинграда и других городов и дать полноценное использование топливных и энергетических ресурсов Ленинградской области.

В. А. Вайнер представил доклад на тему «Особенности ленинградских топлив и их рациональное использование». Весьма неблагоприятной особенностью для рационального использования любого топлива является непостоянство его качества, характерное, в частности, для топлив, поступающих в настоящее время в Ленинград.

Для упорядочения топливного хозяйства Ленинграда, с его весьма значительным потреблением топлива, необходимо возможно скорее принять меры к кондиционированию топлива, направляемого в город (лучшие сорта) и на специализированные предприятия. Упорядочение топливного хозяйства потребует применения приемов обогащения или более квалифицированной добычи.

Дальнейшие доклады были представлены кафедрой гидравлических машин института и посвящены вопросам гидротурбостроения.

Доц. А. Ф. Лесохин сделал сообщение «О расчете осевого давления в турбинах Френсиса», в котором отметил, что точное определение величины осевого давления для мощных турбин необходимо, так как оно существенно отражается на габаритах пят. Последние в мощных гидроагрегатах представляют достаточно ответственную конструкцию и проектирование их связано с большими трудностями, вызываемыми значительной величиной осевого давления.

Доклад доц. И. Н. Смирнова «О всасывающих трубах Ленинградского металлического завода им. Сталина и иностранных фирм» вызвал большой интерес присутствующих. Докладчик собрал большой материал зарубежных заводов и поставил ряд существенных вопросов в области проектирования всасывающих труб. Роль всасывающей трубы для современных быстроходных турбин весьма существенна; к. п. д. современных турбин достигает 93—94%, т. е. потери составляют всего 6—7%. Подавляющую часть этих потерь составляют потери во всасывающей трубе.

Сравнение конструктивных размеров всасывающих труб ЛМЗ и различных фирм указывает на значительно более экономичные габариты отечественных всасывающих труб. Однако, уменьшение габаритов, в частности величины выходного отверстия, может отразиться на увеличении потерь. Докладчик считает, что размеры выходного отверстия должны определяться экономическим расчетом, оценивающим как удешевление строительной стоимости, так и увеличение потерь, происходящих от уменьшения габаритов отверстия.

В прениях по докладу указывалось на правильность и ценность соображений автора по вопросу об определении размеров трубы экономическим расчетом. Необходимо, по мнению выступавших, лабораторное исследование всасывающих труб. Существенным также является вопрос о пересчете модельных испытаний по закону подобия, в частности, о пересчете к. п. д. агрегата на действительные размеры колеса.

В пленарном заседании конференции состоялся доклад проф. И. И. Кириллова «Перспективы развития газовых турбин». Турбина внутреннего сгорания с ее современными экономическими показателями является двигателем, который в известных условиях уже может с успехом конкурировать с лучшими современными двигателями. Турбина внутреннего сгорания с большим успехом применяется в качестве транспортного двигателя и в этой области она имеет прекрасные перспективы.

Широкие возможности представляются для использования газовой турбины в сочетании с другими двигателями и в установках, позволяющих утилизировать тепло отходящих газов. Из установок этого типа наибольшего внимания заслуживают предвключенные газовые турбины и турбины внутреннего сгорания, обслуживающие металлургические и химические процессы.

Как показали расчеты, выполненные в институте, предвключенные газовые турбины при наличии жидкого или газообразного топлива являются простыми двигателями, которые можно с большим эффектом использовать для надстройки существующих теплосиловых установок, особенно в случае сочетания их с турбинами противодавления.

Исключительно благоприятные условия представляются для использования газотурбинных установок в северных районах с низкой среднегодовой температурой воздуха.

Дальнейшее повышение начальной температуры, наравне с применением промежуточного нагрева и охлаждения, повысят к. п. д. турбин внутреннего сгорания, сделают их менее чувствительными к сопротивлениям в воздушном и газовом трактах, приведут к росту предельной мощности и значительно расширят область их применения.

**2. Электромеханическая секция конференции.** Большая группа докладов этой секции была посвящена вопросам теории и эксплуатации электрических машин.

В докладе «Добавочные рассеяния в электрических машинах» член-корр. АН СССР, проф. М. П. Костенко отметил, что добавочные рассеяния вызываются наличием высших гармонических м. д. с. статорной и роторной цепи. Наиболее сложный и общий случай добавочного рассеяния получается в неподвижной асинхронной машине; оно в этом случае существенно зависит от углового положения ротора. Вследствие изменения трансформаторных связей между эквивалентными обмотками различных гармонических м. д. с. коэффициент рассеяния в этом случае зависит от фаз первичной и вторичной цепи, числа пазов на полюс и фазу и сокращения шага обмотки. Зависимость коэффициента рассеяния от углового положения ротора наиболее просто выражается для двух крайних случаев; когда число пазов на полюс и фазу равно единице и бесконечности. В случае целого числа пазов на полюс и фазу в пределах между единицей и пятью можно также получить аналитическую зависимость коэффициента рассеяния от углового положения ротора, путем разложения м. д. с. статора и ротора на гармонические составляющие и определения трансформаторной связи для каждой гармонической. В этом случае коэффициент рассеяния перестает быть непрерывной функцией углового положения ротора, а получает ступенчатый характер. При сокращении шага обмотки коэффициент рассеяния резко снижается. При числе пазов на полюс и фазу больше пяти можно принимать обмотки равномерно распределенными.

При вращении асинхронной машины со скоростью, близкой к синхронной, трансформаторная связь между статором и ротором осуществляется практически только через основную гармоническую м. д. с., а гармонические м. д. с. высших порядков дают в этом случае практически лишь поля рассеяния, что дает основание присвоить добавочному рассеянию термин «дифференциальное рассеяние». При вращении ротора с синхронной скоростью по отношению к какой-либо гармонической м. д. с. резко выявляется трансформаторная связь через эту гармоническую, что находит себе выражение в виде острых пиков паразитных асинхронных моментов, проявляющих себя при разрывании короткозамкнутого асинхронного двигателя с беличьей клеткой из неподвижного положения. Добавочное рассеяние проявляет себя и в случае беличьей клетки, так как для высших гармонических число фаз вторичной системы понижается обратно пропорционально порядку гармонической.

В синхронной машине при переходных режимах создаются трансформаторные связи между статорной и роторной системой такого же рода, как и в асинхронной вращающейся машине. В данном случае дифференциальное рассеяние может быть получено как частный случай добавочного рассеяния асинхронной машины, причем явно полюсная синхронная машина может рассматриваться как асинхронная машина с однофазным ротором, имеющая неравномерно распределенную обмотку вторичной цепи. Неравномерность воздушного зазора между полюсами можно учесть соответствующим коэффициентом приведения по продольной и поперечной осям. Наиболее сложный случай — синхронная явнополюсная машина с неравномерным воздушным зазором под полюсными башмаками. Наличие беличьей клетки на полюсах синхронной машины можно учесть таким же методом, как и в случае асинхронного двигателя с беличьей клеткой.

В случае компенсированной машины постоянного тока добавочное рассеяние в воздушном зазоре можно подсчитать значительно проще, так как не нужно определять отношения трансформаторно связанных токов. При определении добавочного рассеяния для репульсионного однофазного двигателя приходится учитывать и трансформаторную связь первичной и вторичной цепи.

В прениях по докладу приняли участие профессор Л. Р. Нейман, И. М. Постников и Л. М. Пиотровский.

Далее был заслушан доклад проф. Л. М. Пиотровского «Геометрическое место токов асинхронной машины с переменным насыщением стали» (Электричество, № 2, 1946 г.).

В прениях по докладу приняли участие инж. Е. Я. Казовский (завод «Электросила» им. Кирова) и профессора М. П. Костенко, И. М. Постников, В. К. Попов.

Проф. Л. Р. Нейман прочитал доклад «О применении принципа наложения при тепловых расчетах электрических машин и трансформаторов».

В докладе приводится анализ общих условий, при которых применим указанный метод к электрическим машинам и трансформаторам, и дается оценка возможных ошибок в разных конкретных случаях. Автор исходит из положения, что принцип суперпозиции справедлив по отношению к любой физической системе, если это явление описывается совокупностью линейных дифференциальных уравнений. В данном случае это будут уравнения стационарной теплопроводности и уравнения теплопередачи от поверхности тела к охлаждающей среде.

Коэффициенты теплопроводности, входящие в уравнение теплопроводности, не должны зависеть от температуры, чтобы это уравнение было линейным. Фактическая изменчивость коэффициентов теплопроводности меди и железа в функции температуры, как показывается в докладе, приводит к ничтожным ошибкам в определении превышения температуры по методу наложения. Значительно большее влияние оказывает зависимость от температуры коэффициента теплопроводности изоляции. Расчет показывает, что возможная вследствие этого ошибка не превышает 1° С, даже если воспользоваться для определения превышения температуры от потерь в меди опытом короткого замыкания, при котором температура изоляции заметно отличается от ее температуры при нормально

режиме. Ошибка получается весьма малой, если вместо опыта короткого замыкания воспользоваться опытом нагрузки, близкой к нормальной, что при испытаниях в условиях эксплуатации является во всех отношениях более желательным.

Необходимо, чтобы представляющие правую часть уравнения теплопроводности удельные потери мощности распределялись в пространстве в отдельных частных режимах так, что после наложения было получено распределение потерь, имеющее место в исследуемом режиме. Это не соблюдается в действительности полностью, так как распределение потерь в меди уменьшается от режима к режиму вследствие изменения коэффициента Фильда, и распределение потерь в железе изменяется вследствие изменения магнитного насыщения, особенно в зубцовой зоне. Поэтому и с этой точки зрения для определения составляющей превышения температуры от потерь в меди следует рекомендовать пользоваться режимами, близкими к режиму номинальной нагрузки, а не опытом короткого замыкания.

Коэффициент теплопередачи, входящий в уравнение передачи тепла от поверхности тела к охлаждающей среде, зависит от температуры, что приводит к нелинейности этого уравнения. В случае вынужденной конвекции, как показывает подсчет, эта зависимость может привести к ошибке, не превышающей 1°С. При естественной конвекции ошибка может быть весьма значительной.

Применение принципа наложения возможно только в том случае, если характер движения охлаждающей среды от одной нагретой части машины или трансформатора к другой их части не изменяется от режима к режиму, т. е. не зависит от температуры.

На основании произведенного анализа докладчик считает, что метод суперпозиции при тепловых расчетах электрических машин обеспечивает высокую точность результатов расчета, если правильно выбрать частные режимы, из которых определяются составляющие превышения температуры. К трансформаторам с естественной конвекцией масла этот метод совершенно не применим.

Если на естественную циркуляцию масла накладывается принудительная циркуляция, то метод может быть использован лишь для ориентировочных подсчетов. Доклад вызвал весьма оживленные прения, в которых приняли участие профессоры М. П. Костенко и И. М. Постников, инж. Е. Я. Казовский и др.

Выступивший с докладом на тему «Профилактические испытания электрических машин» проф. А. М. Залесский указал, что для общей оценки качества изоляции машин в настоящее время следует считать наиболее пригодным метод испытания изоляции обмоток повышенным напряжением. При этом способе должен также определяться ток утечки через изоляцию. Дефект изоляции устанавливается по резкому росту тока утечки, начиная с некоторого значения напряжения. Метод измерения угла потерь в применении к оценке изоляции электрических машин, в настоящее время следует признать несостоятельным.

Для испытания витковой изоляции наиболее пригоден применяемый американскими инженерами способ посылки в обмотку импульсов с крутым фронтом. Для этой цели разработан простой портативный аппарат.

В прениях по докладу приняли участие профессоры М. М. Михайлов и М. П. Костенко. Основные положения докладчика не оспаривались.

Далее был заслушан доклад проф. И. М. Постникова «Основные закономерности при проектировании электрических машин минимальной стоимости».

Докладчик указал, что при выборе размеров машины можно исходить из трех видов основных условий: а) условий эксплуатационно-технических; б) условий нагрева; в) условий минимума «приведенной стоимости», учитывающей стоимость материала и стоимость потерь.

Для облегчения расчетов докладчиком установлен ряд закономерностей для размеров яра и зубцов при учете потерь и весов статора и ротора.

В прениях по докладу выступили профессоры М. П. Костенко и В. К. Попов и инж. Е. Я. Казовский. Большинство выступавших указывало на некоторую академичность расчетов, рекомендуемых докладчиком. Вряд ли в

большинстве случаев расчета машин следует исходить из условий минимальной приведенной стоимости.

В докладе «Непрерывное управление и регулирование автоматизированным электроприводом» проф. В. К. Попов отметил преимущества непрерывного автоматического управления и регулирования в отношении плавности операций, наилучшего использования рабочих машин и двигателей. Оно ведет к повышению производительности автоматизированных рабочих агрегатов, повышению точности их работы и удешевлению автоматической аппаратуры при уменьшении ее размеров. Непрерывное управление и регулирование наиболее подходят для приводов постоянного тока со сложным графиком работы или со сложным режимом регулирования скорости при необходимости поддержания постоянства скорости, необходимости осуществления определенного, в особенности напряженного, графика той или иной величины (момента, тока, мощности, пройденного механизма пути, и т. п.).

Непрерывное управление приводами постоянного тока может осуществляться по двум основным принципам: ионно-электронному или машинному (иногда с дополнительным использованием в последнем для управления цепями электрических машин электронных ламп). Применение первого принципа, который начал развиваться с тридцатых годов нашего столетия, по существу вследствие недостатков ионных аппаратов (ограниченный срок службы тиратронов, низкий  $\cos \varphi$  у регулируемого привода) ограничивается практически на сегодня мощностями двигателей порядка 5—10 kW (таймогрод, мототрол). Именно отмеченные недостатки полного управления регулируемыми приводами постоянного тока форсировали за последние годы развитие машинного принципа управления и регулирования с применением амплитуды, ротороля, регулекса и тому подобных машин с несколькими обмотками возбуждения. При использовании каскадного возбуждения машин постоянного тока мощность подобных приводов для практических целей не ограничена.

Сравнение различных схем непрерывного управления применительно к приводу реверсивного прокатного стана показывает, что схема с амплитудами, как схема с большим усилением, а следовательно, более чувствительная, требует обычно лишних обратных успокоительных связей.

Автор показывает также, что переходные процессы в подобных сложных схемах, рассматриваемые в полном комплексе, характеризуются дифференциальными уравнениями весьма высоких порядков, доходящих до 17—20. Разделяя процессы регулирования привода в системе Леонарда на два этапа: изменением напряжения генератора и изменением тока возбуждения двигателя, представляется возможным характеризовать процессы в зависимости от типа схемы уравнениями 5—7-го порядков. Докладчик кратко касается влияния на переходные процессы и устойчивость системы малых инерционных электромагнитных постоянных отдельных обмоток возбуждения и отдельных дополнительных управляющих машин. Он намечает также дальнейшие пути и задачи анализа, экспериментального исследования и сопоставления подобных сложных схем. В оживленно развернувшейся дискуссии по докладу приняли участие профессоры М. П. Костенко, А. Я. Бергер, Л. М. Пиотровский, И. М. Постников и С. А. Пресс. Дискуссия касалась значений коэффициентов усиления отдельных машин регуляторов, влияния на коэффициент усиления частоты импульсов вопросов устойчивости работы различных систем и их конструктивных особенностей, роли малых инерционных параметров, практической возможности использования интеграторов для решения упоминавшихся дифференциальных уравнений высоких порядков.

В заключительном слове проф. В. К. Попов остановился на некоторых особенностях магнитной системы с применением ротороля и регулекса и указал, что эти машины-регуляторы строятся фирмами на мощность не выше 500—750 W. Пример изменения коэффициента усиления одной из машин-регуляторов в зависимости от частоты: при частоте импульсов в 1 Hz коэффициент усиления равен 600, при 3 Hz—100, а при 10 Hz—всего лишь 10. При коэффициенте усиления порядка нескольких сот или тысяч в условиях высокой точности операций можно ожидать вообще неустойчивой работы, если более чем две инерционные постоянные имеют численные значения, близкие одно к другому. При трех инерционных постоян-

ных для устойчивой работы одна инерционная постоянная должна быть значительно больше одной из двух остальных. По общим выводам Pring'a относительно усилительных следящих систем при инерционных постоянных, одна должна быть велика, ( $p=2$ ) должны быть малы. Отношение большой постоянной к малым должно иметь величину порядка коэффициента усиления или больше.

Последним из группы докладов по электрическому машинам был доклад проф. С. А. Пресса на тему «Нормирование асинхронных электродвигателей для машиностроения и станкостроения».

Трехфазные короткозамкнутые асинхронные двигатели малой и средней мощности (примерно от 0,5 до 100 kW) занимают доминирующее положение в станкостроении и общем машиностроении. Несмотря на развитие сложных систем электропривода, все же асинхронный короткозамкнутый двигатель, вероятно, еще долго сохранит свое значение как наиболее простой, удобный в эксплуатации, надежный, дешевый и компактный приводный орган. Поэтому разработка и надлежащее нормирование асинхронных двигателей общего назначения (general purpose motors) является важнейшей задачей в области электропривода и электрооборудования промышленности. К сожалению, этому делу у нас уделяется недостаточное внимание.

Двигатели единых всесоюзных серий (типов АД и МА) вызывают справедливые нарекания со стороны потребителей, прежде всего в отношении пусковых моментов как начальных, так и в особенности минимальных. Низкие пусковые качества этих двигателей узаконены в ГОСТ 183-41, в котором допускаемое значение кратности начального пускового момента доведено до 0,9, а минимального момента до 0,6.

По своим габаритам двигатели всесоюзной серии АД оставляют желать много лучшего. Наконец, двигатели АД имеют серьезные недостатки в отношении механической прочности и надежности конструкции; в них нередко нарушается осевое крепление вентиляторного колеса, а иногда и самого ротора на валу.

На всесоюзном совещании по электрификации металлорежущих станков, происходившем в Харькове в 1941 г., были вынесены постановления о нормировании станочных двигателей не только для продолжительной, но и для повторно-кратковременной работы, включая также режим частых включений и торможений (динамический режим). Постановления совещания не были проведены в жизнь, и этот вопрос сохраняет свою актуальность и поныне.

При разработке и нормировании новых серий двигателей общего назначения следует учесть ряд положений, на которые до сих пор обращалось недостаточно внимания. Необходимо разрешать такие вопросы комплексно, рассматривая двигатель не как отдельный объект, но как часть электрифицированного станка или производственной машины. С этой точки зрения наиболее важными свойствами двигателя являются его надежность, безаварийность, механическая прочность, механическая характеристика (включая пусковые свойства). Относительно меньшее значение имеет стоимость двигателя, она чаще всего составляет несколько процентов от стоимости станка или машины в целом. Равным образом и возможные изменения на несколько процентов к. п. д. электродвигателя не могут иметь существенного значения в энергетике заводского электроснабжения, поскольку потери энергии в электродвигателе обычно малы по сравнению с потерями энергии в механических частях машины и станков.

Тепловой режим не может оставаться главнейшим критерием для нормирования электродвигателей. С одной стороны, как показывает опыт эксплуатации, выход двигателей из строя относительно редко связан с порчей изоляции вследствие перегрева обмоток. Гораздо чаще мы имеем дело с повреждениями изоляции вследствие вредных внешних воздействий (влага, токопроводящая пыль, охлаждающие эмульсии), а также с механическими повреждениями (перекосы, заедания, срывы и т. д.).

С другой стороны, температурный режим работы двигателей чрезвычайно разнообразен и мало поддается предварительному определению. Необходимо учесть и большое разнообразие в условиях нагрева в зависимости от вариантов конструкций (модификаций), всевозможных переделок (закрытие или открытие отверстий) на месте эксплуатации, температуры внешней среды и т. д.

На основе сказанного, учитывая также обширный опыт работы Американского института инженеров-электриков в области нормирования электродвигателей, следует в качестве «базисной» мощности устанавливать такую максимальную мощность, которую двигатель может, хотя бы кратковременно, отдавать без вреда для себя, вполне обеспечивая при этом нормальную работу станка. Эта мощность определяется, главным образом, электромагнитными и механическими свойствами двигателей.

В применении к асинхронным двигателям малой и средней мощности базисная мощность должна устанавливаться в связи с опрокидывающим моментом, который поэтому и должен стать главным фактором, определяющим работоспособность двигателя. Учитывая колебания напряжения сети и вводя некоторый запас, можно принять величину базисного момента равной 70% от опрокидывающего момента. Считая кратность опрокидывающего момента для двигателей обычного защищенного исполнения равной чаще всего 2,0 — 2,2, мы найдем, что базисная мощность составила бы примерно 140 — 150% от принятой длительной мощности.

При такой мощности параметры двигателя — скольжение, к. п. д. и  $\cos \varphi$  — имеют у существующих двигателей вполне приемлемые значения.

Введение базисной мощности должно привести не только к большей стабильности и определенности в деле нормирования двигателей, но и к единообразию в нормировании электродвигателей и приводимых ими в движение производственных машин или станков.

Тепловой режим двигателей, в зависимости от их режима работы, условий охлаждения и вентиляции, от принятого срока службы изоляции и т. д. рациональнее всего характеризовать введением «коэффициента использования» — отношения допустимой по нагреву мощности, соответствующей данным условиям, к базисной мощности.

В дальнейшем, по мере улучшения качества изоляции, влияние теплового режима должно сказываться все меньше и меньше на методику нормирования. Применение высокотемпературной и вместе с тем устойчивой к внешним воздействиям изоляции (стеклянная, силиконовая) дает конструктору большую свободу действия и значительно увеличивает степень эксплуатационной надежности двигателей. Из этого не следует, что надо фактически допускать высокую рабочую температуру, соответствующую данному сорту изоляции. Как показывают расчеты Alger'a и Jones'a, технико-экономические условия ограничивают температуру перегрева обмоток величиной примерно 80° С. Удорожание двигателей, вызванное применением высококачественной изоляции и улучшением механической конструкции, должно в самое короткое время себя окупить, если благодаря этому будет достигнуто увеличение надежности и бесперебойности в работе производственных машин, а следовательно, их производительности. Особенно это относится к рабочим режимам с переменным и трудным учитываемым наперед графиком нагрузки (кратковременный, повторно-кратковременный, динамический режимы); в таких режимах, например, большей частью работают двигатели металлорежущих станков.

Пусковые свойства двигателей общего назначения должны быть резко повышены по сравнению со свойствами двигателей всесоюзных серий. Как минимум, следует требовать, чтобы пусковой момент (за весь пусковой период) не был меньше 50% от опрокидывающего.

Автор закончил доклад указанием на то, что предложенные нормы и величины являются ориентировочными и подлежат дальнейшему обсуждению и уточнению.

Далее был заслушан доклад проф. С. И. Зилитинкина «Новые системы и приборы для дистанционных измерений электрических и неэлектрических величин».

Докладчиком теоретически и практически разработана методика применения для измерительных целей специальной формы электрического периодического тока, состоящего из периодических зарядов и разрядов конденсатора. Дана теория протекающих при этом процессов, отличающихся тем замечательным свойством, что энергия каждого отдельного заряда и разряда конденсатора, а также мощность и средний ток периодически повторяющихся его аperiodических зарядов и разрядов, при определенных условиях, в огромных пределах изменений сопротивлений от

единиц до сотен тысяч омов совершенно не зависят от сопротивления цепей заряда и разряда. Между тем эти цепи являются основными рабочими цепями системы. В то же время средний ток зарядов и средний ток разрядов конденсатора, определяющиеся напряжением источника энергии, емкостью конденсаторов и частотой периодического процесса, удобно и точно измеряются магнитоэлектрическими приборами: гальванометрами и логометрами. Благодаря всем этим свойствам, весьма отличным от тех, которые имеют место в цепях постоянного и синусоидальных токов, система с периодически повторяющимися аperiodическими токами заряда и разряда конденсатора представляет большую ценность для практических приложений, и в первую очередь для дистанционных измерений.

Докладчик первоначально разработал два типа «конденсаторных анемометров» с гальванометром и с логометром, а затем еще два типа комбинированных анемометров: «анемометр для определения скорости ветра в любых двух пунктах и для непосредственного измерения отношения этих скоростей» и «анемометр для определения скорости ветра в любых двух пунктах и измерения градиента этой скорости». Два последних прибора создают новые возможности для метеорологических наблюдений.

Наконец, на базе всех этих работ докладчик разработал новый универсальный дистанционный измерительный прибор для измерений ряда электрических и неэлектрических величин: токов напряжений, емкостей, сопротивлений, температур, частот, угловых скоростей вращающихся тел, а также линейных скоростей жидких и газообразных потоков. Прибор разработан в двух вариантах: с обычным стрелочным гальванометром и с дифференциальным.

Отличительными чертами новых дистанционных приборов являются: а) широкий круг измеряемых величин (электрических и неэлектрических); б) большой диапазон значений каждой измеряемой величины; в) работа в условиях автоматической самокомпенсации напряжений в измеряющих и измеряемых цепях. Следствие этого — независимость показаний приборов от приносимых в эти цепи паразитных сопротивлений, индуктивностей и емкостей в том числе независимость от линий связи и промежуточных контактов, входящих в измерительную цепь устройства.

Доклад проф. Ю. В. Баймакова «Новое в области электрического фальтрования газов» был посвящен обзору существующих систем электрофильтров. Эти фильтры, разные по форме — трубчатые, пластинчатые, сотовые, электрофильтры-скрубберы — достигают больших размеров и производительности. Условия их работы и показатели во многом зависят от природы газов и частичек пыли, образующих взвесь.

Применяемые электрофильтры отличаются громоздкостью и относительно невысоким коэффициентом улавливания. Расстояние между электродами меняется от 5 до 12 см. Время пребывания газа в электрическом поле — от 1,5 до 6 сек. При градиенте между электродами от 4—5,5 kV/cm сила тока, снимаемая с одного коронирующего проводника, изменяется в пределах от 0,4 до 0,5 mA. Коэффициент улавливания обычно менее 0,93.

В настоящее время возникают требования создания более интенсивно действующих аппаратов и приближения к коэффициенту улавливания, равному единице.

Осаждение пыли является сочетанием электродинамического и аэродинамического процессов, а не одного электродинамического, как было принято думать. Скорость электрического ветра, вызываемого местным коронированием на электроде, может достигать 10 м/сек.

Показана возможность значительной интенсификации работы фильтров за счет уменьшения межэлектродного расстояния; при этом может быть достигнута величина тока 8—10 mA. Интенсифицированные фильтры требуют очень высокой точности в изготовлении и сборке и могут работать лишь при слабых концентрациях пыли: — не выше 0,1—0,2 g/m<sup>3</sup>, почему обязательно предварительное обеспыливание в мультициклонах. Отряхивание электродов лучше производить электровибраторами. Для питания электрофильтров новой системы следует применять кенотроны или газотроны. В особо ответственных случаях рекомендуется двухполупериодная схема выпрямления и параллельное включение конденсаторов.

Значительное упрощение схемы дает применение на высокой стороне селеновых выпрямителей, помещенных в общий кожух с трансформатором. Аппараты небольших размеров с небольшими расстояниями между электродами можно питать непосредственно переменным током (коронирующие точки являются выпрямителями), но величина получаемого при этом постоянного тока на 40—45% ниже, чем при нормальном выпрямлении.

В заключение работы секции был заслушан доклад доц. В. Т. Ренне «Пути улучшения качества бумажных конденсаторов низкого напряжения». В докладе отмечено, что основным методом снижения удельного объема данных конденсаторов является снижение толщины бумаги. При достигнутой минимальной толщине 6—7 м, при двух слоях бумаги и пропитке галоваксом ( $\varepsilon=5$ ) можно получить при рабочем напряжении 150—160 V удельный объем 8—10 см<sup>3</sup>/мF. В случае применения для пропитки олеоакса ( $\varepsilon=10$ —20) выигрыш в емкости конденсатора не превышает 50%, а вместе с тем резко усиливается зависимость емкости от частоты и температуры и возрастает tg $\delta$ .

Для конденсаторов с обкладками из фольги минимальное число слоев бумаги между обкладками равно двум, так как при одном слое наличие в бумаге проводящих частиц приводит к короткому замыканию обкладок. Если металл наносится непосредственно на бумагу методом испарения в вакууме, можно применить один слой бумаги, так как за счет оплавления тонкого слоя металла в момент закорачивания обкладок место короткого замыкания изолируется от последних. При рабочем напряжении 120—150 V конденсаторы из металлизированной бумаги могут быть изготовлены с удельным объемом 4 см<sup>3</sup>/мF. Такие конденсаторы, в отличие от обычных бумажных, самовосстанавливаются после пробоя. Недостатком их является пониженное сопротивление изоляции.

Применяя форсированный режим вакуумной сушки (температура 135—140° C) для конденсаторов с обкладками из фольги можно получить сопротивление изоляции 10 000—20 000 M  $\Omega$ ·мF. Длительное сохранение столь высоких значений сопротивления может быть достигнуто герметизацией конструкции, причем следует применять сочетание металла с керамикой или специальным стеклом. Герметизация дает также стабильность емкости: при хранении в течение нескольких лет можно получить снижение емкости не более 1—2%. Для герметических бумажных конденсаторов с повышенным рабочим напряжением 500—1 000 V целесообразно переходить от пропитки твердыми массами (парафин, церезин, галовакс) к жидкой (масло, совол); в этом случае можно повысить рабочий градиент до двух раз и снизить объем конденсатора.

Температурный коэффициент емкости конденсатора зависит от плотности бумаги и типа пропиточной массы. Для обычной бумаги (плотность 1,0 g/cm<sup>3</sup>) при пропитке сплавом галовакса с бензилцеллюлозой можно получить ТКЕ 0,005—0,01% на 1° C; изготавливая конденсатор из параллельно соединенных секций из бумаги обычной и повышенной (1,25 g/cm<sup>3</sup>) плотности при пропитке галоваксом, можно обеспечить весьма малое изменение емкости с температурой в интервале от—26 до+50° C.

Обычный допуск по емкости для бумажных конденсаторов составляет  $\pm 10$ —20%. Применяя подбор по емкости параллельно соединенных секций, можно повысить точность емкости до  $\pm 2$ —3%, при пропитке галоваксом такую же степень точности можно обеспечить и для односекционных конденсаторов, применяя новый метод электротермической подгонки емкости (нагрев при 80° C при одновременном воздействии электрического поля с градиентом 10 kV/mm даст заметное повышение емкости, которое можно регулировать, меняя время обработки).

Проф. А. А. МОРОЗОВ  
и проф. М. М. МИХАЙЛОВ



# Пути развития техники релейной защиты энергосистем

В Московском Доме ученых Академии наук СССР

15 апреля с. г. в Московском Доме ученых состоялся доклад начальника Центральной службы защиты Мосэнерго, кандидата техн. наук И. И. Соловьева «Некоторые вопросы современного состояния и путей развития техники релейной защиты энергосистем», организованный электротехнической секцией МОНИТОЭ.

На докладе присутствовали работники Министерств электростанций и электропромышленности, проектных и научно-исследовательских учреждений, Мосэнерго и др.

Докладчик отметил, что релейная защита является наиболее сложной частью системной автоматики и в настоящее время развилась в обширную и специфическую область техники. Докладчик остановился на вопросах, представляющих в настоящее время наибольший интерес, а именно: защита генераторов и трансформаторов большой мощности и защита высоковольтных линий основной части энергосистем.

**Защита генераторов большой мощности.** Наибольшие трудности в защите генераторов связаны с правильным учетом токов небаланса во вторичных цепях дифференциальных защит и защит от замыкания на корпус при переходных процессах, вызванных сквозными короткими замыканиями. Эти токи небаланса пока что не поддаются расчету, и потому наряду с теоретическими исследованиями этих вопросов необходимо организовать экспериментальные исследования большого масштаба на специальных установках с большими токами (порядка 10—15 тыс. А). Необходимость сказанного подтверждается тем, что в настоящее время имеется немало случаев неправильной работы указанных защит, хотя они очень просты по своему принципу и выполнению. Что касается защиты от замыкания обмоток статора на корпус, то в настоящее время имеются два принципиальных исполнения: 1) американское, т. е. глухое заземление нейтральной генераторов, преследующее цель отключения дифференциальной защитой генератора при повреждениях на корпус, и 2) европейское, т. е. заземление нейтральной генераторов через высокоомное сопротивление, преследующее цель ограничения токов замыкания на корпус и осуществления специальной защиты. В условиях отсутствия быстродействующей отключающей аппаратуры последнее решение является вполне правильным. Специальные защиты от замыкания на корпус являются таким образом необходимыми и они должны совершенствоваться как в смысле ускорения действия и повышения чувствительности, так и в смысле повышения надежности работы в аварийных режимах.

Небезынтересно привести статистические данные по системе Мосэнерго за 3 последних года, где имели место 16 случаев работы защиты от замыкания на корпус: из них 14 случаев, или 87,5%, правильных, а 2 случая, 12,5%, неправильные. Оба неправильных случая вызваны дефектами релейной аппаратуры.

Вопрос защиты генераторов от сверхтоков в настоящее время не решен сколь-либо удовлетворительно. Существующие максимальные токовые защиты с вольтметровой блокировкой не обеспечивают правильную работу при коротких замыканиях, главным образом, несимметричных за трансформаторами и реакторами, причем при отсутствии форсировки возбуждения—из-за недостаточности реле напряжения. Максимальные токовые защиты с повышенными токами трогания и без вольтметровой блокировки вообще не могут быть рекомендованы на генераторах с форсировкой и без форсировки возбуждения, как мало надежные, так как в первом случае может иметь место ложное действие, а во втором случае отказ действия.

**Защита трансформаторов большой мощности.** Наиболее распространенными защитами на трансформаторах большой мощности являются, как и на трансформаторах средней мощности, газовая, дифференциальная и максимальные токовые защиты. В отдельных случаях максимальные токовые защиты выполняются с вольтметровой блокировкой или направленные. Установившиеся в первый период по-

явления трансформаторов большой мощности дополнительные защиты (разделение дифференциальной защиты обмоток высоких напряжений, суммарные токовые защиты, защиты от повышения напряжения и др.), как показал опыт, себя не оправдали и были в свое время ликвидированы.

Газовая защита, по принципу очень удачная и простая, реагирует на все виды повреждений внутри кожуха трансформатора и часто даже раньше возникновения короткого замыкания, в работе отказывает редко, но в то же время дает 15% случаев неправильной работы. Происходит это, главным образом, из-за нарушения изоляции вблизи газового реле вследствие разедания резины трансформаторным маслом, однако явление это может быть устранено путем специальной подводки и разделки кабеля. Реже возникают случаи повреждения самих реле в виде попадания масла в поплавки или ртутные контакты.

Дифференциальная токовая защита дает наибольший процент правильной работы (до 50%). Основной причиной этого являются неудовлетворительная эксплуатация и низкое качество монтажа. С технической точки зрения остается пока что неразрешенным вопрос отстройки защиты от намагничивающих токов как при включении трансформатора под напряжение, так и при восстановлении напряжения после отключения сквозного короткого замыкания. Попытки решить этот вопрос путем отстройки по времени, отстройкой по току, блокировкой с помощью реле напряжения не привели к положительным результатам.

Главной причиной неуспеха этих решений является сравнительно медленное затухание намагничивающих токов у мощных трансформаторов. Можно указать еще на одну из последних попыток—это введение дополнительного торможения от высших гармоник, содержащихся в намагничивающем токе. Для решения этого еще недостаточно изученного вопроса необходимы исследование протекания процессов намагничивания в трансформаторах различных типов, а также разработка дифференциальных защит на новых принципах.

Максимальная токовая защита является резервной защитой за защитами линий и шин, а также самого трансформатора от сверхтоков. Однако, на мощных трансформаторах часто оказывается невозможным получить удовлетворительную чувствительность вследствие малой разницы между возможным максимальным током нагрузки и минимальным током короткого замыкания. Решение этого вопроса должно быть, повидимому, аналогичным решению вопроса защиты генераторов от сверхтоков.

**Защита высоковольтных линий.** Наибольшее распространение за последние годы получили дистанционные защиты, однако они обладают относительной сложностью и сравнительно большими выдержками времени резервных ступеней. Требования динамической устойчивости системы не позволяют считать их удовлетворительными в основных сетях системы, и здесь за последние годы широко внедряются более быстродействующие типы защиты: продольные дифференциальные типа НСВ и транслей (для линий малой длины), направленные и дистанционные защиты с высокочастотной блокировкой (для средних линий и частично для линий сверхбольшой протяженности). В качестве вспомогательных защит применяются токовые отсечки и поперечные дифференциальные защиты на параллельных линиях.

Кроме перечисленных основных и вспомогательных защит линий в основных сетях системы приходится устанавливать еще резервные защиты, которые необходимы, главным образом, на случай отказа в выключателях. По идее эти типы защиты должны быть очень простыми и надежными, но тем не менее на сегодня не имеется хороших решений этого вопроса и в каждом отдельном случае приходится решать его по-разному и не всегда удовлетворительно.

Докладчик отметил ряд трудностей технического порядка, с которыми приходится сталкиваться в условиях эксплуатации. Например, все быстродействующие защиты требуют координации их действия с работой разрядников устанавливаемых на линиях электропередачи, координации с временем перегорания плавких предохранителей во вто-

ричных цепях трансформаторов напряжения вплоть до замены их специальными быстродействующими автоматами или введения сопротивлений несимметрии. Особо были отмечены трудности, имеющиеся в защите сверхдлинных линий (порядка 200 км), где вопрос чувствительности пусковых органов приобретает исключительную остроту из-за соизмеримости полного сопротивления нормального и аварийного режимов. Пути решения этого вопроса связаны с изысканием новых принципов и конструкций реле, а также методов анализа режимов работы энергосистем.

**Необходимость упрощения защит.** Как показал имеющийся большой опыт эксплуатации различных типов и схем релейной защиты, чрезмерное усложнение схем, учитывающее различные явления несимметричных и переходных режимов, вызывает вместо ожидаемого улучшения работы защиты ухудшение, что достаточно ясно показывает статистика случаев неправильной работы защиты.

Таким образом в настоящее время вполне назрела необходимость упрощения схем и защиты в целом. Упрощение релейной защиты следует понимать не в простом сокращении количества реле за счет усложнения функций других реле, а главным образом, за счет сознательного отказа от учета маловероятных случаев несимметричных режимов, повышения надежности и качества релейной аппаратуры и использования новых более совершенных принципов.

В заключение докладчик отметил, что несмотря на имеющиеся трудности теоретического и практического характера, советские ученые и инженеры добились хороших результатов и подняли технику релейной защиты на высокий уровень, о чем свидетельствуют показатели правильной работы релейной защиты: например, из всех случаев работы релейной защиты по энергосистемам Министерства электростанций в 1944 г. 97,8% составили случаи правильной работы, а по системе Мосэнерго 99% в 1944 г. и 99,3% в 1945 г.

После окончания доклада развернулись прения.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. Атабеков (ЦНИЭЛ) подверг рассмотрению вопрос о применении для целей защиты комбинированных фильтров токов фазовых последовательностей. Переход к фильтровым схемам является одним из важнейших направлений современной релейной техники. По мере разработки и конструктивного совершенствования фильтров, сопутствовавших развитию самого метода симметричных составляющих, фильтры становятся постепенно неотъемлемой частью релейных защит. Применение фильтров наряду с упрощением защит улучшает их качества. Использование для целей пуска одного комбинированного фильтра встречает препятствия; практически более приемлемые решения получаются при использовании двух различных фильтров и отдельных пусковых органов. Применение комбинированных фильтров для целей пуска измерения одновременно, а также для органов направления мощности встречает принципиальное возражение.

В области фильтров необходимо проведение исследовательских работ; при этом в специальном изучении нуждаются схемы с применением нелинейных элементов. Далее Г. И. Атабеков отметил некоторые особенности графо-аналитического метода проектирования защит линии электропередачи большой протяженности. В заключение были отмечены существующая в Советском Союзе разрозненность научно-исследовательских сил в области техники релейной защиты и отсутствие развитой релейной промышленности. Быстрое развитие отечественной релейной промышленности и научно-исследовательской работы по релейной технике является сейчас задачей, не терпящей отлагательства.

Кандидат техн. наук В. Л. Фабрикант (ТЭП) сказал, что в ряде вопросов, затронутых докладчиком, действительно имеются определенные трудности, которые могут быть разрешены только путем глубоких исследований, в соответствующем образом оборудованных лабораториях, создание которых диктуется задачами развития электроэнергетики СССР в четвертой пятилетке.

Кандидат техн. наук А. М. Долгинов (ВЭС Мосэнерго) высказал пожелание, чтобы к решению вопросов релейной защиты привлекались специалисты-высоковольтники, поскольку многие исходные данные для релейной защиты (величина сопротивлений вольтовых дуг, сопротивлений в нейтральных генераторов и др.) должны определяться специалистами высоковольтной техники. Далее А. М. Долгинов указал на то, что в настоящее время требования замедления действия защиты на линиях с разрядниками во многих случаях могут быть сняты, учитывая наличие автоматического повторного включения. В заключение он сообщил, что Центральная лаборатория ВЭС Мосэнерго работает сейчас над проблемой непрерывного контроля изоляции обмоток генераторов и трансформаторов, а также изоляции кабелей и линий электропередачи. Этот контроль при известных условиях может быть использован для защиты объектов, причем импульс на отключение может быть подан в начальной стадии развития повреждения.

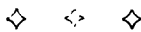
Инж. Я. М. Смородинский (ТЭП) отметил, что среди отмеченных докладчиком актуальных проблем видное место занимают защиты с высокочастотной блокировкой и дифференциальные защиты трансформаторов.

В 1941 г. релейная лаборатория Теплоэлектропроекта начала разработку фильтровой высокочастотной защиты, которая в настоящий момент уже вышла из стадии экспериментирования; изготовленные несколько комплектов релейной части этой защиты готовы к установке в энергосистемах. Высокочастотные приемо-передатчики разработаны и изготовлены в ЦНИЭЛ. Однако, совершенно не разрешенным остается вопрос изготовления аппаратуры присоединения (конденсаторы, заградители), ввиду чего задерживается ввод в эксплуатацию указанных типов защиты. Необходимо организовать комплектный выпуск высокочастотной защиты на одном из заводов Министерства электропромышленности.

Инж. Е. Д. Зейлидзон (Министерство электростанций) указал, что в отношении дистанционной защиты имеется некоторая недооценка и что требования устойчивости в ряде случаев могут быть обеспечены этой защитой; так, если место повреждения расположено близко к одной из питающих сторон, то оно отключается с этой стороны первой зоной защиты, т. е. достаточно быстро, а с противоположной стороны — второй зоной защиты, но в этом случае место короткого замыкания будет уже удаленным и устойчивость не нарушится. Е. Д. Зейлидзон в заключение сказал, что при современном уровне наших знаний могут быть разработаны самые разнообразные схемы защиты с учетом всевозможных требований, но для того, чтобы их осуществить, нужна хорошая релейная аппаратура и в достаточном количестве.

В заключение прений проф. П. Г. Грудинский (Министерство электростанций) сделал обобщающие выводы по основным вопросам, затронутым в докладе и выступлениях, и отметил большую работу, сделанную советскими специалистами в области релейного дела. П. Г. Грудинский отметил необходимость более частых встреч специалистов релейной техники для обмена мнений и обсуждения наиболее сложных и актуальных вопросов.

*Инж. М. И. ЦАРЕВ*



## Учебник по основам электропривода

Проф. В. К. Попов. **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.** Допущен в качестве учебника для энергетических вузов и электротехнических специальностей. Госэнергоиздат, 1945, 672 стр., цена 27 руб., тираж 15 000 экз.

Электропривод применяется во всех отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в военной технике. Теория его работы неотделима от рассмотрения исполнительных механизмов и технологических заданий, а в электротехнической части базируется на всех видах машин и аппаратов управления. Поэтому составление учебника по электроприводу, несомненно, является одной из труднейших задач в области учебной литературы. Систематизация материала, выбор примеров и последовательность изложения допускают большое число вариантов в соответствии с обширностью охватываемых вопросов. В связи с этим следует отметить уместность и справедливость замечания проф. В. К. Попова (стр. 3 предисловия) о том, что специфика того или другого высшего учебного заведения и существующей в нем научной школы определяет ряд особенностей как в смысле общего характера изложения материала, так, иногда, и последовательности изложения отдельных вопросов.

В части общего порядка изложения рецензент разделяет точку зрения автора: курс начинается с выбора габаритов оборудования по термической устойчивости с проверкой по предельным нагрузкам (для двигателей по опрокидывающим моментам), далее следует изложение основ динамики электропривода, статических механических характеристик, теории неустановившихся режимов, регулировочных свойств, синхронизации хода и других свойств электропривода.

Однако, нагрузочные диаграммы электропривода целесообразно выделить из гл. V «Переходные режимы и нагрузочные диаграммы электропривода». Это позволило бы, с одной стороны, более стройно построить теорию неустановившихся режимов и, с другой стороны, более полно изложить нагрузочные диаграммы в заключительной главе курса. Нагрузочная диаграмма должна суммировать все выводы теории электропривода и служить переходом к его конструктивному осуществлению.

Автор правильно счел возможным исключить из курса вопросы улучшения  $\cos \varphi$ , мало связанные по существу с структурой данного курса (стр. 4), однако логическим развитием этого положения было бы исключение гл. IX (Выбор рода тока для промышленных электроприводов), ибо эта глава теснейшим образом связана с системой электроснабжения и характером привода. На стр. 597 и в других местах проф. В. К. Попов справедливо указывает на необходимость сравнительных вариантов и невозможность вывода общих решений на основе работы отдельных механизмов. Этот вопрос следует отнести к курсу заводских сетей и, частично, электрооборудования заводских механизмов, включенных в нормальный учебный план.

В остальном расположение и подбор материала для учебника не вызывает возражений.

Книга охватывает основные методы расчета, применяемые в нашей практике. Приведение в ней первоисточников стимулирует учащегося к самостоятельной работе и позволяет по интересующему вопросу выйти за рамки учебника. Подчеркиваются неточности отдельных методов и вопросы, нуждающиеся в доработке.

При подготовке рукописи до 1945 г. автор, конечно, не мог ввести в учебник теорию работы непрерывно регулируемых электроприводов (системы с регулятором, ротатором, амплитудным управлением), так как эти системы управления к этому времени только на-

чали осваиваться у нас в Союзе. Менее оправдано исключение из курса теории работы двигателей, питаемых от ионных преобразователей, так как теория этих процессов хорошо разработана рядом авторов.

Характер курса и некоторые определения (стр. II «Роль человека все больше и больше сводится к планированию и управлению исполнительными механизмами») указывают на целевую установку учебника в области подготовки инженера по эксплуатации и проектированию промышленных предприятий. Если бы автор учел роль инженера в конструировании, расчетах и наладке электроприводов, т. е. имел бы в виду профиль заводского конструктора, то некоторые отделы курса теории электропривода, возможно, были бы изложены под другим углом зрения. В этом, конечно, и сказываются особенности того или другого высшего учебного заведения, на базе которого складывается курс основ электропривода.

В гл. II приводится классическая теория нагрева и основные, общепринятые методы выбора мощности двигателей (по эквивалентному току или моменту, по средним потерям). Указываются необходимые поправки. Приводятся практические приемы расчета. В этой части материал не вызывает никаких возражений. Однако, при трактовке вопроса о нагреве неоднородного тела (§ 7) допущены неточности. Постоянные времени ряда показательных функций определяются всем комплексом и входят в уравнения нагрева для любой из деталей, но коэффициенты  $C_1, C_2, C_3$  определяются для каждой детали и характеризуют именно нагрев ее, а не всей машины.

В § 5 увязывается номинальная мощность с длительной (стр. 34). Вместе с тем крановые двигатели имеют номинальную мощность, но у них отсутствует длительная.

На стр. 41 необстоятельно рассмотрен вопрос о допустимой по коммутационным свойствам перегрузке двигателей постоянного тока. Исключены из рассмотрения ско-

рость нарастания тока  $\frac{dI}{dt}$  и связанные с ней трансформаторная э. д. с., искажение поля в зазоре.

На стр. 87 выводится связь между длительной и повторнократковременной мощностью двигателя, наличие которой отрицается работами Шибелера.

В конце § 13 (стр. 80) пропущен один важный фактор: метод среднеквадратичного тока или момента предполагает наличие постоянных потерь в течение пауз; если последние соответствуют полному отключению машины, то расчет даст несколько завышенную мощность.

В гл. III (Основы динамики привода) достаточно полно и обстоятельно изложены основные положения. Особенно хорошо разобран вопрос о потерях в передачах и их учет при вычислении приведенных величин вращающего момента и  $GD^2$ . Однако, недостаточно развит вопрос о работе приводов с меняющейся и мися связями. Уравнение в обобщенных координатах (уравнение (61), стр. 107), хотя и приведено, но нигде не использовано. Уравнение (63) охватывает не все случаи приводов с переменным  $GD^2$  и следовало бы указать область его применения и дать обобщенную форму, приведенную в статье Ракиты (ВЭП № 5—6, 1940 г.).

В этом разделе имеются некоторые недосмотры; так, на фиг. 68 по оси абсцисс должен быть отложена э. д. с.;



если по оси абсцисс отложить время, как это указано на чертеже, то диаграмма теряет прямолинейный характер.

На стр. 151 указано, что продолжительность пуска меняется пропорционально маховому моменту, приведенному к валу двигателя. Однако продолжительность пуска зависит не только от  $GL^2$ , но и от числа оборотов.

Таким образом, например, для высокооборотного двигателя продолжительность пуска повысится на 11%, а не снизится вдвое, как указано в примере.

Гл. IV (Механические характеристики двигателей) изложена с указанием двух основных методов, — получивших наиболее широкое применение. Некоторая неполнота этой главы определяется отсутствием решения так называемых обратных задач, имеющих, несомненно, большое практическое значение.

Нечетко трактован характер кривых рис. 88. Он определяется малой скоростью при приближении к началу координат, а не малым сопротивлением.

Гл. V, как уже указывалось выше, объединяет два больших вопроса: переходные режимы и нагрузочные диаграммы. Разделение этих вопросов и отнесение второго в заключительную часть курса, несомненно, облегчило бы изложение этих наиболее сложных разделов. В этой главе изложен обширный материал и приведен ряд применяющихся методов расчета. Хорошо изложена классификация нагрузочных диаграмм и вопросы устойчивости работы агрегатов. Разобраны электрические и механические переходные режимы в размерных и относительных единицах.

К некоторым недочетам этой главы следует отнести:

а) применение на стр. 248 обозначения  $\lambda$  для пути, так как далее эта буква обозначает коэффициент самоиндукции; б) рис. 162 методически неправилен, так как скорости в точках А и В одинаковы, т. е. точка В должна находиться во втором квадрате, а не четвертом; в) в формуле (290) пропущен знак + (числитель дроби); г) страдает излишней категоричностью утверждение «При переменном значении коэффициента самоиндукции якоря аналитическое решение из-за трудности учета насыщения оказывается невозможным» (стр. 384); д) нельзя согласиться с утверждением на стр. 393 о том, что переходные режимы асинхронного двигателя мало влияют на процессы пуска; е) на стр. 418—419 не приведена оценка методов выбора повышенного скольжения; ж) утверждение (стр. 427) «...имеет настолько сложный общий интеграл, что о практическом использовании его обычно не может быть и речи» противоречит современной практике применения интегрирующих машин.

Трактовка электрических переходных процессов в основном для ненасыщенных цепей ( $L=const$ ) и отсутствие анализа процессов насыщения являются наиболее существенным пробелом данной главы.

Главы VI и VII посвящены вопросам регулирования скорости. В них изложены основные методы регулирования, применявшиеся до 1940 г. Ряд современных методов регулирования, только осваиваемых нашей промышленностью, не нашел отражения в учебнике. Однако, состояние вопроса на 1945 г. было таково, что это нельзя поставить в упрек автору. Главы достаточно полно и правильно освещают процессы регулирования, освоенные до войны нашими заводами, и характеризуют эксплуатационные особенности этих процессов.

В учебнике имеются некоторые недоработанные места. К ним, например, следует отнести разбор (стр. 473) работы до основной скорости и с ослабленным полем. Нет оценки распределения регулирования между этими двумя зонами с точки зрения габаритов машин и величины ускорений, т. е. фактической продолжительности цикла.

На рис. 246 (стр. 441) указана зависимость веса и цены машины от ее быстроходности, причем 100% числа оборотов в минуту соответствуют нулевые значения обоих факторов. Вероятно, по оси ординат отложены лишь относительные приращения веса и цены. Надо изменить или обозначения, или шкалу по оси ординат.

При анализе (стр. 449) причин неустойчивости системы Леонарда при малых скоростях пропущен один из

основных факторов — статочный магнетизм, делающий скорость неопределенной при малых возбуждениях генератора Леонарда. Не рассмотрен также полезный режим работы, вытекающие из него последствия и меры борьбы с данным явлением. Этот вопрос, правда, затронут далее в § 97 (стр. 458), но параграф объемом в одну страницу только указывает на опасность, ползучих скоростей и применение самогашения поля, как средства борьбы с этими явлениями. Теория процессов, методы их расчетов, примерные величины и способы получения малых устойчивых скоростей в системе Леонарда не рассмотрены. Также мало уделено внимания процессам качаний в сложных системах и теории противоколебательных мер, применяющихся в мощных приводах или при требованиях особой точности как, например, для управления копировальными станками).

На стр. 461 указана чрезмерно большая цифра повышения напряжения на обмотке возбуждения (два, три раза). Такая форсировка едва ли допустима по условиям протекания процессов в главной цепи и потребовала бы большого повышения мощности возбудителей и расхода энергии на возбуждение, так как переход к установившемуся току возбуждения рекомендуется делать с помощью введения добавочного сопротивления.

Нечетко формулировка на стр. 514: «посредством использования маховых масс... скорость будет повышена...». Надо понимать, что речь идет о сохранении скорости в течение некоторого времени после перехода к новым условиям, более высокой, чем определяемая новым установившимся режимом.

На стр. 578 весьма неточно определено статическое и астатическое регулирование.

§ 127 (Поддержание постоянства скорости двигателей посредством инерционно-электронных аппаратов) и § 128 (Возможности использования амплитуды) совершенно недостаточно освещают поставленные вопросы и вообще они относятся к курсу управления приводами, а не к теории электропривода. В первом курсе они могли бы получить достаточное развитие и конкретизацию принимаемых решений. То же можно сказать о § 130 (Понятие о следящем приводе) и § 131 (Следящий привод с электромагнитными и гидравлическими муфтами). В этих параграфах (как указывает и само название § 130) даются только понятия, притом далеко не полные, об управлении с помощью переменных кинематических связей. Этот материал должен быть развит в другом курсе, а в том объеме, как он изложен в книге, он мало полезен и лишь загромождает курс теории электропривода.

Гл. X можно было бы включить, как один из разделов, рекомендуемой рецензентом заключительной главы (Рабочие диаграммы). При этом материал § 140, 141 и 142 в части схем управления следовало бы отнести к курсу управления приводами.

В § 141 имеются неточности: схемы с применением реактора не требуют разрыва тока. Причины возникновения толчков тока при включении вращающейся машины лежат вовсе не в потере скорости двигателя (стр. 623), а вызываются появлением постоянной составляющей переходного процесса включения переменного тока и индуцируемой во вращающейся машине э. д. с. за счет демпфирования возбужденного ранее потока замкнутыми статорной и роторной обмотками.

Гл. XI (Выбор конструктивного типа двигателя) с большим успехом можно было бы отнести к курсу электрических машин; эта глава имеет малую связь с теорией электропривода.

Основной материал книги четко разбит на разделы и изложен в определенной системе. Достаточно полно подобраны иллюстрации и примеры.

Подводя итог, можно сказать, что книга проф. В. К. Попова является доброкачественным учебником по основам электропривода, правда на 1946 г. уже требующим дополнений. Его создание в военное время является несомненной заслугой автора и издательства.

Доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ



## Электрификация США в 1945 г.

(Обзор)

Развитие электрификации США в 1945 г. шло под знаком завершения войны и начатой реконверсии в промышленности. Сильный рост электробаланса, характеризовавший военный период, сменился тенденцией к понижению (табл. 1, рис. 1).

Суммарный электробаланс США (включая промышленные установки) составлял в 1944 г. около 280 млрд. kWh (рис. 2).

По сравнению с рекордной цифрой предшествующего года выработка станций общего пользования в 1945 г. понизилась на 8,2 млрд. kWh (на 3,5%).

Ввиду благоприятных метеорологических условий гидроэлектростанции дали на 6,2 млрд kWh больше, чем в

1944 г., зато выработка тепловых станций сократилась на 14,4 млрд. kWh (на 9,3%).

В годы войны сильно возросла роль государственных (главным образом, гидравлических) электростанций: их выработка поднялась с 5,5 млрд. kWh, в 1939 г. до 28,5 млрд. kWh, в 1945 г., а удельный вес в балансе централизованного сектора электроснабжения—с 4,2% до 12,8%. Местные правительственные (штатные), муниципальные и кооперативные установки произвели в 1945 г. 13,3 млрд. kWh против 7,1 млрд. kWh в 1939 г. Государственные и местные правительственные установки (включая общественные), вместе взятые, покрыли почти 1/3 всего прироста выработки станций общего пользования за истекшие 6 лет.

Правительственная электросистема TVA (Администрация долины р. Теннесси) стала одной из крупнейших в США: в 1945 г. ее электробаланс выражался цифрой в 11,5 млрд. kWh, а максимальная нагрузка—1,9 млн. kW. В распределении энергии TVA участвовали 91 муниципальная и 46 кооперативных систем.

Другая мощная правительственная электросистема, созданная в северо-западной части США на базе гидроэлектроцентралей Гранд Кули и Бонневиль, обслуживала во время войны, главным образом, производства военного значения, в том числе 5 алюминиевых и 12 других металлургических заводов и др.

Сокращение расходной части электробаланса идет почти исключительно по линии промышленности в связи с начатым переводом некоторых ее отраслей на производство для гражданских нужд (табл. 2).

Таблица 1  
Динамика выработки электроэнергии на станциях общего пользования

Годы	Тепловые станции, млрд. kWh	Гидростанции, млрд. kWh	Все станции	
			млрд. kWh	% к 1939 г.
1939	86,3	44,0	130,3	100,0
1940	97,2	47,8	145,0	111,5
1941	116,9	51,3	168,2	129,0
1942	125,0	64,2	189,2	145,2
1943	147,0	74,0	221,0	161,6
1944	156,6	74,0	230,6	177,0
1945	142,2	80,2	222,4	170,6

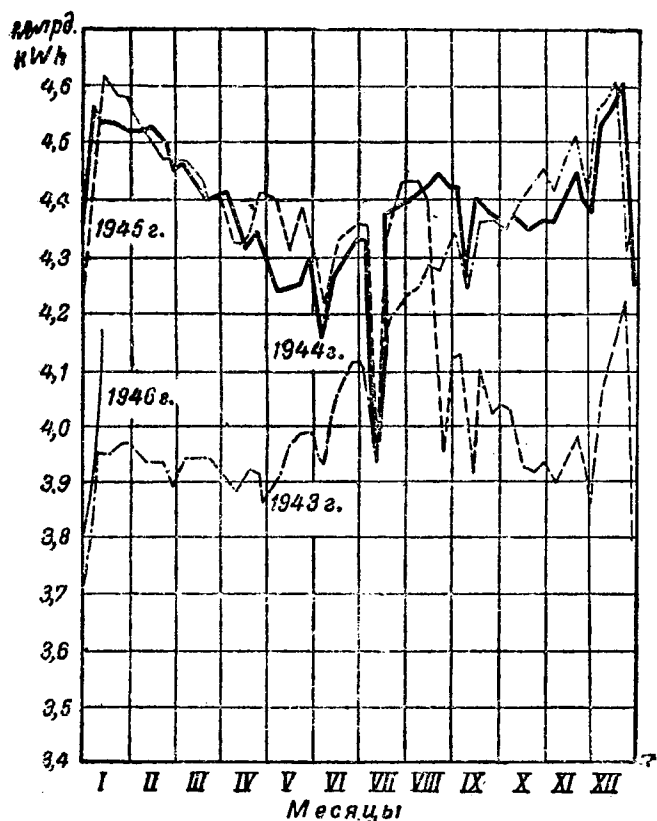


Рис. 1. Динамика месячной выработки электроэнергии электростанции общего пользования США.

Таблица 2

### Характеристика сдвигов в структуре потребления США

Потребители	1939 г., млрд. kWh	1944 г., млрд. kWh	1945 г.		
			млрд. kWh	% к итогу	% к 1939 г.
Быт . . . . .	21,1	31,3	34,1	17,6	161,5
Коммунальное хозяйство	5,2	11,2	10,3	5,3	198,0
Торговые предприятия и мелкотоплив. нагр.	20,7	29,8	30,3	15,7	146,5
Сельское хозяйство . . .	1,9	3,4	3,7	1,9	195,0
Промышленность . . . . .	51,1	115,2	108,4	55,8	212,0
Транспорт . . . . .	5,7	7,3	7,2	3,7	126,5
Всего . . . . .	105,7	198,2	194,0	100,0	183,5

Хотя потребление в промышленности сократилось в 1945 г. против предыдущего года на 6,8 млрд. kWh (на 6,2%), уровень его в два с лишним раза (на 57,3 млрд. kWh) выше довоенного (1939 г.).

Для покрытия нарастающей в период войны нагрузки потребовался огромный ввод новых мощностей. С 1939 г. по 1945 г. установленная мощность на тепловых электростанциях увеличилась с 28,9 до 35 млн. kW, на гидроэлектростанциях — с 11,4 до 14,9 млн. kW, а общая мощность—с 40,3 до 49,9 млн. kW (рост на 24%). Таким образом, прирост мощности на всех станциях за последние 6 лет составил 9,6 млн. kW (табл. 3). Почти половина новой мощности падает на государственные и общественные станции, суммарная мощность которых поднялась с 5 до 9,7 млн. kW (в том числе на федеральных станциях—с 1,7 до 5,1 млн. kW).

Таблица 3

Динамика роста установленной мощности станций общего пользования, млн. kW

Годы	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции	Всего
1939	28,9	11,4	40,3
1940	30,0	11,7	41,7
1941	30,6	11,8	42,4
1942	32,2	12,8	45,0
1943	34,1	13,9	48,0
1944	34,6	14,6	49,2
1945	35,0	14,9	49,9

Однако, возможность покрытия выросших потребностей в электроэнергии была обеспечена не столько вводом новых мощностей, сколько целым рядом других факторов.

Наиболее важным из них является рост коэффициента использования установленной мощности (табл. 4).

Если бы число часов использования установленной мощности оставалось на уровне 1939 г., то общая введенная мощность с 1939 по 1945 г. могла бы дать лишь 31,5 млрд. kWh, фактически же в 1945 г. было произведено на 92,1 млрд. kWh больше, чем в 1939 г.

Значительный эффект в деле мобилизации мощности дали такие мероприятия, как усиление связей между электросистемами и сокращение сроков ремонта оборудования, позволившие использовать дополнительную мощность примерно в 5 млн. kW, сдвиг часовой стрелки, перегрузка оборудования и пр. Кроме того, снижение расхода электроэнергии на собственные нужды и потери в сетях с 18,8 до 13,8% высвободило около 3,2 млн. kW мощности. Рис. 3 иллюстрирует динамику снижения резерва за период 1930—1940 гг.

Вскоре после капитуляции Японии был упразднен центральный орган, регулировавший электрохозяйство в США во время войны (OWU—управление предприятиями военного значения) и тем самым сняты ограничения в области электростроительства.

Несмотря на вероятность дальнейшего снижения электропотребления в промышленности при переходе на производство мирного времени, в ближайшие годы предполагается ввести крупную новую мощность: на тепловых электростанциях в 1946 г. около 1 383 тыс. kW и в 1947 г.—2 600 тыс. kW, на гидроэлектростанциях в те же годы—80 тыс. kW, и 690 тыс. kW.

Вместе с тем намечается широкое строительство сетей: в 1946 г. проектируются ввод сетей (на напряжение от 11 kV и выше)—17 500 км и начало строительства новых—общей протяженностью около 10 000 км (в 1944 г. было введено 3 500 км, а в 1945 г.—9 000 км).

Суммарная мощность подстанций, намечаемых к вводу в 1946 г., оценивается цифрой в 7,5 млн. kVA. Кроме того, в том же году предполагается приступить к сооружению новых подстанций общей мощностью в 7,5 млн. kVA.

Широкие масштабы нового электростроительства обосновываются необходимостью замены изношенного оборудования, пополнения резерва мощности и расчетом электромощности на возможность дальнейшего развития сбыта за счет охвата новых потребителей и более широкого применения электроэнергии, особенно в сельском хозяйстве.

Учитывая сокращение численности фермерского населения за последние годы и наличие значительного количества ферм без жилых зданий, считают, что электроснабжением охвачено около половины фермерских хозяйств. Потребление в сельском хозяйстве в 1945 г. составило 3,7 млрд. kWh, а удельный вес его в расходной части электробаланса—только 1,9%.

Стремясь использовать этот потенциальный «рынок сбыта», электрокомпании проектируют широкое развитие сельских электросетей. Длина построенных сетей в 1943 г. составляла 3 962 км, в 1944 г.—17 500 км, в 1945 г.—40 500 км. В 1946 г. проектируется ввод в эксплуатацию 91 800 км и начало строительства новых сетей общей протяженностью 51 500 км. Наряду с этим развиваются сети кооперативных организаций, финансируемых Администрацией по сельской электрификации (REA).

Электробаланс этих организаций в 1945 г. составлял 2,6 млрд. kWh (2,35 млрд. kWh было получено от электростанций общего пользования и 0,25 млрд. kWh от собственных установок).

Сети систем REA, протяженность которых к началу войны (1940 г.) составляла уже около 400 000 км, сыграли существенную роль не только в области развития сельской электрификации, но позволили также снабжать энергией многочисленные мелкие промышленные предприятия.

Литература

1. El. World от 12 и 19 января 1946.
2. Edison El. Inst. Bull., май и октябрь, 1945.

В. И. МИХАЙЛОВ

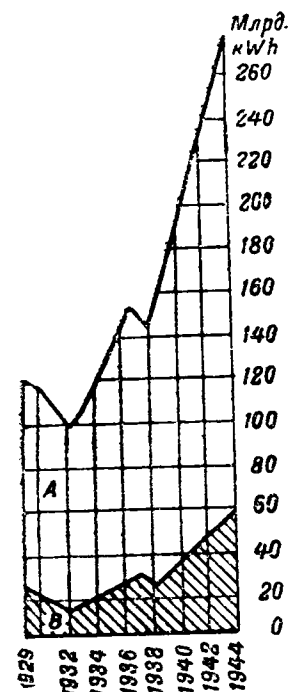


Рис. 2. Динамика электробаланса США.

A — выработка станций общего пользования; B — выработка промышленных станций (заштриховано).

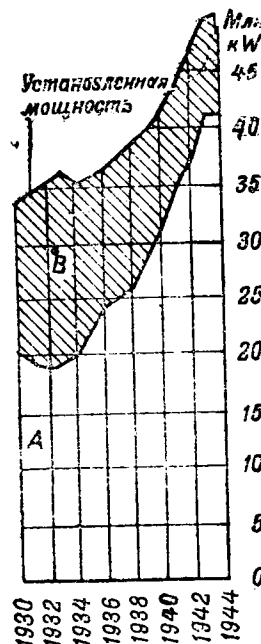


Рис. 3. Динамика резервной мощности.

A — суммарный максимум; B — резерв (заштриховано).

Таблица 4

Динамика среднегодового использования мощности электростанций, kWh/kW

Годы	Тепловые электростанции	Гидроэлектростанции	Все станции
1939	3 035	3 916	3 235
1940	3 303	4 137	3 538
1941	3 784	4 283	3 923
1942	3 834	5 076	4 181
1943	4 285	5 458	4 617
1944	4 526	5 109	4 630
1945	4 023	5 437	4 439

## ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

**A. Simonnet.** Гидроэлектростанции Портийон в Пиренеях. *Le Genie Civil*, № 20 и № 21, 1945.

Строительство регулирующей гЭС Портийон (Portillon) является частью широкой программы гидроэнергостроительства, предпринятой во Франции в 1938 г. ГЭС вступила в работу в сентябре 1941 г. при неполных притоке воды и выработке электроэнергии, в связи с замедленными темпами производства гидротехнических работ на высоте более 2 250 м над уровнем моря. Гидроэлектростанция Портийон выделяется исключительно высокими напорами 1 400 м и 1 106 м, под которыми попеременно работает ее единственный агрегат. Гидроустановка питается водой посредством сложной системы водосборных каналов и туннелей; водноэнергетическое регулирование выполняется шестью высокогорными озерами—водохранилищами.

При напоре 1 400 м с энергетическим коэффициентом 3 kWh/m<sup>3</sup> вырабатывается в год 33,7 млн. kWh собственно на гЭС Портийон и дополнительно 13 млн. kWh двумя нижерасположенными гЭС на р. Пик. Однако, при этом выработка существующей гЭС Доо уменьшается на 18,5 млн. kWh. При использовании напора 1 106 м с энергетическим коэффициентом 2,35 kWh/m<sup>3</sup> вырабатывается 50,1 млн. kWh. Насосное аккумулирование при высоте подкачки 294 м с энергетическим коэффициентом 1 kWh/m<sup>3</sup> дает дополнительно 5,2 млн. kWh с учетом 8 млн. kWh, требующихся на нагнетание воды (которая без аккумулирования в водохранилище была бы бесполезно сброшена). Таким образом, выработка собственно гЭС Портийон составляет 33,7+50,1+5,2=89 млн. kWh, из которых 57,7 млн. kWh является энергией сезонно зарегулированной. Однако, общее увеличение выработки в результате ввода этой гЭС несколько меньше 89+13=102 млн. kWh. В этих условиях гЭС Портийон может рассматриваться в системе как пиковая электростанция с показателем использования до 2 225 h.

В здании гЭС установлен только один гидроэлектрический агрегат в 40 тыс. kWh, отвечающий  $Q_7 = 3,6 \text{ m}^3/\text{sec}$  при  $H = 1400 \text{ m}$ . Остановка турбины в сезоны насосного аккумулирования дает возможность осуществлять плановый ремонт. Агрегат состоит из горизонтального трехфазного генератора в 40 тыс. kW, на обоих концах вала которого насажено по колесу Пельтона в 55 600 л. с. диаметром 2,9 м каждое с одним соплом. Коэффициент полезного действия турбины Пельтона весьма устойчив—в пределах от полной нагрузки до 0,4 нагрузки снижается лишь на 2,1%. Главный возбудитель с зависимым возбуждением при 110 V установлен на валу агрегата между ротором и одним из колес Пельтона. Кроме того, агрегат располагает двумя вспомогательными двухмоточными генераторами, смонтированными на каждом конце вала, которые вырабатывают постоянный ток для возбуждения главного возбудителя и для питания электромагнитного реле защиты от разгона; кроме того, они могут генерировать переменный ток 25 Hz для питания электродвигателя регулятора турбины. Первоначально каждый генератор вырабатывал электрический ток только одного вида, так как опасались взаимного вредного влияния обмоток. Однако, опыт показал, что допустимо питать сразу обе цепи от одного генератора, оставляя второй в резерве.

Главный генератор непосредственно присоединен к зажимам трансформатора 10 500 V, 49 500 kVA с масляным охлаждением. Размеры трансформатора весьма снижены сравнительно с обычными, так как в высокогорных условиях внешняя температура принята в 10° вместо 40° по техническим нормам USE. Вторичная обмотка трансформатора через выключатели и разъединители присоединена к 150-kV воздушной линии, длиной 8 км, ведущей к электрической подстанции в г. Люшон. Ввиду того, что отправной конец линии электропередачи находится на отметке 1 147 м, трасса ее местами повышается до 1 900 м и заканчивается линия электропередачи на отметке 648 м, приняты особые предупредительные меры против атмосферных перенапряжений. Работы по завершению сложной схемы дополнительного питания водой и соответственно по расширению выработки гЭС Портийон продолжают.

*Кандидат техн. наук Н. А. КАРАУЛОВ*

## ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**I. Gzybowski-Holm.** Исследование стоимости систем воздушных линий передач напряжением от 69 до 345 kV в США. *AIEE Tr.*, стр. 406—422, в. 63, 1944.

В статье сделана попытка обобщить данные о сравнительной экономичности систем передачи электроэнергии при высоком напряжении в условиях США. Автор формулирует основное положение об экономической связи передаваемой мощности, расстояния передачи и напряжения. Соотношение этих основных элементов, определяющих энерго-экономические показатели системы, приводится в ряде кривых (рис. 1 и 2), последовательно построенных в функции от одного из параметров передачи.

Кривые построены на основе анализа данных 31 системы; эти системы передают мощность от 50 до 800 тыс. kW на расстояние от 80 до 800 км при напряжениях 69, 138, 230 и 345 kV и частоте 60 Hz.

Системы снабжены оборудованием для обеспечения устойчивости. Стоимость электросистем включает повысительные и понизительные подстанции, синхронные компенсаторы и стоимость отчуждений (трассы). Резерв в крупных системах осуществляется путем установки резервных генераторов, трехфазных трансформаторов и др. В стоимость систем включается стоимость монтажа и начислений (22,5%), а также 6% на капитал за период строительства (6 мес. для малых и 18 мес. для крупных систем). Стоимость отчуждений принята для городских районов 50 тыс. долларов на милю и 2 тыс. долларов для сельских. При передаче на расстоянии свыше 320 км и напряжениях 230 kV и более экономичная нагрузка не совпадает с максимальной. При расстоянии в 240 км напряжение 138 kV должно применяться до мощности, не превышающей 225 тыс. kW. В интервале от 225 до 550 тыс. kW наиболее экономично напряжение 230 kV. При дальнейшем повышении передаваемой мощности до ее удвоения следует применять напряжение 345 kV.

Кривые показывают также, до каких расстояний может быть экономично осуществлен рост напряжения. На 800 км нельзя экономично передать мощность при напряжении 345 kV по условиям устойчивости. При этом расстоянии можно передать небольшую мощность и с напряжением в 230 kV, но стоимость передачи при этом резко повышается.

С увеличением расстояния растут удельные капитальные затраты по линиям на 1 км вследствие влияния повышенного напряжения на стоимость провода и опор. Но общая стоимость системы на 1 kW снижается благодаря лучшему использованию меди при более высокой устойчивости. При передаче 1,2 млн. kW на 900 миль (1 280 км) стоимость на 1 kW снова растет, что показывает необходимость перехода для столь мощной передачи на напряжение 460 kV.

Анализ данных о стоимости систем свидетельствует о том, что дополнительные затраты, необходимые для повышения устойчивости, окупаются путем увеличения передаваемой мощности. В стоимости систем наибольшее место занимает приемная и повысительная подстанция и линия передачи. В стоимости линии электропередачи наиболее значительна доля стоимости проводов и опор; в стоимости повысительной подстанции — доля трансформаторов, высоковольтных выключателей и оборудования защиты; в стоимости приемной подстанции — доля синхронных компенсаторов и трансформаторов.

Годовые издержки по системе включают постоянные издержки — около 10,3% от капитальных затрат (в том числе налоги и страхование — 2,5%, амортизация — 1,8%, процент на капитал — 6%) и эксплуатационные издержки. Последние состоят из расходов по ремонту и содержанию и стоимости потерь (на  $\frac{3}{5}$  — зависящих от нагрузки).

Для определения стоимости потерь на приемном конце передачи автор принимает передачу энергии от гидроэлектростанций с капиталовложениями около 200 долларов на 1 kW. Издержки по ремонту и эксплуатации составляют около 1% от капитальных затрат, зарплата — 0,02 центов на 1 kWh. Общая себестоимость энергии на приемном конце составит для годового коэффициента нагрузки 50% — около 0,54 цента на 1 kWh.

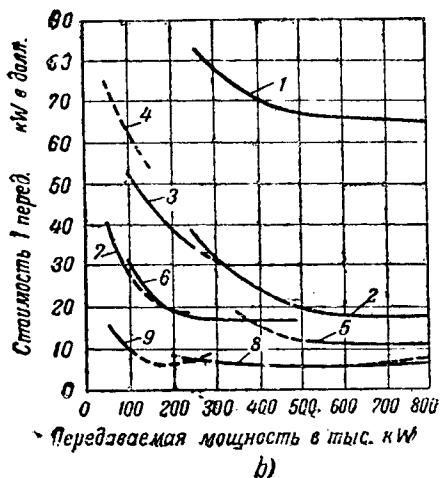
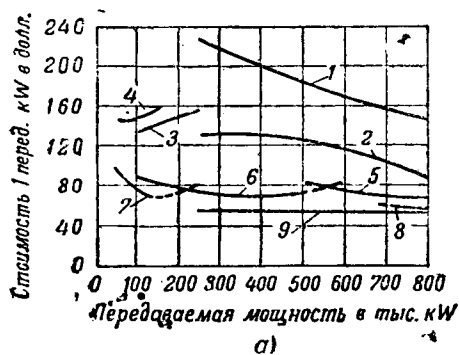


Рис. 1. Капитальные затраты на один переданный киловатт: а) по всей электросистеме; б) по линии передачи (без стоимости отчуждений).

1—500 тыс. кВт при 345 кВ; 2—250 тыс. кВт при 345 кВ; 3—250 тыс. кВт при 230 кВ; 4—250 тыс. кВт при 138 кВ; 5—150 тыс. кВт при 315 кВ; 6—150 тыс. кВт при 230 кВ; 7—150 тыс. кВт при 138 кВ; 8—75 тыс. кВт при 345 кВ.

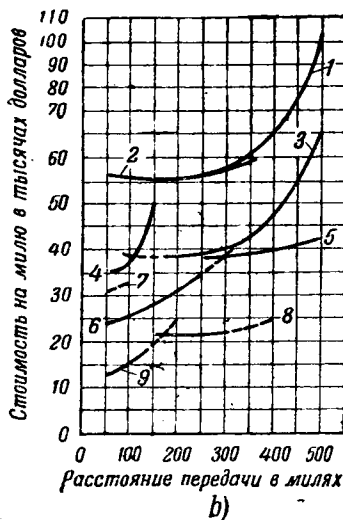
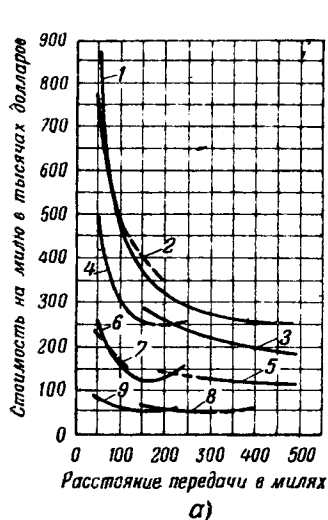


Рис. 2. Капитальные затраты на сооружение одной мили передачи. а) по всей электросистеме; б) по линии передачи (без стоимости отчуждений).

1—800 тыс. кВт при 345 кВ; 2—800 тыс. кВт при 230 кВ; 3—500 тыс. кВт при 345 кВ; 4—500 тыс. кВт при 230 кВ; 5—250 тыс. кВт при 315 кВ; 6—250 тыс. кВт при 230 кВ; 7—250 тыс. кВт при 138 кВ; 8—100 тыс. кВт при 230 кВ; 9—100 тыс. кВт при 138 кВ.

Экономика системы передачи в 345 кВ является функцией величины передаваемой мощности и расстояния передачи. При расстояниях до 100 миль (160 км) напряжение 345 кВ экономично лишь при передаче 800 тыс. кВт. При передаче 500 тыс. кВт на 320 км напряжение 345 кВ также экономично. При меньших расстояниях 345 кВ предпочтительно перед 230 кВ, если передается мощность порядка 250 тыс. кВт.

Стоимость подстанции 345 кВ на 1 кВт всегда больше, чем при напряжении 230 кВ. Экономия для первого напряжения достигается благодаря более низкой стоимости линии и оборудования, зависящего от нагрузки. Можно ожидать удешевления стоимости систем 345 кВ при практическом ее освоении и, следовательно, расширения экономических границ применения этого напряжения.

Систематизированный автором материал по стоимости электросистем представляет определенный интерес при изучении вопросов экономики передачи энергии переменным током в условиях США.

Кандидат техн. наук **Б. Л. ЭРЛИХМАН**

### ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

К вопросу о системе тока для электрических магистральных железных дорог. *Schweiz. Bauzeitung*, № 19. 1945.

В связи с постановкой в печати некоторыми швейцарскими специалистами вопроса о правильности выбора для электрификации швейцарских федеральных железных дорог однофазного тока 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz с генерированием его на железнодорожных силовых электростанциях в электротехнических журналах по этому вопросу развернулась дискуссия.

Инж. Krohne считает вопреки выводам комиссии по выбору системы тока государственных железных дорог Германии, что послевоенная электрификация железных дорог должна осуществляться на системе однофазного тока 50 Hz с питанием от районных сетей. Dr. K. Sachs (Швейцария) указывает, что система однофазного тока 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz доведена до высокой степени совершенства. Одновременно во многих странах с успехом применяется постоянный ток высокого напряжения. Современные швейцарские электровазы, несмотря на наличие трансформатора, не тяжелее электровазов постоянного тока. В последних большой вес имеют пусковые реостаты и аппаратура управления. Электроваз на 50 Hz должен, несмотря на более легкий трансформатор, весить больше электроваза на 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz, поскольку мощность должна делиться между большим количеством тяговых двигателей. Выбранная для швейцарских дорог система хорошо оправдалась и при собственных электростанциях. В необходимой мере тяговые и районные сети соединяются через синхронно-асинхронные вращающиеся преобразователи. На электростанциях федеративных железных дорог кроме однофазных генераторов установлены и генераторы трехфазного тока промышленной частоты. В Швейцарии нет оснований ставить вопрос об отказе от однофазного тока пониженной частоты.

Инж. Engler указывает, что, как следует из рассмотрения графиков нагрузок, пики в районных сетях и в сети однофазного тока железных дорог имеют место почти в одно и то же время и потребление энергии в обеих системах зимой больше, чем летом. Поэтому отпадает возможность выравнивания нагрузок. Энергия однофазного тока стоит на шинах 15-кВ тяговых подстанций 3,5 ралпена за 1 kWh. Предприятия, обеспечивающие снабжение энергией трехфазного тока, вряд ли смогут (учитывая частые пики нагрузки железных дорог) отпустить им энергию дешевле.

Инж. **Л. А. ВИСЛОУХ**

**Электрификация гребного привода морских судов в современном судостроении.** *Shipbuilding and Shipping Records, стр. 182, август, 1945.*

Современная война потребовала широкого привлечения торгового флота к выполнению боевых операций и к использованию его для обеспечения ведения войны в целом. Это повлекло за собой интенсивное строительство морских судов различных типов. За период, с начала войны, т. е. с 1939 г. до 1 июля 1945 г., в США было построено 4 709 морских стальных самоходных судов водоизмещением в 2 000 т и более с общим водоизмещением 51 496 746 т при общей мощности на валах 20 903 948 л. с. Из этого общего количества 521 судно водоизмещением 8 169 901 т (16% к общему водоизмещению судов торгового флота США) имеет электрифицированный привод винта с общей мощностью на валах 4 132 330 л. с. Таким образом, суммарная мощность на валах электрифицированных судов составляет 20% по отношению к суммарной мощности, установленной на судах торгового флота. Силовые установки электрифицированных судов состоят из турбогенераторов и гребных синхронных электродвигателей.

Если учесть, что в предвоенный период суммарная мощность турбоэлектроходов не превышала 1,5 млн. л. с., то станет очевиден громадный рост электродвижения на судах во время войны. Столь высокий рост электрификации гребного винта не является результатом сложившейся конъюнктуры, а технической целесообразностью. При этом характерно, что громадное большинство вновь построенных нефтеналивных судов имеет исключительно электрифицированный привод винта.

*Кандидат техн. наук И. Р. ФРЕЙДЗОН*

### КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

**Десять лет эксплуатации маслостатической кабельной системы в Пенсильвании.** *El. Eng., август, 1945.*

Выполнением маслостатической (Oilstatic) системы решается задача электропередачи по кабелю больших мощностей при высоких напряжениях. Маслостатические кабельные системы особенно пригодны для передачи энергии в туннелях и по мостам, при пересечении болот, рек и других водоемов, для электрификации железных дорог и вблизи аэропортов.

Маслостатическая кабельная система в Пенсильвании связывает электросистемы Нью-Йорка и Вашингтона. Она проложена в туннеле и находится в безаварийной эксплуатации с февраля 1935 г. Установка выполнена фирмой Okonite-Callender из двух 132-kV цепей длиной по 5,2 km. Каждая цепь состоит из двух одножильных кабелей сечением около 260 mm<sup>2</sup>, проложенных в стальной трубе, которая наполнена маслом под статическим давлением около 14 ат. В этой установке максимальная длина одного выполненного на заводе кабеля составляет около 1,2 km.

*Кандидат техн. наук И. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН*

### ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**F. M. Clark, M. E. Scoville. Конденсаторы для промышленных высокочастотных установок.** *El. Eng., стр. 691—797, № 11, 1945.*

Во время войны резко расширилось применение высокочастотных установок в промышленности для целей нагрева. Наряду с индукционным нагревом металлов стал широко применяться нагрев неметаллических материалов за счет диэлектрических потерь.

Конденсаторы в контурах мощных промышленных установок высокой частоты должны выдерживать воздействие высокого напряжения и пропускать большую силу тока. Стоимость конденсаторов, входящих в колебательный контур, составляет до одной трети стоимости всей высокочастотной установки.

К конденсаторам этого типа предъявляются в основном те требования, как и к конденсаторам колебательных

контуров радиопередатчиков большой мощности; но из-за длительности непрерывной работы установки следует требовать увеличенной надежности конденсатора в условиях эксплуатации. Для уменьшения количества единиц в конденсаторной батарее следует требовать повышения номинальной реактивной мощности каждой единицы. В отличие от радиотехнических конденсаторов, для рассматриваемого типа конденсаторов можно допускать повышенные значения изменения емкости с температурой.

В промышленных высокочастотных установках применяется водяное охлаждение рабочей катушки индуктивности и генераторных ламп. Эту же систему охлаждения целесообразно использовать и для отвода тепла, выделяющегося в конденсаторах.

Ранее, при частотах выше 15 kHz, применялись почти исключительно слюдяные конденсаторы. Из-за дефицитности слюды, особенно во время войны, был поставлен вопрос о ее замене. При низкой частоте в качестве диэлектрика в силовых конденсаторах применяется пропитанная бумага. Применение жидкого диэлектрика в сочетании с твердым пористым диэлектриком (бумагой) дает высокие значения электрической прочности. При повышении частоты электрическая прочность твердых диэлектриков резко снижается и при частоте 500 kHz имеет значение примерно в 5 раз меньшее, чем при технической частоте. В то же время жидкие диэлектрики при переходе от 50 Hz к 500 kHz снижают свою электрическую прочность только на 40%. Поэтому в высоковольтных высокочастотных конденсаторах в качестве диэлектрика целесообразно применять электронизолирующие жидкости в чистом виде, отказавшись от сочетания жидкости с твердым диэлектриком.

Для пропитки бумажных конденсаторов обычно применяются минеральное (трансформаторное) или же касторовое масло. Минеральное масло в диапазоне частот, применяемом в промышленных установках (10<sup>5</sup>—10<sup>6</sup> Hz), имеет малые диэлектрические потери ( $\text{tg} \delta < 5 \cdot 10^{-4}$  при 30° C), но применение его в высокочастотных конденсаторах невыгодно из-за низкой диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 2,2$ ); касторовое масло имеет повышенную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon = 4,2$ ), но в рассматриваемом диапазоне частот диэлектрические потери его сравнительно очень велики ( $\text{tg} \delta > 150 \cdot 10^{-4}$  при 30° C); кроме того, оно химически недостаточно стабильно. Фирма GEC для применения в качестве жидкого диэлектрика в высокочастотных конденсаторах разработала новую электронизолирующую жидкость «лектронол» (Lectronol). Эта жидкость имеет следующие характеристики:  
 Температура вспышки 180° C  
 Температура застывания —8° C  
 Реакция нейтральная.  
 Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 4,4$  при 25° C  
 $\text{tg} \delta$  при 25° C и 10<sup>5</sup>—10<sup>6</sup> Hz менее  $10 \cdot 10^{-4}$ .  
 Электрическая прочность при 25° C более 16 kV/mm.

Электрическая прочность лектронола и тщательно высушенного минерального масла при частоте 500 kHz примерно одинакова, с некоторым преимуществом в пользу лектронола при зазорах больше 2,5—3 mm. Ничтожные количества влаги резко снижают электрическую прочность масла; лектронол способен растворять по сравнению с минеральным маслом десятикратное количество воды, а потому значительно менее чувствителен к действию влажности. При повышении температуры электрическая прочность лектронола снижается незначительно: при частоте 500 kHz и 25° C  $F_{np} = 8,35$  kV/mm, а при 100° C  $F_{np} = 7,80$  kV/mm. После непрерывного нагрева лектронола в течение 200 суток при 70° C не было обнаружено заметного ухудшения его электрических свойств.

Новый тип конденсатора, разработанный фирмой GEC для применения в высокочастотных промышленных установках, представляет собой систему из плоских алюминиевых пластин, погруженную в лектронол. Корпус конденсатора, изготовленный из немагнитного материала, имеет гибкие стенки, допускающие расширение жидкого диэлектрика при его нагревании в рабочих условиях. Крепление обкладок конденсатора, обеспечивающее постоянство зазора и изоляцию заземленной системы обкладок от незаземленной, осуществляется на плате из микалекса. Изолированная система обкладок присоединяется

к двум параллельно соединенным фарфоровым изоляторам, монтированным на крышке корпуса (этим путем снижается в 2 раза сила тока, приходящаяся на каждый изолятор, и уменьшается его нагрев). Изоляторы — полые и внутри заполнены изолирующей жидкостью, что способствует отводу тепла, выделяющегося в фарфоре за счет его диэлектрических потерь.

Для отвода тепла, выделяющегося в конденсаторе, внутрь корпуса вводится эмеевик с проточной водой, соединяемый с заземленной системой пластин. Расход воды на охлаждение конденсатора составляет около 2,5 л/мин при повышении температуры воды на 3,3°С.

Конденсаторы данного типа получили сокращенное обозначение НГР (высокочастотные конденсаторы с параллельными пластинами, с жидкой заливкой). При рабочей частоте и рабочей температуре  $tg \delta$  этих конденсаторов менее 0,0003, т. е. меньше, чем в слюдяных контурных конденсаторах. Более 60% всех потерь в конденсаторе составляют потери в металле. Температурный коэффициент емкости этих конденсаторов отрицателен и численно составляет 0,25—0,30% на 1°С. Индуктивность конденсаторов очень мала и лежит в пределах от 0,075 до 0,13 мкН. Конденсаторы изготавливаются на рабочее напряжение от 2 до 9 kV<sub>eff</sub> при рабочей частоте 540 кГц, с номинальной емкостью от 0,034 до 0,0029 мкФ.

Согласно рекламным данным, фирмой GEC (Electronics, стр. 48, № 12, 1945) в одной из промышленных высокочастотных установок вместо батареи из 25 штук слюдяных конденсаторов была применена батарея из 3 штук конденсаторов НГР, что дало экономию в 50% по стоимости и по объему, занятому конденсаторами в установке, и одновременно позволило удвоить мощность этой установки.

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

#### Самовосстанавливающиеся бумажные конденсаторы. *Wireless World, сmp. 204, № 7, 1945.*

Отличительной особенностью конденсаторов из металлизированной специальной бумагой, выпускаемых английской фирмой А. Н. Hunt Ltd., в сравнении с обычными бумажными конденсаторами является их способность самовосстанавливаться после пробоя при кратковременных перенапряжениях; кроме того, они отличаются резко уменьшенными габаритами. По данным фирмы конденсатор нового типа емкостью 0,1 мкФ, рассчитанный на рабочее напряжение 150 В, примерно в 10 раз меньше обычного бумажного конденсатора с теми же номинальными данными. Фирма выпускает конденсаторы из металлизированной бумаги цилиндрического типа, в трубчатых корпусах из картона или неопрена. Номинальная емкость: от 0,05 до 2 мкФ; рабочее напряжение: 150, 230 и 350 В. Конденсаторы с рабочим напряжением 150 В наматываются из двух лент металлизированной бумаги. Для таких конденсаторов удельное сопротивление изоляции резко снижено по сравнению с обычным типом бумажного конденсатора; фирма гарантирует сопротивление изоляции не ниже 500 сек (или  $\mu\Omega \cdot \mu F$ ).

Конденсаторы с повышенным рабочим напряжением изготавливаются с применением ленты обычной конденсаторной бумаги, разделяющей ленты металлизированной бумаги; для этих конденсаторов гарантируется сопротивление изоляции не ниже 100 сек. Конденсаторы в картонных корпусах рассчитаны на работу при температуре до +70°С; конденсаторы в неопреновых корпусах — до +85°С. При этом значении температуры указанные выше значения рабочего напряжения должны быть несколько снижены. Допускаемое отклонение емкости от номинала у конденсаторов нового типа увеличено по сравнению с обычным допуском по емкости для бумажных конденсаторов и составляет  $\pm 25\%$ .

Следует отметить, что идея о применении металлизированной бумаги в производстве конденсаторов не является новой. Конденсаторы, изготовленные из бумаги, металлизированной по методу Мансбриджа (Mansbridge), применялись в Англии еще в начале этого столетия. Бумага Мансбриджа изготавливалась путем накатки на тонкую бумагу мелко диспергированного оловянного порошка, с небольшой добавкой клеящего вещества. При этом способе

металлизации резко ухудшались электроизоляционные свойства бумаги, что требовало обязательного применения прокладок ленты неметаллизированной бумаги для разделения металлизированных лент. Это обстоятельство не давало возможности резко снизить удельный объем конденсатора по сравнению с бумажным конденсатором, имеющим обкладки из металлической фольги. Бумага Мансбриджа была относительно толста (порядка 13—14 м) и за счет ухудшенной проводимости металлического слоя приводила к резкому увеличению угла потерь изготовленных из нее конденсаторов<sup>1</sup>. Во время войны германское конденсаторостроение освоило выпуск конденсаторов из металлизированной бумаги по патенту фирмы Bosch DRP 582670. Эти конденсаторы выпускались в прямоугольных металлических герметизированных корпусах со стеклянными или фарфоровыми изоляторами с номинальной емкостью до 20—30 мкФ. При рабочем напряжении 150 В удельный объем конденсаторов составляет 4—6 см<sup>3</sup>/мкФ. Такие конденсаторы были намотаны из двух лент металлизированной бумаги толщиной по 9 м. При рабочем напряжении 250 В удельный объем составлял 17—19 см<sup>3</sup>/мкФ; эти конденсаторы были намотаны из металлизированной бумаги толщиной 15 м, также без применения разделительной прокладки из простой бумаги. Испытание конденсаторов, произведенное нами, показало, что сопротивление изоляции у конденсаторов с рабочим напряжением 150 В составляло 200 ÷ 500 МΩ на 1 мкФ, а у конденсаторов с рабочим напряжением 250 В — 300 ÷ 1500 МΩ. Осмотр бумаги, из которой были намотаны конденсаторы, показал, что металлический слой на ней резко отличался по виду от металлического слоя на бумаге Мансбриджа; можно полагать, что германские фирмы наносили этот слой методом испарения металла в вакууме. Повидимому, в новом типе английских конденсаторов использована также бумага аналогичного типа.

При испытании германских конденсаторов был обнаружен явно выраженный эффект восстановления электрической прочности после пробоя, обусловленный сплавлением тонкого металлического слоя в момент пробоя, приводящим к изолированию пробитых мест от обкладок конденсатора. Довести до окончательного пробоя исследованные конденсаторы не удалось. Для таких конденсаторов предельным значением напряжения является не то его значение, которое приводит к закорачиванию обкладок, а то значение напряжения, при котором в результате периодически повторяющихся пробоев и «самовосстановлений» начинается заметное снижение емкости, обусловленное снижением активной площади обкладок. При рабочем напряжении 150 В предельное значение напряжения составляет около 400 В, при рабочем напряжении 250 В около 1000 В.

Благодаря своим малым габаритам и способности самовосстанавливаться после пробоя, конденсаторы нового типа представляют большой интерес в тех случаях, где от конденсатора не требуется очень высокое сопротивление изоляции.

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

#### К. N. Mathes. Испытание электроизоляционных лаков. *GER, v. 48, № 5, 1945.*

Разработана методика испытания электроизоляционных лаков на специальных образцах, которые изготавливаются следующим образом: поверх кабеля, скрученного из большого числа изолированных проволок диаметром 0,8 мм, плотно навивается на токарном станке двухслойная проволочная спираль. Если нужно для аналогии с действительной конструкцией обмоток в аппаратуре, в структуру образца вводятся дополнительные изолирующие материалы, как бумага и т. п. Кабель разрезается на части длиной 140 мм. Производится пропитка испытываемым лаком и легкая сушка, после чего спираль удаляется с обоих концов образца на 30 мм и 12 проволок, образующие

<sup>1</sup> В. Т. Ренне. Журнал „Легкие металлы“, стр. 22, № 4, 1937.

внешний повив кабеля, радиально отгибаются. Затем продолжается дальнейшая сушка образца. Автор проводил испытания лаков на образцах, изготовленных из проволоки, изолированной хлопчатобумажной пряжей, стеклом, эмалью, формваром, причем применял пропитку различными способами. Порядок испытаний был принят следующий:

1. Изучение качества пропитки осмотром при размотке образца. При этом оценивается вязкость лака, заполнение, влияние на материал изоляции проволоки. Для лучшей оценки пропитки можно добавить в лак люминесцирующие вещества и осмотр размотанного образца производить под ультрафиолетовым облучением.

2. На неразмотанных образцах измеряется сопротивление изоляции. Чтобы найти наимыгоднейший режим сушки, строятся кривые сопротивления изоляции в функции температуры и длительности сушки.

3. Для испытания электрической прочности изоляции радиально отогнутые концы образцов вводятся в капли ртути, находящиеся на текстолитовой панели, и через плавкие предохранители, соединенные с полюсом испытательного напряжения. Центральная часть образца (пучок проволоки) присоединяется ко второму полюсу. Одновременно испытывается до 18 образцов. Напряжение через каждые 15 мин повышается ступенями по 200—500 В и определяется число перегоревших на каждый подъем напряжения предохранителей.

4. Влагостойкость испытывается в камере при 100% относительной влажности и наличии росы. Подключение образцов производится так же, как и при испытании прочности изоляции. Испытательное напряжение 400 В подается периодически: 8 h включено, 16 h выключено. Влагостойкость оценивается по числу перегоревших предохранителей после каждого цикла.

5. Тепловое старение испытывается при том же включении образцов. При этом испытании образцы подвергаются тепловым ударам (попеременное воздействие нагрева и ледяной ванны), обрызгиванию солевым раствором, воздействию 100% относительной влажности, после чего испытывается электрическая прочность при одном значении

напряжения. Циклы повторяются, и тепловое старение оценивается также по числу перегоревших предохранителей.

6. Испытание пластических деформаций требуется для определения связующей способности лака. Сердцевина кабеля—семь проволок помещается на две опоры; к середине прикладывается нагрузка, увеличиваемая через каждые 2 min. Индикатор измеряет величину деформации. Испытание производится в печи при 105° С.

7. Для испытания воспламеняемости по внутренним спиральным обмоткам образцов пропускается электрический ток достаточной величины. Ток в 35 А меньше чем за 2 min нагревает образец до 650° С.

Предложенный метод позволяет испытывать и сравнивать различные лаки и различные способы пропитки на большом числе однообразных образцов.

Инж. Е. Д. БЕРКОВИЧ

#### Новый керамический диэлектрик. *Electronics, сmp. 312—14, № 1, 1946.*

Американская фирма General Ceramics and Steatite Corp. в Keasbey (штат Нью-Джерси) разработала новый керамический электроизоляционный материал под маркой М-244. Этот материал в особенности интересен весьма малым коэффициентом теплового расширения (порядка  $1,6—1,9 \cdot 10^{-6}$  на 1° С), близким к коэффициенту расширения инвара. Нагревостойкость около 1 000° С; чрезвычайно велика стойкость по отношению к тепловым импульсам (резким сменам температуры). Электрические свойства: электрическая проницаемость 5,30 (при частоте 1 МГц),  $\text{tg} \delta = 0,54\%$ , электрическая прочность 3 600 В/мм. Материал М-244 может формоваться посредством прессовки, выдавливания и литья. Он находит применение в производстве электрических печей, а также различных электрических аппаратов как высокоточных, так и слаботочных, где требуется высокая нагревостойкость и стабильность геометрических размеров.

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ





# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

Основан в 1880 году Русским  
техническим обществом

12 номеров в год  
по 12 печ. листов

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области исследования и применения электричества и освещает основные теоретические и практические проблемы, связанные с развитием всех отраслей электротехники и электрификации СССР

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик Б. Е. Веденев (отв. редактор), член-корр. АН СССР А. И. Берг, дктор 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

## В журнале принимают участие:

Доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев, доктор техн. наук, проф. К. А. Андрианов, доктор техн. наук, проф. Б. П. Ашаров, член-корр. АН СССР В. К. Аркадьев, доктор техн. наук, проф. Р. Л. Аронов, доктор техн. наук, проф. Г. И. Атабеков, доктор техн. наук, проф. Г. И. Бабат, доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькин, доктор техн. наук, проф. В. В. Болотов, доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин, член-корр. АН СССР, И. С. Брук, академик С. И. Вавилов, академик Б. А. Введенский, член-корр. АН СССР В. И. Вейц, академик А. В. Винтер, член-корр. АН СССР В. П. Вологдин, доктор техн. наук, проф. А. А. Воробьев, член-корр. АН СССР Б. М. Вул, доктор техн. наук, проф. А. А. Вульф, доктор техн. наук, проф. А. А. Горев, канд. техн. наук П. Н. Горшков, проф. П. Г. Грудинский, доктор техн. наук, проф. Л. И. Гутенмахер, проф. Д. В. Ефремов, доктор техн. наук, проф. П. С. Жданов, доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский, доктор техн. наук, проф. А. Г. Иосифьян, академик А. Ф. Иоффе, доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов, инж. Е. Я. Казовский, доктор техн. наук, проф. П. Л. Калантаров, доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский, инж. Е. Г. Комар, член-корр. АН СССР В. И. Коваленков, академик Г. М. Кржижановский, инж. Ю. С. Кронгауз, член-корр. АН СССР К. А. Круг, академик В. С. Кулебакин, действительный член АН УССР С. А. Лебедев, канд. техн. наук М. И. Левин, доктор техн. наук, проф. С. О. Майзель, доктор техн. наук, проф. Э. А. Меерович, доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов, доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов, доктор техн. наук, проф. Л. Р. Нейман, академик В. П. Никитин, доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов, доктор техн. наук, проф. Л. М. Пिटровский, доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов, доктор техн. наук, проф. В. К. Попов, проф. В. А. Привезенцев, инж. И. И. Ратгауз, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич, доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд, проф. Е. А. Руссаковский, канд. с.-х. наук Н. А. Сазонов, доктор техн. наук, проф. Л. И. Смиротинский, доктор техн. наук, проф. И. С. Стекольников, канд. техн. наук Б. М. Тареев, проф. Б. А. Телешев, доктор техн. наук, проф. П. М. Тиходеев, доктор техн. наук, проф. В. А. Толвинский, доктор физ.-мат. наук, проф. В. А. Фабрикант, доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чечет, доктор техн. наук, проф. Е. Г. Шрамков, доктор техн. наук, проф. Г. И. Штурман, доктор техн. наук, проф. Н. Н. Щедрин и др.

## Подписная цена на год 96 руб.

Подписка принимается в отделениях „Союзпечати“ и на почте.

Подписку можно также направлять по адресу:

Москва, Шлюзовая набережная, 10—Госэнергоиздат.

При внесении годовой платы, хотя и не в начале года, подписчикам доставляются все вышедшие в 1946 г. номера журнала.