

ВОЛОГДА 300.12
ОБЛ.БИБЛИОТЕКА
1945.12 ЭЛЕКТР

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1945

10

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Б. П. Апаров — Основные вопросы электрооборудования современных самолетов	1
Б. М. Казан и П. В. Исаев — Авиационные сельсины	8
Б. Е. Телишевский и Д. В. Зернов — Применение электронно-лучевых трубок для регулирования и сл	12
К. А. Андрианов — Новая эмалевая изоляция „винифлекс“	15
М. И. Рапопорт — Новые пути в методике профилактических испытаний изоляции	21
Г. С. Аронзон — Расчет электромагнитного поля при наличии железа	25
А. А. Горев и Б. М. Рябов — Импульсные характеристики линейной изоляции	28
А. Е. Каплянский — Универсальный прибор переменного тока	31
А. А. Соколов — Триггерная схема высокой чувствительности	32
А. И. Фюрстенберг — Абсолютный метод измерения емкости и индуктивности	32
Д. В. Голубев — Новый прибор для измерения реактивной мощности при больших токах приемника	34
И. С. Стекольников — Статические радиопомехи в полете на самолете и их устранение	35
Б. Я. Коган — О расчете мощности и выборе типа игнитронных ламп для прерывателей тока точечных электросварочных машин	37
В. А. Веников и С. С. Чугунов — Стробоскопическая регистрация угла расхождения э. д. с. (угла δ)	39
Н. И. Шиферсон — Расчет электронно-ионного регулятора напряжения тензорным методом	39
Б. П. Петров — Переходные явления в „плавающей схеме“ с дополнительным торможением на выбеге	41
Н. А. Киклевич — К вопросу о неустойчивой части пусковой характеристики асинхронного двигателя	43
Отклики на статьи, помещенные в журн. „Электричество“	
Дискуссия по статье проф. В. И. Полонского: „Закон электромеханического подобия и универсальные диаграммы переходных процессов электродвигателей постоянного тока“	44
Е. Я. Казовский — Замечания по статье Д. А. Городского „Асинхронный ход синхронной машины в системе“	48
Д. А. Городский — Ответ на замечания инж. Е. Я. Казовского	49
Г. Л. Перкович — о статье А. М. Бамдас	49
Хроника	50
Рефераты	51

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик Б. Е. Веденеев (ответственный редактор), член-корр. АН СССР А. И. Берг, доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов, член-корр. АН СССР М. П. Костенко, академик В. Ф. Миткевич, академик Н. Д. Папалекси, доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров, канд. техн. наук И. А. Сыромятников, инж. А. И. Товстопалов, член-корр. АН СССР М. А. Шателен.

Ответственный секретарь редакционной коллегии
инж. Я. А. Климовицкий

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

Основные вопросы электрооборудования современных самолетов

Доктор техн. наук, профессор Б. П. АПАРОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Применение электричества на современных самолетах весьма обширно и затрагивает самые разнообразные области генерации энергии, электропривода, автоматик и навигации. В статье поставлены некоторые основные вопросы электрооборудования самолетов.

Современный самолет представляет с точки зрения электрооборудования установку со многими механизмами, требующими самых различных форм электропривода. На самолете применяется в настоящее время большое число электрических измерительных приборов, значительно возрасла мощность радиоустановок и установок электрического освещения. Все вместе взятое заставляет устанавливать на самолете электростанцию сравнительно большой мощности.

Разнообразные приборы переменного тока потребовали на современных самолетах применения специальных преобразователей как однофазного, так и трехфазного тока повышенной частоты (400 Hz) [Л. 1]. В связи с ростом мощности электростанции самолета все более и более обсуждается вопрос о применении в больших самолетах трехфазного тока.

Мощность современного авиационного генератора постоянного тока на тяжелых самолетах достигает до $8 \div 9$ kW, что дает на четырехмоторном самолете общую установленную мощность до 54 kW (с резервным генератором). Выпускаемые генераторы для легких самолетов имеют мощность всего 1000 и 1500 W. Однако все возрастающие требования электропривода на самолетах позволяют предполагать, что генераторы в $8 \div 9$ kW далеко не являются пределом.

Какие основные трудности будут стоять перед проектированием генераторов постоянного тока большой мощности?

В то время как в современных авиационных генераторах постоянного тока наиболее „узким местом“ являются проблема их охлаждения и до известной степени вопросы возбуждения и регулирования, в авиационных генераторах постоянного тока выше 12 kW наиболее трудной является, по моему

мнению, проблема коммутации и щеточного контакта при их работе в высотных условиях.

Расчеты показывают, что подобные генераторы уже требуют дополнительных полюсов. В то же время, как известно, дополнительные полюсы работают удовлетворительно только при ненасыщенном состоянии их цепи, что в таком сильно использованном генераторе, как самолетный, полностью не удастся выполнить. Поэтому получение удовлетворительной коммутации, особенно при перегрузках, будет даже при применении дополнительных полюсов в авиационных генераторах постоянного тока большой мощности все-таки трудно выполнимой задачей.

Учитывая это, некоторые авторы [Л. 2] высказывают мысль о необходимости применения на самолетах, где мощность одного генератора превосходит 12 kW, переменного трехфазного тока, основным преимуществом которого в отношении генератора является отсутствие коллектора. Фирмой GEC разработан трехфазный генератор переменного тока с приводом от авиационного двигателя со скоростью 6000 об/мин при 208/120 V, 400 Hz, 40 kVA продолжительной мощности (60 kVA—5 min., 80 kVA—5 sec.) и $\cos \varphi = 0,75$. Интересно отметить, что этот генератор вместе с возбудителем постоянного тока весит всего 32 kg, диаметр генератора равен 23 см, длина—42,5 см [Л. 2]. Генератор работает с постоянным числом периодов от двигателя через редуктор постоянной скорости. Сведения об этом редукторе не приводятся.

Какова может быть конструкция авиационного генератора переменного тока? Установлено, что для облегчения веса такой генератор должен быть рассчитан на повышенную частоту (400—800 Hz). Некоторые авторы высказывают мнение, что генераторы переменного тока повышенной частоты

должны строиться с постоянными магнитами [Л. 3]. Если говорить об авиационных генераторах, то, как уже было отмечено, при переходе на переменный ток речь будет идти о генераторах мощностью выше $12 \div 15$ kW. Нам представляется, что до тех пор, пока не будет устранен основной недостаток генераторов повышенной частоты с постоянными магнитами, а именно — отсутствие возможности регулировать их напряжение, они не получат распространения в авиации. Опыт построения таких генераторов в ВЭИ показал необходимость иметь специальные стабилизаторы напряжения [Л. 4], при применении которых сводились, кроме того, на-нет все выгоды уменьшения веса и экономичности генераторов переменного тока с постоянными магнитами.

Как уже отмечалось, генератор переменного тока 40 kVA фирма GEC построила в обычном выполнении с возбудителем постоянного тока, что позволяет применять обычные схемы регулирования напряжения. Не лишено перспектив применение для авиационных генераторов переменного тока в качестве возбудителей различных схем с выпрямителями, например с селеновыми. В свое время автор настоящей статьи [Л. 5] провел в МЭИ работу, в которой была подвергнута исследованию возможность возбуждения генераторов переменного тока не от обычных возбудителей, а с помощью „ионных возбудителей“, например, тиратронов. Возможны схемы шунтового (рис. 1), серийного и „компаундного“ (рис. 2) возбуждения ионных аппаратов.

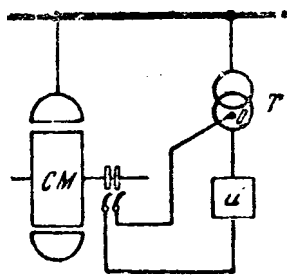


Рис. 1. Схема шунтового возбуждения генератора переменного тока с ионным возбудителем.

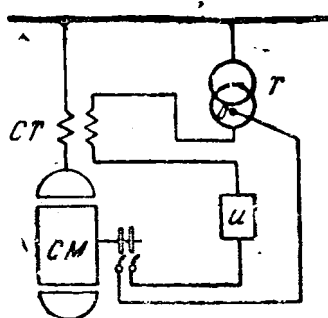


Рис. 2. Схема компаундного возбуждения генератора переменного тока с ионным возбудителем.

Исследования показали, что наиболее благоприятным является компаундное питание ионного аппарата, которое осуществляется путем включения в цепь анодного трансформатора T серийного трансформатора $СТ$, находящегося в цепи тока статора синхронной машины. Наиболее простыми являются схемы с шунтовым ионным возбудителем.

Для автоматического управления схемами с ионными возбудителями автором, совместно с инж. Н. И. Шиферсон и инж. В. И. Кризенталь, был построен в МЭИ электронный регулятор напряжения сеточных цепей тиратронов. Схема такого регулятора напряжения представлена на рис. 3.

В качестве чувствительного элемента был использован нелинейный мост, хотя здесь возможно применение других элементов, которые известны из описания различных электронных регуляторов в отечественной и американской литературе: ферро-резонансные цепи, мосты с нелинейными реакторами и т. п. При изменении напряжения на зажимах синхронного генератора на $\pm \Delta u$ напряжение вхо-

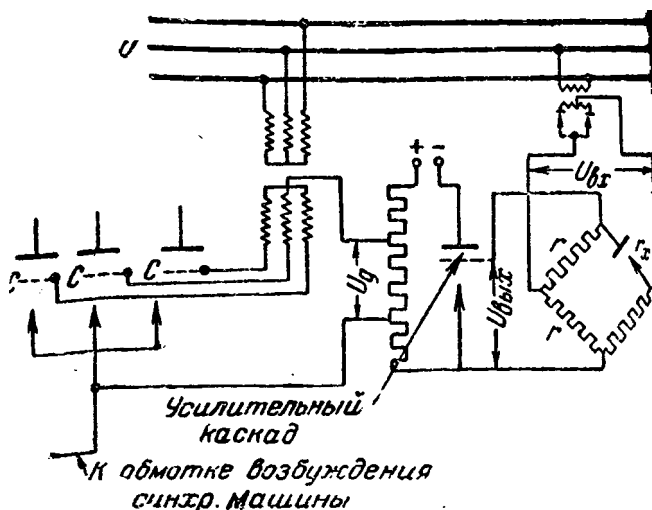


Рис. 3. Схема автоматического регулятора напряжения генератора переменного тока с ионным возбудителем.

да нелинейного моста U_{ax} также будет изменяться. Параметры нелинейного моста подобраны таким образом, чтобы при $U_{ax} = U_n$ напряжение выхода моста равнялось нулю. Для этой цели необходимо выбрать нелинейное сопротивление моста r_x при $U_{ax} = U_n$ равным сопротивлениям трех остальных плеч $r_x = r_1 = r_2 = r_3 = r_4$. Напряжение U_{ax} далее передается на сетки усилительного каскада и, наконец, напряжение выхода каскада U_g передается на сетки тиратронов. Как видно из схемы электронного регулятора, кроме напряжения U_g на сетки подается запирающее напряжение переменного тока U_w от сеточного трансформатора, смещенное на 120° для данной трехфазной выпрямительной схемы.

Электронный регулятор напряжения действует следующим образом. Напряжение каскада U_g подобрано так, чтобы при падении напряжения генератора смещать фазу запирающего напряжения, благодаря чему открываются тиратроны и увеличивается ток возбуждения (при повышении напряжения регулятор действует обратным образом).

Работа генераторов переменного тока с тиратронным возбудителем и электронным регулятором сеток была проверена в лабораторных условиях в МЭИ и показала весьма хорошие качества в отношении быстроты восстановления напряжения при нарушениях режима. Применение ионного возбуждения для авиационных генераторов переменного тока в условиях все большего возрастания их мощности позволило бы устранить возбудитель-машину постоянного тока, коммутация на коллекторе которой при намечающихся скоростях генераторов 6 000—12 000 об/мин в высотных условиях представляла бы несомненные неприятности.

Подводя итоги сказанному в отношении дальнейшего развития самолетных генераторов, следует полагать, что наряду с электрооборудованием самолетов на постоянном токе электростанций самолетов будут также оборудоваться и на переменном токе; последнее в первую очередь будет иметь место для особо мощных и тяжелых самолетов.

Мысль самолетного электротехника в последнее время была прикована к возможности применения

Для самолетных установок новой машины—амплидина с его большими возможностями усиления. В последнее время на некоторых самолетах амплидин нашел себе применение в качестве генератора в схеме Леонарда для поворота пулеметных турелей.

Каковы вообще перспективы применения амплидина на самолетных установках? Чтобы дать на это ответ, необходимо проанализировать некоторые свойства амплидина. Кроме большого коэффициента усиления (отношение мощности рабочей обмотки к мощности, потребляемой сигнальной обмоткой), в некоторых схемах на самолете требуется весьма быстрая оперативность трансформации сигнала в рабочую мощность. Другими словами, от амплидина требуются весьма малые постоянные времени его цепей.

Рассмотрим, как сочетается требование малых постоянных времени амплидина T_1 и T_2 с требованиями возможно большего коэффициента усиления κ .

Рассмотрим постоянную времени сигнальной обмотки T_1

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{\omega_1^2 \Lambda_1 q_1}{\rho l_w \omega_1} = \frac{\omega_1 \Lambda_1 q_1}{\rho l_w} = \frac{\Lambda_1 (\omega_1 l_w q_1 \gamma)}{\rho l_w^2 \gamma} =$$

$$= \frac{1}{\gamma \rho} \frac{G_1}{l_w} \frac{\Lambda_1}{l_w} = \frac{1}{\gamma \rho} g_1 \lambda_1,$$

где g_1 — вес сигнальной обмотки на единицу длины среднего витка обмотки; λ_1 — магнитная проводимость потока сигнальной обмотки на единицу длины среднего витка; γ — удельный вес; ρ — удельное сопротивление материала обмотки.

Из рассмотрения этого выражения видим, что постоянная времени сигнальной обмотки тем меньше, чем меньше вес ее обмотки на единицу длины витка. Этого можно добиться, выполняя амплидин слабо насыщенным и с возможно малым зазором, т. е. в форме „железной машины“ (с сравнительно большим весом железа). Однако в этом случае λ_1 будет возрастать. Здесь мы имеем первое противоречие для конструктора амплидина.

Постоянная времени короткозамкнутой цепи амплидина

$$T_2 = N^2 \Lambda_2,$$

где N число проводников якоря будет тем меньше, чем меньше будет выбрано число проводников обмотки якоря, что заставило бы выполнять амплидин опять „железной машиной“.

Посмотрим теперь, от чего зависит коэффициент усиления амплидина

$$\kappa = \frac{E_3 i_3}{E_1 i_1}.$$

Имеем:

$$E_1 = n N \Phi_1 10^{-8} \text{ В}; \quad i_3 = \frac{E_2}{R_2}; \quad \Phi_2 = \Lambda_2 N i_3 = \Lambda_2 N \frac{E_2}{R_2};$$

$$E_2 = n N \Phi_1 10^{-8}; \quad \Phi = \Lambda_1 \omega_1 i_1; \quad E_3 = n N \Phi_2 10^{-8} =$$

$$= n N [\Lambda_2 N i_3] 10^{-8} = n N \left[\Lambda_2 N \frac{E_2}{R_2} \right] 10^{-8}$$

$$E_3 = N n \left[\frac{\Lambda_2 N}{R_2} (n N \Phi_1) 10^{-8} \right] 10^{-8}$$

$$E_3 = N n \left[\frac{\Lambda_2 N^2}{R_2} n \Lambda_1 \omega_1 i_1 \right] 10^{-16}.$$

Окончательно

$$E_3 = \Lambda_1 \Lambda_2 \frac{N^3 \omega_1}{R_2} n^2 i_1 10^{-16} \text{ В}$$

и коэффициент усиления амплидина

$$\kappa = \frac{E_3 i_3}{E_1 i_1} = \frac{i_3}{E_1} \Lambda_1 \Lambda_2 \frac{N^3 \omega_1}{R_2} n^2 10^{-16} [\text{Л. 6}].$$

Отсюда мы видим, что коэффициент усиления амплидина тем больше, чем на большее число оборотов он строится, чем меньше омическое сопротивление короткозамкнутой цепи, чем больше коэффициенты Λ_1 и Λ_2 — магнитные проводимости по продольной и поперечной осям амплидина и чем больше число проводников обмотки якоря. Увеличение магнитных проводимостей Λ_1 и Λ_2 ведет к построению амплидина с малыми зазорами и малыми магнитными сопротивлениями, т. е. ненасыщенным; это приведет опять к построению амплидина в форме „железной машины“ большого веса. При этом постоянная времени сигнальной обмотки может увеличиться. Выбор большого числа проводов якоря для увеличения коэффициента усиления приведет к увеличению постоянной времени T_2 короткозамкнутой цепи якоря 22 и к уменьшению оперативности амплидина.

Таким образом увеличение коэффициента усиления амплидина и его оперативность (претворение сигналов в работу исполнительного механизма) находятся в противоречии друг с другом. Важно также для самолетных установок и то обстоятельство, что, как в случае выполнения амплидина с малыми постоянными времени, так и в случае выполнения амплидина с большим коэффициентом усиления, его приходится делать ненасыщенным, что увеличивает вес амплидина, — нежелательное явление для самолетных установок.

Известны схемы увеличения коэффициента усиления амплидина с помощью вспомогательных обмоток, например (рис. 4), с помощью серийной обмотки, питаемой от щеток 22 и расположенной по оси сигнальной обмотки [Л. 7]. Поток серийной обмотки совпадает по направлению с потоком сигнальной обмотки и увеличивает коэффициент усиления амплидина. Однако теоретический анализ показывает, что у амплидина с серийной обмоткой E_3 нарастает во времени значительно медленнее, чем в нормальной схеме.

Следует также упомянуть еще об одном свойстве амплидина. Рассмотрим схему работы амплидина на какую-нибудь нагрузочную цепь, обладающую сопротивлением R_3 и индуктивностью L_3 (рис 5).

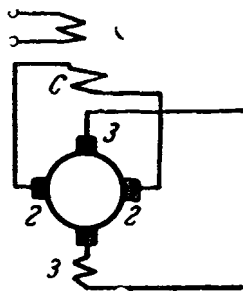


Рис. 4. Схема амплидина с добавочной серийной обмоткой.

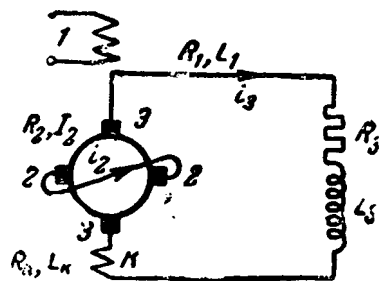


Рис. 5. Схема амплидина для исследования.

Положим, что омические сопротивления и индуктивности якоря амплидина как в продольной, так и в поперечной осях приблизительно одинаковы и равны R_2 и L_2 . Пусть омическое сопротивление и индуктивность сигнальной обмотки R_1 и L_1 , компен-

сационной — соответственно R_k и L_k . Предположим, что амплидин имеет неполную компенсацию по оси 33. Тогда будет иметь место взаимная индуктивность сигнальной обмотки с якорем (и наоборот), обусловленная неполной компенсацией.

Уравнения переходных процессов амплидина для этого случая будут иметь вид:

$$E_1 = (R_1 + pL_1) \pm pMi_3;$$

$$E_2 = k_1 i_1 \pm k_3 i_3 = (R_2 + pL_2) i_2;$$

$$E_3 = k_2 i_2 = (R_2 + R_k + R_3) + p[L + L_3] \pm pMi_1.$$

Знак $+$ соответствует случаю „перекомпенсации“, знак $-$ „недокомпенсации“. В результате решения ток нагрузки i_3 будет иметь следующий вид:

$$i_3 = E_1 c \frac{p^2 + b_1 p + b_2}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}.$$

Подробное исследование этого уравнения показывает, что в случае перекомпенсации возникает колебательный процесс; этот колебательный процесс установления тока в рабочей цепи амплидина будет затухающим; наоборот, при недокомпенсации и определенных условиях может наступить неустойчивый колебательный процесс, приводящий к практически недопустимой работе амплидина [Л. 7]. Таким образом в ответ на сигнал в цепи рабочей обмотки, а следовательно, и в цепи двигателей исполнительного механизма, могут возникнуть колебания.

Можно также показать, что подобные явления возникнут в амплидине также при неправильной установке щеток (смещении) как в продольной, так и в поперечной осях.

Таким образом при проектировании амплидина вообще, и для самолетного электрооборудования в особенности, встает ряд сложных, иногда противоречивых задач. Большим недостатком являются также трудности построения хорошо работающего амплидина малого веса. В то время большим достоинством амплидина является возможность питания сигнальной обмотки непосредственно от радиоцепей, что при других схемах является более затруднительным.

Основные вопросы, стоящие сейчас в области электропривода, это — вопросы перехода в мощных самолетах на напряжения 115 V постоянного тока и 208/120 V переменного тока, так как применение на мощных самолетах напряжения 24 V дает значительное утяжеление самолетной сети. По американским данным [Л. 2], если принять вес самолетной сети при напряжении 24 V за 100%, то при переходе на напряжение 115 V постоянного тока вес сети (однопроводной) будет составлять всего 22,5%, двухпроводной 45%, а при переходе на трехфазный ток (трехпроводную систему, $\cos \varphi = 0,75$) — всего 30%. Поэтому как заводам, так и в эксплуатации в дальнейшем придется осваивать самолетные электродвигатели и разнообразную аппаратуру на указанные напряжения.

Применение электродвигателей постоянного тока для разнообразных механизмов в настоящее время изучается в широких пределах [Л. 8]. Для них будут стоять в дальнейшем вопросы уменьшения веса самого электродвигателя и редуктора как на имеющихся, так и на новые шкалы напряжений.

Что касается электродвигателей переменного тока, то их эксплуатационные свойства на самолетах и области их применения для электропривода

разнообразных механизмов на самолете в настоящее время еще мало изучены. Наибольшие возможности имеет здесь трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель по своей простоте, отсутствию коллектора, надежности в эксплуатации и т.д. Однако асинхронный двигатель обладает и рядом недостатков, из которых основными являются: отсутствие регулирования скорости и сравнительно малый пусковой момент. При выборе асинхронного двигателя в качестве электродвигателя на самолетах установках должны быть взвешены все его свойства. В качестве примера рассмотрим его применение для привода вентилятора.

На рис. 6 приведены кривые момента асинхронного двигателя и вентилятора. Вентиляторные кривые

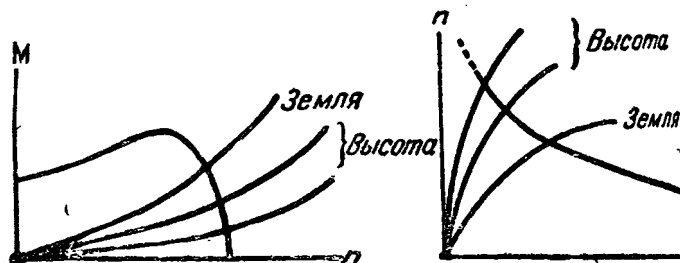


Рис. 6. Механические характеристики асинхронного двигателя и серийного двигателя постоянного тока при работе на вентилятор в условиях самолета.

даны для работы на различных высотах. Для сравнения приведены аналогичные кривые того же вентилятора с серийным двигателем постоянного тока. Мы видим, что при работе вентилятора от серийного двигателя высотность сказывается в меньшей степени, чем при работе вентилятора от асинхронного двигателя. В то же время в отношении пуска вентилятор вполне позволяет применить в качестве привода к нему асинхронный двигатель. Большие трудности возникнут при применении асинхронного двигателя в качестве привода механизмов с постоянным моментом сопротивления. Низкие температуры в условиях высотности или полярной эксплуатации весьма увеличивают моменты сопротивления механизмов, причем момент выше при „трогании с места“ механизма, чем в условиях „нормального“ движения. Вполне возможно применение асинхронного двигателя для привода мотор-генераторов и т. п.

В настоящее время в США предлагается стандартизировать для самолетов, оборудованных на переменном токе, частоту 400 Hz. Эта частота является компромиссным решением между частотой, употребляемой на самолетах для радиотехнических целей и частотой 240 Hz, которую в США считают оптимальной для двигателей. Вопросы оптимальной частоты для самолетных двигателей переменного тока, а также вопросы выбора стандартной частоты для самолетной сети весьма актуальны и важны и должны по нашему мнению явиться предметом исследований отечественных научных учреждений. Но даже если принять частоту 400 Hz за исходную, то здесь, с точки зрения электрооборудования самолета, должны быть дополнительно исследованы вопросы применения асинхронных двигателей различных чисел оборотов: 24 000; 12 000; 8 000; 6 000; 4 800; 4 000; 3 428,5; 3 000 об/мин. Эти скорости соответствуют 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 и 16-полюсным двигателям. В своей статье инж.

Лун [Л. 9] утверждает, что меньшим весом будут обладать быстроходные двигатели с редуктором по сравнению с двигателем на большее число полюсов (тоже с редуктором). Он считает, что однополюсный асинхронный двигатель в 1 л. с. будет в 1,4 раза тяжелее, чем тот же двухполюсный двигатель. Этот вопрос также может явиться предметом исследований наших научных учреждений.

Новым вопросом электропривода самолетов является также вопрос применения в ряде случаев в самолете двигателей с постоянными магнитами. Анализ нагрузочных диаграмм некоторых приводов самолета позволяет считать, что возможно применение в этих приводах двигателей постоянного тока шунтового возбуждения. Особенно это относится к приводам постоянного тока весьма малой мощности с так называемыми микродвигателями. Примером приводов, где может быть применен двигатель шунтового возбуждения, является привод турельных пулеметных установок с амплитудным управлением, привод триммеров рулей, серводвигатели для поворота дроссельных заслонок в схемах автоматизированного ВИШ (винт изменяемого шага) и т. п. В этих случаях следует рекомендовать применение электродвигателей с постоянными магнитами. Такие двигатели обладают значительно большей надежностью, простотой, меньшим весом, ввиду отсутствия обмотки возбуждения и в то же время, что особенно важно отметить, — большим к. п. д. Увеличение к. п. д. за счет отсутствия обмотки возбуждения является значительным преимуществом двигателей постоянного тока с постоянными магнитами; процентное увеличение к. п. д. тем выше, чем меньшей мощностью обладает электродвигатель. Для микродвигателей увеличение к. п. д. может достигать до 20—30%.

В настоящее время технология сплавов магнитных сталей достигла весьма больших успехов; поэтому выполнение электродвигателей постоянного тока сравнительно небольшой мощности с постоянными магнитами вполне возможно при габаритах и весах, значительно меньших, чем для аналогичных машин с электромагнитным возбуждением. Это особенно важно для самолетных установок, где минимальный вес установленных электродвигателей играет решающую роль. На первый взгляд может показаться, что электродвигатели с постоянными магнитами будут иметь больший вес по сравнению с двигателями с электромагнитным возбуждением. Однако надо иметь в виду тот большой прогресс, который достигнут в последние годы в изготовлении сплавов магнитных сталей.

В табл. 1 указаны свойства магнитных сталей, применяемых в настоящее время в электромашиностроении [Л. 10].

Таблица 1

Химический состав						B_{max}	B_r	H_c
Al	Ni	Co	Cu	Fe	H_{max}			
12	20	5	—	62	2 000	12 350	7 300	420
10	17	12,5	6	54,5	2 000	12 600	7 350	560
12	25	—	—	63	2 000	12 000	6 900	475
12	28	5	—	55	3 000	11 850	5 300	730
8	14	24	3	51	3 000	17 200	12 500	550

Как видно из таблицы, при сплаве с 8% остаточная индукция B_r постоянного магнита достигает

12 500 Gs. Это позволяет считать, что при применении подобных постоянных магнитов вполне возможно построение электродвигателей с постоянными магнитами не только малой, но и средней мощности.

Двигатели с постоянными магнитами следует отнести к двигателям, работающим примерно с постоянным магнитным потоком $\Phi = \text{const}$. В электродвигателях же с электромагнитным возбуждением магнитный поток изменяется вследствие нагрева обмотки возбуждения. Самолетные электродвигатели должны работать в условиях изменения температуры наружного воздуха от $+50$ до -56°C . В электродвигателях с постоянными магнитами колебания магнитного потока от изменений температуры и нагрева практически отсутствуют; этим электродвигатели с постоянными магнитами выгодно отличаются от двигателей с электромагнитным возбуждением. Вследствие отсутствия потерь на возбуждение электродвигатель с постоянными магнитами выделяет меньшее количество тепла и имеет меньший нагрев. Механическая характеристика $M=f(n)$ двигателей с постоянными магнитами близка к линейной, потому что, как указано выше, в эксплуатационных условиях $\Phi = \text{const}$. Некоторое отступление от линейной зависимости может вызвать реакцию якоря, но для небольших двигателей ее влияние, как показывают расчеты и опыты, не столь значительно. Таким образом нашим заводам следует в еще большей степени увеличить выпуск двигателей небольшой мощности с постоянными магнитами для самолетов.

Электрооборудование современных мощных самолетов требует защитной и коммутационной аппаратуры на большие силы тока. В настоящее время в Америке освоены в производстве токовые реле для самолетных систем до 200 А как постоянного, так и переменного тока. Эти реле скорее, пожалуй, должны быть названы мощными контакторами. Реле этого типа ушли далеко от своих прототипов, которые мы привыкли видеть на оборудовании легких самолетов. Построение таких реле является очередной и важнейшей задачей наших заводов, производящих самолетную аппаратуру.

В качестве примера на рис. 7 представлена схема автомата обратного тока на 200 А для тяже-

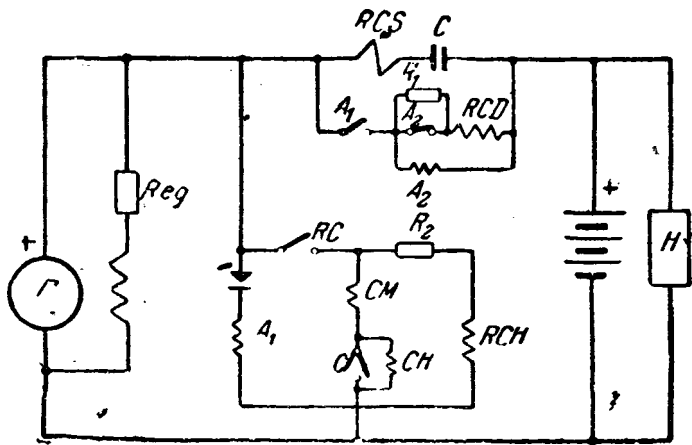


Рис. 7. Схема реле обратного тока.

лого самолета. Автомат обратного тока состоит из поляризованного реле обратного тока, двух вспомогательных реле и контактора. В реле обрат-

ного тока имеются три обмотки: включающая обмотка *RCD*, действующая от разности напряжений на главных контактах *C*, через указанные вспомогательные реле *A*₁ и *A*₂; удерживающая обмотка *RCH* и серийная обмотка *RCS*, состоящая из одного витка. Удерживающая обмотка удерживает контакты *RC*, когда обмотка *RCD* замкнута накоротко главными контактами. Ампервитки серийной обмотки добавляются к ампервиткам удерживающей обмотки, когда генератор посылает ток в систему. Поляризация реле осуществляется постоянным магнитом.

Работа реле происходит следующим образом [Л. 11]: когда напряжение генератора возрастет до 20 В, включается реле *A*₁. Так как на батарее напряжение равно приблизительно 25 В, то на обмотке *RCD* и *A*₂ будет дифференциальное напряжение 5 В. При этом напряжении реле *A*₂ сработает и введет сопротивление последовательно с обмоткой *RCD*. При дальнейшем возрастании напряжения генератора напряжение на обмотке *A*₂ будет уменьшаться и, когда напряжение генератора сравняется с напряжением аккумуляторной батареи, реле *A*₂ опять включится и замкнет накоротко сопротивление *R*₁, что опять усилит ток в дифференциальной обмотке *RCD* реле обратного тока. Если напряжение генератора превысит напряжение аккумуляторной батареи на 0,4 В, контакты *RC* реле обратного тока замкнутся и ток начнет проходить по включающей катушке *CM* контактора и удерживающей обмотке реле обратного тока *RCH*, а после размыкания контакта *C* — по удерживающей обмотке контактора *CH*. Далее замыкаются основные контакты контактора *C* и генератор приключается к шинам. При изменении направления тока генератора серийная обмотка *RCS* начинает действовать навстречу обмотке *RCH* и произведет размыкание контактов *RC* реле обратного тока и далее контактов *C* контактора, после чего генератор будет отключен.

В США в последнее время проделана большая работа по изысканию наиболее надежных контактов для самолетных контакторов большого тока. Задача эта — весьма трудная. Действительно, основным органом контактора являются контакты. Материал контактов должен быть таким, чтобы при нормальной работе на контактах не создавалась непроводящая оксидная пленка, увеличивающая их переходное сопротивление. При включениях контактов большого тока может произойти явление «сваривания», спекания контактов. Кроме известных в настоящее время мер для устранения спекания контактов (создание предварительного давления на контакты, усилие ампервитков включающих катушек, правильный выбор контактного давления, выбор материала и теплоемкости контактов и т. п.), в Америке разработаны [Л. 12] прессованные контакты; все материалы, входящие в их состав, измельчаются в мелкие зерна, смешиваются и напрессовываются под большим давлением на пластины. Плотность материала контакта регулируется давлением напрессовки. Весьма большой эффект в отношении уменьшения спекания контактов дает прибавление в прессованные контакты окисей кадмия.

Вопросы приборного электрооборудования на самолете столь разнообразны, что одни они могли бы стать предметом специальной статьи. Основное,

что следует отметить, это — все большее и большее развитие схем дистанционных измерений, причем вместе с усовершенствованием схем постоянного тока с логометром широко применяются автосинные и магнесинные схемы синхронной связи в переменном (трехфазном) токе. Логометрические мостиковые схемы применяются преимущественно для температурных измерений. Такого вида схем представлена на рис. 8. Наибольшее распростра-

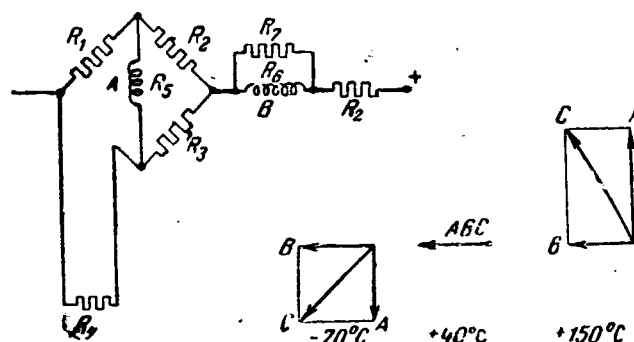


Рис. 8. Схема для измерения температуры с помощью логометра с постоянным магнитом.

нение получили [Л. 13] в последнее время логометры с неподвижными катушками и с постоянным магнитом.

Прибор имеет ротор в виде постоянного магнита специальной формы (для получения равномерной шкалы) и две взаимно перпендикулярные катушки *A* и *B*. В одной течет ток $i = \text{const}$, в другой — ток, являющийся функцией тока в сопротивлении *R*, подверженном изменениям температуры. Под действием полей обеих катушек возникает результирующее поле по направлению которого устанавливается постоянный магнит. На рис. 8 даны три положения вектора результирующего поля логометра для трех значений температур: -70°C , $+40^\circ\text{C}$, $+150^\circ\text{C}$.

Рост мощности самолетов выдвинул проблему создания суммирующих измерительных схем для учета содержимого баков [Л. 14] с горючим. Для суммирования показаний содержимых топливных баков применяются две конструкции. В простейшем случае суммирование осуществляется для длинных топливных баков, которые требуют двух трансмиттеров, так как один не дает точного представления о количестве содержимого.

Более сложным является суммирование уровней в различных баках, где последовательность опорожнения не установлена (например, пробой одного из баков), но где желательно простое указание общего количества топлива. В первом случае два трансмиттера работают на один логометр (рис. 9), причем, как обычно, в одной катушке ток $i = \text{const}$. Катушка, в которой ток изменяется, состоит из двух элементов: каждая секция этой двойной обмотки соединена с соответствующим трансмиттером. Трансмиттер работает обычным образом. При изменении уровня жидкости поплавки опускаются и рычаг поворачивает передачу к ползунку потенциометра трансмиттера, помещенного в головке.

При непоследовательном суммировании (случай нескольких отдельных баков) вопрос становится более сложным. В этом случае логометр должен быть построен таким образом, чтобы приращения

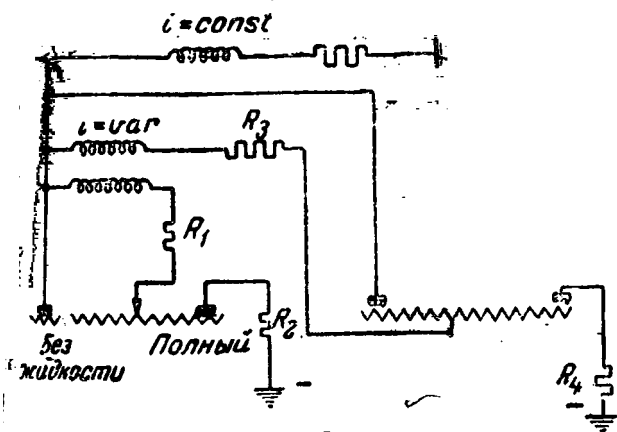


Рис. 9. Схема для измерения уровня жидкости в баках.

ампервитков отдельных катушек на литр жидкости бака были бы постоянными величинами и одинаковыми для всех баков. Тогда суммарные ампервитки подвижных катушек будут равны

$$wi = \Delta wi(g_1 + g_2 + g_3 + \dots),$$

где g_1, g_2, g_3 — содержание, имеющееся в баках, в литрах.

Для получения этого уравнения нужно иметь баки определенной формы, трансмиттеры определенных размеров и специальную электрическую цепь. Для указанного суммирования баки должны быть построены таким образом, чтобы могла быть выполнена линейная зависимость между углом поплавок и содержанием бака. Обычно устанавливают баки постоянного сечения, у которых для всех уровней имеет место зависимость

$$x = L(1 - \cos \theta).$$

Здесь x — глубина жидкости; L — длина рычага поплавок, θ — угол между рычагом и перпендикуляром к поверхности жидкости. В пределах $\theta = 60^\circ$ до $\theta = 120^\circ$ кривая $x = f(\theta)$ представляет практически прямую линию. Введением в цепь сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 открываются дополнительные пути компенсации нелинейного отношения между количеством жидкости и углом поплавок.

Вряде схем синхронной связи передача трансмиттер—приемник осуществляется с помощью автосинхронизации, теория и методы расчета которых в настоящее время следует считать достаточно разработанными. Наиболее новой и интересной является появившаяся в последних навигационных приборах синхронная передача типа „Магнесина“ [Л. 15]. Схема этой передачи представлена на рис. 10. Эта система выполнена как в трансмиттере, так и в приемнике в виде тороида из магнитного материала, внутри которого имеется двухполюсный ротор в виде постоянного магнита NS . На тороиде навита обмотка типа кольца Грамма, приключенная в разрезе к однофазной сети. Присоединением соответствующих

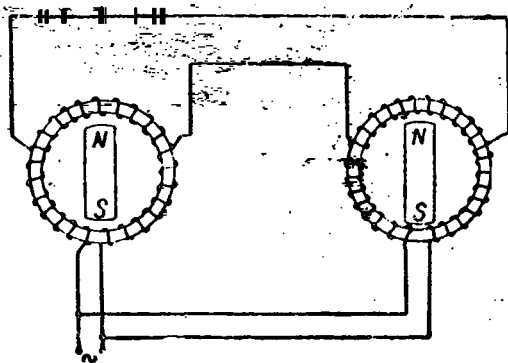


Рис. 10. Схема магнесина.

двух точек обмотки, отстоящих друг относительно друга на $1/3$ части окружности, можно получить трехфазную синхронно-передающую систему. Однако тонкостью схемы является то, что синхронная передача осуществляется второй гармоникой (в основном) за счет нелинейных магнитных характеристик и неравномерного подмагничивания тороидов постоянными магнитами. Основные волны э. д. с. как в трансмиттере, так и в приемнике уравниваются напряжением сети. В остальном система аналогична автосинхронизации.

Вот далеко не полный перечень важнейших вопросов электрооборудования современных самолетов, которые являются первоочередными для заводов авиационной электропромышленности.

Литература

1. Button. Aircraft Inverter Construction. El. Eng., September, 1943.
2. Boice and Levoy. Basic Considerations in Selection of Electrical Systems for Large Aircraft. GER, March, 1944.
3. А. Н. Ларионов. Возбуждение генераторов повышенной частоты постоянными магнитами. Электричество, № 1, 1940.
4. С. В. Крауз, Б. Д. Садовский, Т. Г. Сорок е р. Стабилизация напряжения в синхронных машинах с постоянными магнитами. Вестник электропромышленности, № 2, 1940.
5. Б. П. Апаров. Применение ионных аппаратов для возбуждения синхронных машин. Электричество, № 1, 1940.
6. М. И. Романов. Теория работы амплидина и область его применения. Электричество, № 11—12, 1944.
7. С. Я. Эпштейн. Переходные процессы в амплидине. Вестник электропромышленности, № 1—2, 1945.
8. Н. Т. Коробан. Электрооборудование самолетов по 24 V пост. тока (диссертация).
9. Braun. Some Aspects of the Application of Induction Motors to Aircraft. El. Eng., October, 1944.
10. Smith. Properties and Equipment for Magnetization and rest. GER, April, 1942.
11. Walley. Aircraft Differential—voltage cutout. El. Eng., September, 1944.
12. Russel and Charbouneau. El. Eng., September, 1943.
13. Sias and Fisk. Unique Moving—magnet—ratio-instrument. El. Eng., September, 1944.
14. Macintyre. Totalizing Contents of Aircraft Fuel Tanks. El. Eng., September, 1944.
15. Childs. Magnesyn Remote Indication. El. Eng., September, 1944.

Авиационные сельсины

Инж. Б. М. КАГАН и инж. П. В. ИСАЕВ

В статье дано описание конструкций авиационных сельсинов и аналогичных приборов, применяемых для индикаторных передач на современных самолетах. Приводятся сравнительные данные зарубежных и советских приборов.

В авиационном приборном электрооборудовании получили за последнее время массовое применение системы дистанционной передачи угла и среди них особое распространение получили сельсинные схемы.

В самолетном оборудовании с помощью сельсинов и аналогичных им приборов осуществляются: дистанционный указатель магнитного компаса, указатель радиокompаса, бензиномеры, манометры бензина и масла, вакуумметры, термометры, тахометры, указатели расхода горючего, указатели положения шасси и закрылков, бомбардировочные прицелы, дистанционное управление настройкой антенных контуров, устройства привода самолетных турелей. В ряде случаев индикаторные дистанционные передачи угла осуществляются потенциометрическими системами, а сельсины применяются лишь в передачах, нагруженных дополнительным моментом на приемнике (управляющие щетки и т. д.)

Сельсины Lorenz. В самолетной радиостанции FUG-10 с помощью сельсинов Lorenz осуществляется дистанционная настройка вариометра и переключение антенных контуров на различные диапазоны. Настройка антенного устройства производится по индикатору настройки поворотом сельсина датчика на пульте управления радиостанции. Напряжение возбуждения сельсинов 120 В, частота 250 Hz. Максимальный синхронизирующий момент 350 гсм. Сельсины получают напряжение от специального умформера.

Сельсины Askania. Сельсины конструкции Askania применены в приборе управления автоматического бомбардировочного прицела для ввода исходных данных от первичных приборов (скорость, снос и т. д.). В одном приборе управления устанавливаются пять сельсинов. Роторы сельсинов перемещают легкие траверзы со щетками по следающим кольцам, управляя, таким образом, обрабатывающими моторчиками решающего механизма. В конструкции сельсинов есть некоторые особенности.

На корпусе сельсина установлены кольца, к которым подключены все обмотки машины. Внешний монтаж подводится к неподвижным щеткам, расположенным на кольце, крепящем сельсин. Такое выполнение позволяет легко проводить операцию регулировки начальных положений роторов сельсинов.

На явнополюсном роторе сделан короткозамкнутый виток по поперечной оси, который несколько повышает крутизну кривой синхронизирующего момента и демпфирует качания ротора. Передний подшипник сельсина — шариковый. Задний конец оси выполнен в виде керна, опирающегося на латунный подшипник и стальной пружинный подпятник. При такой конструкции опоры уменьшает-

ся трение и облегчается регулировка осевого давления на ротор сельсина.

Благодаря применению повышенной частоты (400 Hz) размеры сельсинов невелики.

Наибольшее распространение сельсины получили в оборудовании американских самолетов, причем в основном в индикаторных передачах, где сельсин-приемник работает только на стрелку указателя.

К индикаторным авиационным сельсинам предъявляются следующие основные требования: 1) высокая точность передачи (порядка $\pm 1^\circ$); 2) высокая надежность, безотказность в работе; 3) малый габарит и вес; 4) незначительное потребление энергии.

С точки зрения увеличения надежности работы сельсинов крайне желательным является отсутствие контактных колец и щеток в датчике и особенно в приемнике.

Рассмотрим новейшие зарубежные конструкции аппаратуры авиационной индикаторной передачи.

Автосины Pioneer. В новой конструкции автосинов фирмы Pioneer благодаря переходу на повышенную частоту удалось значительно снизить вес и габариты автосинов.

В конструкцию внесен ряд упрощений в выполнении контактной системы, отсутствует магнитный экран в расточке статора, который применялся в старых автосинах для уменьшения погрешности с зубцовых гармоник потока.

Автосины фирмы Pioneer широко применяются в оборудовании самолетов. Выпускается большое количество различных приборов с автосинами, в том числе двойные индикаторы с двумя автосинами, расположенными по одной оси, причем передача движения заднего автосина на стрелку производится валиком, проходящим через полую ось переднего автосина. Небольшая величина воздушного зазора (0,1 мм) позволила снизить намагничивающую мощность. Уменьшение веса ротора вследствие повышенной частоты и применения прецизионных шариковых подшипников привело к уменьшению трения, в результате чего снизилась величина необходимого синхронизирующего момента, что в свою очередь также способствовало уменьшению габаритов новых автосинов.

Датчик и приемник в этой системе выполняют совершенно одинаково. От одного датчика могут работать одновременно два приемника.

Дистанционная передача «Магнесин». Большой интерес представляет самосинхронизирующаяся бесконтактная система синхронной передачи «Магнесин», разработанная фирмой Pioneer.

Датчик «Магнесин» состоит из тороида (набранного из пермаллоевых шайб), на котором намотана обмотка с отпайками под 120° .

Внутри тороида расположен круглый постоян-

магнит. Приемник имеет такое же устройство, только меньших размеров. Ротор приемника (полюсный магнит) вращается в прецезионных подшипниках. На конце оси приемника крепится жёлка. Обмотки тороидов питаются напряжением переменного тока с частотой 400 Hz. Соединение обмоток датчика и приемника межсоединено показано на схеме рис. 1.

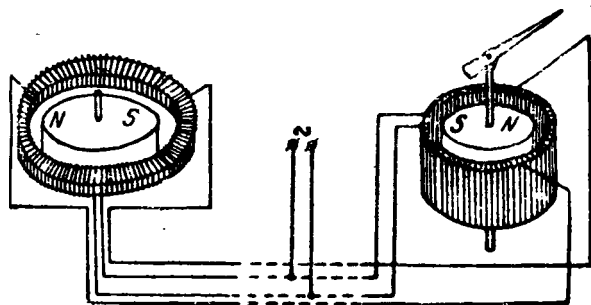


Рис. 1.

Вследствие нелинейности характеристики материала тороидов, подмагничиваемых постоянным магнитом, на секциях обмоток появятся напряжения удвоенной частоты (аналогично удвоению числа периодов по схеме Арко), амплитуды которых будут зависеть от положения оси постоянного магнита ротора относительно секций обмотки.

При повороте ротора датчика из синхронизирующего с приемником положения нарушается равенство между напряжениями двойной частоты на секциях датчика и приемника, возникают уравнительные токи, которые в приемнике, благодаря нелинейности характеристики намагничивания железа тороида, создают постоянный поток; взаимодействие последнего с магнитом ротора создает синхронизирующий момент.

В системе «Магнесин» только небольшая часть мощности используется для создания синхронизирующего момента, поэтому величина синхронизирующего момента приемника очень мала. Это сдерживает ее распространение. Передача «Магнесин» нашла себе применение в дистанционном магнитном компасе, поскольку в нем весьма удобно, сам магнит компаса может быть использован в качестве ротора датчика.

Сельсины «Телегон». Бесконтактные авиационные сельсины под названием «Телегон» были впервые применены в электронно-лучевом индикаторе «Флейтрей» — комбинированном аэронавигационном приборе. В 1942 г. рекламировались четырехшкальные приборы контроля винтомоторной группы самолета с сельсинами «Телегон».

Принципиально «Телегон» работает как сельсин, но конструкция его (рис. 2а) отличается от конструкции обыкновенных сельсинов.

Внутри неподвижной катушки возбуждения 1 смонтирована полая ось 2 из мягкого железа со стальными кернами по концам оси. Подвижная система поддерживается подшипниками на камнях. Обмотка синхронизации выполняется двухфазной.

Магнитный поток обмотки возбуждения, питаемый переменным током (частота 300—800 Hz), замыкается по оси, лепесткам 3 и по внешнему

магнитному кожуху 4, служащему также магнитным экраном.

Как и в обыкновенном сельсине, поток обмотки возбуждения M создает в фазах F синхронизирующей обмотки э. д. с., величина которых определяется геометрическим взаиморасположением ротора и фазовых обмоток (рис. 2б). Если прием-

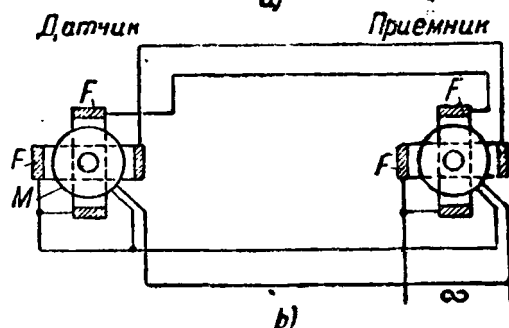
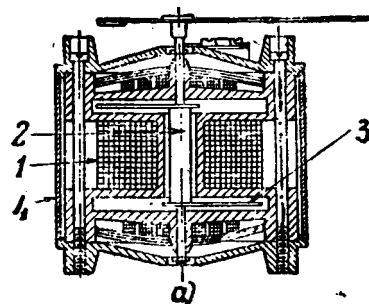


Рис. 2.

ник и датчик рассогласованы, то э. д. с. в фазах приемника и датчика не равны и возникают уравнительные токи, которые создают момент, поворачивающий ротор приемника в согласованное с датчиком положение. Таким образом система «Телегон» является бесконтактной системой синхронной передачи. Несмотря на это преимущество, большого распространения эти приборы не получили, повидимому, из-за небольшой величины синхронизирующего момента, а также из-за вызванных этим технологических затруднений с ликвидацией погрешностей от магнитной несимметрии.

Сельсины на постоянном токе ГЕС. Стремление избавиться от контактов характеризует и новую разработку фирмы ГЕС — сельсины на постоянном токе, получившие в последнее время очень широкое применение в оборудовании самолетов.

В этой системе (рис. 3) приемник не имеет контактных колец и щеток. Однако щеточные кон-

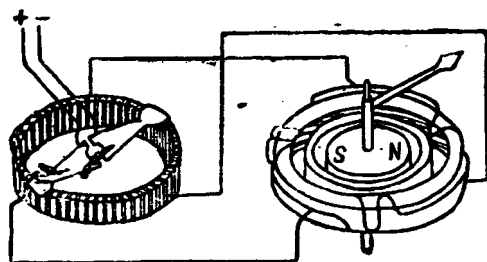


Рис. 3.

такты сохраняются в датчике, выполняемом в виде равномерно намотанного кольцевого потенциометра, по которому перемещаются две щетки, подводящие к диаметрально противоположным точкам по-

тенциометра напряжение постоянного тока. Под углом в 120° в потенциометре выполнены отпайки.

Приемник представляет собой тороид, набранный из пермалловых шайб. На тороиде расположены три катушки, образующие замкнутую на себя обмотку с отпайками под 120° . Соединение между приемником и датчиком выполняется по схеме рис. 3. Внутри тороида приемника помещен круглый постоянный магнит, вращающийся на оси.

Положение оси потока синхронизирующей обмотки внутри тороида приемника соответствует положению оси щеток датчика относительно соответствующих отпайек обмотки датчика. Таким образом при повороте щеток датчика на тот же угол поворачивается внутри тороида созданный токами в обмотке приемника магнитный поток. Ротор приемника становится в положение, при котором потоки статора и ротора приемника складываются.

Для демпфирования колебаний ротора в зазоре между ротором и статором приемника помещается медное кольцо. Подшипники приемника выполняются из бронзы или стали, так как небольшой вес ротора позволил отказаться от применения шариковых подшипников или часовых камней.

Каждый приемник отдельно не представляет собой конструктивно законченный прибор, а входит составной частью в индикатор, содержащий один или несколько приемников, шкалу и стрелки. Основная схема (рис. 3) варьируется для конкретных задач. Фирма GEC выпускает комбинированные указатели положения шасси и руля высоты с сельсинами на постоянном токе. Кроме того с этими приборами выпускаются индикаторы уровня горючего, давления, температуры.

В настоящее время сельсины на постоянном токе конкурируют с автосинами Pioneer. Возможность питания от бортовой сети, небольшой вес и габарит обеспечили этим приборам широкое распространение, особенно для передач, не требующих большой точности. Там, где требуется высокая точность, преимущества остаются на стороне сельсинов на переменном токе.

Наличие щеточного контакта в датчике сельсина на постоянном токе не позволяет считать эту систему совершенной, так как щеточный контакт вносит элемент ненадежности. Выполнение подобной контактной системы создает целый ряд технологических трудностей, особенно если датчик работает от маломоментного прибора.

Несмотря на стремление американских фирм создать бесконтактные авиационные сельсины, окончательного решения эта задача в американской технике еще не получила и до сих пор самыми распространенными в оборудовании самолетов являются автосины фирмы Pioneer.

Критерий качества аппаратуры. Для оценки и сравнения между собой конструкций индикаторных сельсинов, а также рационального проектирования новой аппаратуры является необходимым установление определенных критериев.

Основным критерием качества аппаратуры должно явиться отношение удельного синхронизирующего момента приемника (синхронизирующий момент на 1° угла рассогласования) к моменту трения в приемнике:

$$A = \frac{M_y}{M_{тр}} \quad (1)$$

Этот коэффициент аналогичен понятию коэффициента добротности в технике электрических измерительных приборов. Чем выше значение коэффициента, тем точнее передача. Коэффициент A определяет принципиально достижимую в данной конструкции точность индикаторной передачи, т. е. точность, которая может быть достигнута при отсутствии так называемой «технологической погрешности» (погрешность от несимметрии фазовых обмоток, несимметрии магнитной цепи и т. п.).

В целях уменьшения веса и размеров сельсина на переменном токе в настоящее время применяются повышенную частоту (300—400 Hz) для питания питающей обмотки возбуждения сельсина. Поведение аппаратуры индикаторной передачи в динамическом режиме определяется быстротой затухания колебаний ротора приемника, которая характеризуется логарифмическим декрементом затухания колебаний.

Конструкция датчика и конструкция приемника индикаторных сельсинов должны быть специально приспособлены к выполнению своих специфических функций в схеме индикаторной передачи. Такая конструкция приемника помимо всех других требований должна обеспечивать получение достаточной величины коэффициента A , малой «технологической погрешности». К датчику же следует предъявлять специфические требования минимальных потерь при передаче мощности от сети приемнику и точного осуществления закона изменения вторичного напряжения в функции угла поворота ротора. Поэтому рациональнее конструкцию датчика и приемника делать различной.

Бесконтактные авиационные сельсины. Приведенные выше соображения легли в основу разработанных авторами авиационных бесконтактных индикаторных сельсинов¹.

В основу конструкции датчика индикаторной передачи положена предложенная А. Г. Иосифьяном и Д. В. Свечарником конструкция бесконтактного сельсина¹.

Датчик предназначен для работы на два приемника. С целью уменьшения потребления мощности зазор в машине выполняется 0,1 мм. Кроме того в расточке тороидов полюс на роторе заканчивается шихтованным кольцом для уменьшения ампервитков на дополнительный зазор.

Конструкция индикаторного бесконтактного приемника, предложенная авторами совместно с проф. А. Г. Иосифьяном, значительно отличается от конструкции датчика.

На рис. 4 показаны пути магнитных потоков в приемнике. Внешним магнитопроводом в этой конструкции бесконтактного сельсина служат воздушный и железные шайбы переднего и заднего щита прибора.

Большой зазор в расточке статора позволил значительно снизить ошибку от зубцовых гармоник потока и несимметрии магнитной цепи. Небольшой вес ротора приемника, выполненного в виде двух легких железных лепестков, обеспечивает небольшое трение в сельсине. К тому же оно значительно снижается благодаря применению открытого в свое время проф. Е. Г. Жуковским эффекта умень-

¹ А. Г. Иосифьян, Д. В. Свечарник. Сельсины. ГЭИ, 1941.

Данные авиационных индикаторных сельсинов различных фирм
(при работе от одного датчика двух приемников)

	Автосины фирмы Pioneer	Сельсины фирмы Askania	Сельсины постоянного тока фирмы GEO	Магнесин фирмы Pioneer	Телегон фирмы „Колман“	Бесконтактные сельсины
массовый вес (1 датчика и 2 приемников), г .	400	630	—	—	345	580
мощность потребляемая, VA	4,5	90,0	—	3,0	9,5	6,5
W	1,0	15,0	2,2	—	3,7	2,8
масса ротора приемника, g	13,0	24,6	0,55	0,75	—	2,7
момент инерции ротора приемника, gcm ²	2,0	5,0	0,028	0,18	—	1,0
максимальный синхронизирующий момент приемника, gcm	5,0	40,0	0,25	0,09	—	0,6
коэффициент добротности	0,35	1,8	0,6	0,5	—	2,0
гармонический декремент затухания колебаний ротора	0,5	0,7	0,35	—	—	0,55
погрешность следования	± 2°	± 1,5°	± 2°	± 2°	—	± 1° — 1,5°
наличие щеточного контакта в датчике .	+	+	+	—	—	—
в приемнике	+	+	—	—	—	—
размеры датчика, мм	D=37	D=33	—	—	D=36	D=45 L=54
приемника, мм	L=35	L=57	D=33 L=30	—	L=36	D=43 L=48

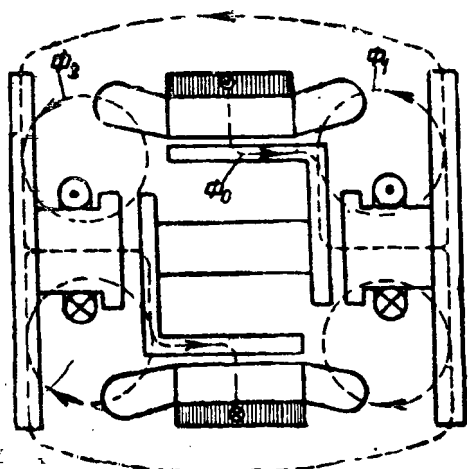


Рис. 4.

Напряжение возбуждения сельсинов составляет 26 В при частоте 400 Гц.

В таблице приведены данные, характеризующие авиационные индикаторные сельсины различных фирм, а также данные по новым авиационным бесконтактным сельсинам. Данные приводятся для случая работы от одного датчика двух приемников.

Из таблицы видно, что разработанные авиационные бесконтактные индикаторные сельсины, незначительно уступая аппаратуре зарубежных систем в общем весе и потребляемой мощности, превосходят последние по коэффициенту добротности. При этом они не имеют контактных колец и щеток как в приемнике, так и в датчике и, следовательно, являются более надежными в работе.

Литература

1. Towell, Faeg. El. Eng., № 6, 1942.
2. Alan Bang. Journal of Aeronautical Science, № 3, 1940.
3. В. И. Бахтин. Авиационные электрические приборы переменного тока. Американская техника и промышленность, № 7, 1943.
4. Robert S. Childs. El. Eng., № 9, 1944.

Применение электронно-лучевых трубок для регулирования и следящего привода

Кандидат техн. наук Б. Е. ТЕЛИШЕВСКИЙ и кандидат техн. наук Д. В. ЗЕРНОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

В статье рассматривается специальная электронно-лучевая трубка для управления сеточными цепями тиратронов. С помощью этой трубки осуществлена схема управления электродвигателями постоянного тока по схеме Леонарда.

Развитие электронно-лучевой трубки на протяжении последних десятилетий позволило превратить ее в весьма совершенное средство для решения различных задач измерительной техники и телевидения. Эти применения не характерны для автоматики; однако некоторое видоизменение применяемых в осциллографии и телевизионных трубках позволяет также поставить вопрос о возможности их использования для решения ряда задач и в области автоматики.

В настоящее время известна разновидность электронно-лучевой трубки в виде безинерционного электронно-лучевого переключателя, в которой чувствительный орган — электронный луч, реагирующий на изменение электрического или магнитного поля, производит включение или выключение тока в присоединенных к этой трубке внешних электрических цепях. Такая трубка по своим свойствам до известной степени подходит под определение понятия реле, этого наиболее специфичного элемента автоматики, и, как всякое реле, может быть использована в схемах автоматического управления.

В литературе имеются сведения о применении электронно-лучевых трубок подобного типа для распределения телевизионных сигналов в системах телевидения с ячеювым экраном [Л. 1]; для преобразования амплитудно-модулированных колебаний в колебания, фаза которых меняется в зависимости от амплитуды [Л. 2]; для осуществления синхронной передачи угла вращения [Л. 3], для телеуправления [Л. 4], телесигнализации [Л. 5], многократной телефонии [Л. 6] и т. п.

Попытки применить электронно-лучевую трубку для управления силовыми механизмами [Л. 7] до сих пор оказывались весьма несовершенными, так как в большинстве случаев эта трубка использовалась как коммутатор для включения и выключения реле.

Современные задачи автоматического регулирования, а также вопросы создания специальных устройств и следящих систем не могут базироваться на таких ограниченных возможностях управления, какие дает принцип «включено — выключено».

Создание современных автоматических устройств и следящих систем требует значительно более гибких средств. Проблему регулирования быстро совершающихся процессов нельзя решить без наличия устройств, позволяющих осуществить регулирование, пропорциональное скорости изменения регулируемого параметра, а иногда и нескладным производным регулируемого параметра одновременно. Поэтому электронно-лучевая трубка, работающая по принципу «включено — выключено»,

не находила себе практического применения в следящих системах и системах автоматического регулирования. Вместе с тем электронно-лучевая трубка может явиться весьма совершенным усилительным элементом в следящей системе и в системе автоматического регулирования благодаря чрезвычайной гибкости управления отклонением электронного луча. Как известно, управление электронным лучом может совершаться с помощью магнитных полей или под влиянием электростатических полей практически без затраты мощности.

Способы создания этих полей могут быть самыми различными, а поэтому оказывается возможным связать управление лучом с такими каналами связи, как радиосвязь, ультразвуковая связь и УКВ, с различными безмоментными датчиками и т. п.

Все сказанное заставляет искать возможностей использования электронно-лучевой трубки для целей автоматического регулирования и создания следящих систем, которые позволили бы сочетать все преимущества электронно-лучевой трубки с возможностью пропорционального усиления входных сигналов.

Ниже описывается метод пропорционального регулирования среднего значения анодного тока тиратронов с помощью специально разработанных электронно-лучевых трубок.

Электронно-лучевые коммутаторы для схем регулирования и следящего привода. Электронно-лучевые трубки, предназначенные для схем управления и следящего привода, были выполнены нами в двух вариантах, отличающихся друг от друга в конструктивном отношении. В обоих вариантах трубка состояла из следующих основных элементов: электронной пушки, одной пары отклоняющих пластин, коллекторного электрода и двух контактных ламелей, установленных в плоскости, перпендикулярной оси электронного луча. Поверхность ламелей активировалась цезием и кислородом и обладала коэффициентом вторичной эмиссии $\gamma > 1$.

Для снижения общей величины напряжения, питающего трубку, при сохранении достаточной силы выходного тока была использована специальная конструкция электронной пушки, в которой оконечная (главная) фокусирующая электронная линза была выполнена в виде унипотенциальной линзы с тормозящим полем вместо обычно применяемой бипотенциальной линзы с ускоряющим полем. Это позволило использовать полное напряжение источника питания для отсасывания электронного тока с катода трубки, чем обеспечивался нужный лучевой ток. Вместе с тем для фокусировки пучка не требовалось дополнительного более высокого напряжения, которое в обычных электронно-

левых трубках в четыре—шесть раз превышает напряжение, действующее на первом аноде и определяющее силу лучевого тока.

Конструктивно первый вариант электронно-лучевых трубок был выполнен в виде, представленном на рис. 1. Электронная пушка здесь состоит

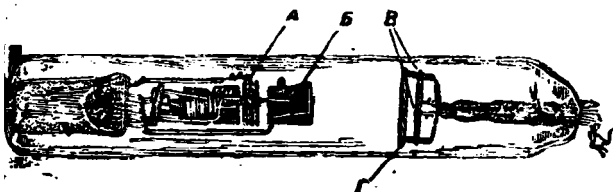


Рис. 1.

из подогревного катода, управляющего электрода первого анода. Далее следует унипотенциальная линза А, состоящая из трех диафрагм. Внешние диафрагмы поддерживаются при потенциале анода, а внутренней сообщается более низкий потенциал, величиной которого и определяется оптическая сила линзы. Потенциал средней диафрагмы подбирается с таким расчетом, чтобы в плоскости контактных ламелей пучок электронов имел минимальное сечение. За унипотенциальной линзой располагаются отклоняющие пластины Б. Две контактные ламели В, впаянные с противоположного конца трубки, спереди закрыты сетчатым электродом Г, выполняющим роль коллектора рассеянных и вторичных электронов, освобождаемых лучом из ламелей и смежных частей трубки. Такая трубка требовала при работе общего напряжения питания порядка 200—300 В.

Другой вариант трубки представлен на рис. 2. Он принципиально ничем не отличается от предыдущего.

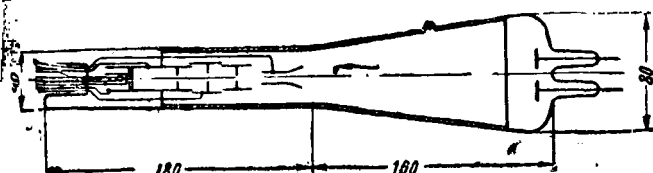


Рис. 2.

дущего и конструктивно в большей степени приближается к обычной электронно-лучевой трубке. Роль коллектора вторичных и рассеянных электронов здесь играет проводящий слой, покрывающий большую часть внутренней поверхности трубки.

В электронной пушке также использована оконечная фокусировка при помощи унипотенциальной линзы с тормозящим полем. Однако дисковые диафрагмы заменены тремя цилиндрами, что обеспечивает лучшую по сравнению с предыдущей трубкой фокусировку электронного пучка вследствие меньшей кривизны эквипотенциальных поверхностей фокусирующего поля. Расстояние от отклоняющих пластин до контактных ламелей здесь значительно увеличено, благодаря чему чувствительность отклонения пучка выше. Металлизация внутренней поверхности колбы и удаление отклоняющих пластин от контактных ламелей потребовалась, главным образом, в целях защиты отклоняющих пластин от попадания на них электронов, которые выбиваются лучом из ламелей, создают значительный ток в цепи отклоняющих пластин и

приводят к непроизводительной потере мощности в этой цепи.

Схема времяимпульсного сеточного управления анодным током тиратронов с помощью электронно-лучевого коммутатора. При разработке схемы сеточного управления анодным током тиратронов с помощью электронно-лучевой трубки за основу был взят метод времяимпульсного управления с применением гашения тиратронов по схеме инвертора. Принципиальная схема этого метода показана на рис. 3.

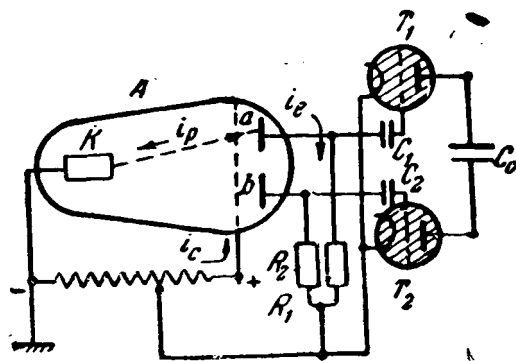


Рис. 3.

Основным элементом устройства является электронно-лучевая трубка А. Электронный луч перемещается периодически электрическим или магнитным полем по ламелям а и б. Поверхность ламелей обладает коэффициентом вторичной эмиссии $\sigma > 1$, поэтому при лучевом токе i_p вторично-электронный ток, освобождаемый лучом из ламели, будет $i_c = \sigma i_p$, а ток через сопротивление R_1 (или R_2 , если луч находится на ламели б) будет:

$$i_e = i_c - i_p = \sigma i_p - i_p = (\sigma - 1) i_p.$$

Периодическое перемещение луча по ламелям вызывает попеременно импульсы тока в сопротивлениях R_1 и R_2 . Импульсы напряжения, возникающие таким образом на этих сопротивлениях, через конденсаторы C_1 и C_2 подаются на сетки тиратронов T_1 и T_2 . Схема соединения анодов тиратронов T_1 и T_2 через емкость C_0 обеспечивает при зажигании одного тиратрона подачу гасящего импульса отрицательного напряжения на анод второго (ранее горевшего) тиратрона. Таким образом, длительность горения каждого из тиратронов T_1 и T_2 в течение одного цикла развертывающего движения луча будет пропорциональна той части цикла, в течение которой луч двигается по соответствующей ламели.

Воздействуя на электронный луч (помимо развертывающего периодического электрического или магнитного поля) постоянным отклоняющим электрическим или магнитным полем, можно смещать ось луча и этим изменять относительное время движения луча по одной и другой ламели и, таким образом, плавно регулировать среднюю силу анодного тока тиратронов.

При исследовании работы этой схемы применялась как одновременная подача развертывающего переменного напряжения и отклоняющего постоянного на отклоняющие пластины трубки, так и раздельное управление лучом путем использования пластин только для постоянного отклонения и раз-

вертки с помощью внешних магнитных катушек. Последний метод дал лучшие результаты.

На рис. 4 приведены полученные таким образом

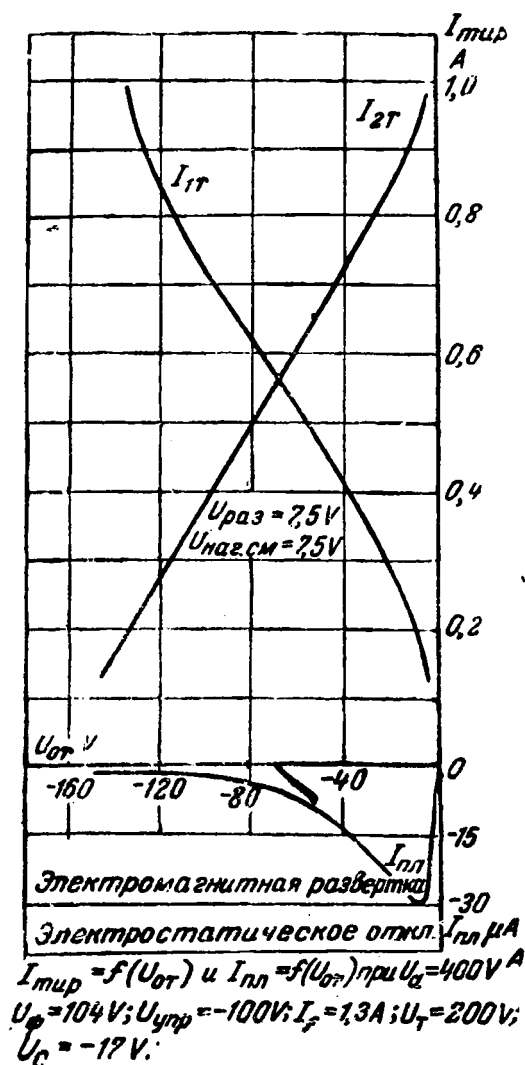


Рис. 4.

характеристики средней силы анодного тока для обоих тиратронов в зависимости от величины отклоняющего напряжения, поданного на отклоняющие пластины трубки при электромагнитной развертке. На этом же графике нанесены наблюдавшиеся во время опыта значения тока в цепи отклоняющих пластин, имеющие относительно малую величину. Кривые, изображенные на рис. 4, показывают, что изменение отклоняющего напряжения приводит к плавному изменению средней силы анодного тока тиратронов, причем в известной области зависимость среднего тока от напряжения можно считать линейной.

Управление скоростью и реверсирование двигателя при помощи электронно-лучевого коммутатора. На рис. 5 показано применение описанной схемы регулирования анодного тока тиратронов для управления возбуждением генератора G_2 , по схеме Леонарда, питающего электродвигатель M_4 . Тиратрон T_2 играет роль рабочего, а тиратрон T_1 гасящего. Изменение смещающего напряжения, подаваемого на отклоняющие катушки 1—2 электронно-лучевого коммутатора, вызывает изменение среднего значения анодного тока $I_{а2}$ тиратрона T_2 . С

сопротивления R_2 снимается изменяющееся по величине от нуля до некоторого максимума падение напряжения, которое подается на обмотку возбуждения генератора G_2 . Для того чтобы ток возбуждения этого генератора мог меняться от $-I_{возб\text{ max}}$ до $+I_{возб\text{ max}}$, в цепь возбуждения включается вольтодобавочная машина G_1 , э. д. с. которой направлена встречно по отношению к падению напряжения на сопротивлении R_2 , созданному анодным током тиратрона. В этом случае напряжение E_2 , даваемое генератором G_2 , будет меняться по величине и по знаку, что позволит регулировать скорость приводного двигателя M_4 и изменять направление его вращения.

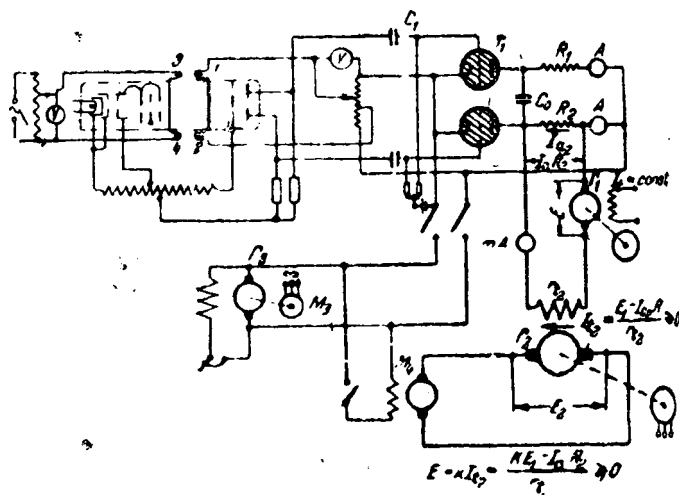


Рис. 5.

Такого рода регулирование скорости вращения двигателя получается весьма плавным и достаточно безинерционным, причем для управления приводом требуется ничтожная мощность.

Заключение. Произведенные исследования работы электронно-лучевых трубок в схемах регулирования показали, что такие трубки вполне пригодны для применения их в данной отрасли техники, и, отличаясь большой гибкостью, должны найти многообразные возможности практического использования.

Трубка позволяет использовать как электромагнитное отклонение и развертку электронного луча (для чего требуется ток порядка 20—40 мА при сопротивлении применявшихся отклоняющих и развертывающих катушек около 250Ω), так и электростатическое воздействие на этот пучок (причем требуются напряжения порядка нескольких десятков вольт при ничтожных токах в управляющей цепи—порядка нескольких микроампер). Независимость электростатического и магнитного воздействия на электронный луч дает возможность применять системы обратного воздействия на него совершенно независимо от цепей управления.

Таким образом электронно-лучевая трубка может служить универсальным чувствительным органом, весьма удобным для применения в схемах дистанционного управления с малыми управляющими мощностями, а также в схемах непосредственного регулирования (например, автоматиче-

до регулирования напряжения генераторов постоянного и переменного тока), измерительных (измерение магнитных полей), системах движущего привода и многих других.

Литература

1. Д. В. Зернов и А. И. Парфентьев. Радио-
ет, № 1, 1939.
2. Communications, т. 19, № 12, 1939.

3. Л. Гончарский. Автоматика и телемеханика, № 1,
1940.
4. Л. Гончарский. Автоматика и телемеханика, № 3,
1936.
5. A. M. Skelleti. Bell System Techn. Journ. v. 23,
April, 1944.
6. С. П. Фрейман. Известия треста слабого тока.
№ 8, 1925.
7. Л. Гончарский. Автоматика и телемеханика, № 6,
1939.

Новая эмалевая изоляция „винифлекс“

Доктор техн. наук К. А. АНДРИАНОВ

Всесоюзный электротехнический институт

В статье излагаются результаты научно-исследовательской работы по синтезу и изучению свойств новой эмалевой электрической изоляции „винифлекс“. Приведены данные испытания опытных электрических машин с винифлексовой изоляцией и указаны преимущества новой изоляции и возможность широкого применения ее в электропромышленности.

Применение медной эмалированной проволоки в электротехнике в свое время обеспечило повышение технического уровня в области производства электротехнической аппаратуры. Попытки использовать эмалированную проволоку для изготовления статорных и роторных обмоток электрических машин не привели к положительным результатам. Трудности, с которыми встретились электромашиностроители, это — малая механическая прочность эмалевой изоляции, которая легко разрушалась при изготовлении обмоток якорей и статоров. Для увеличения механической прочности эмалевого слоя предлагались различные способы. Среди таких способов следует отметить метод введения пигментов в состав лаковой пленки, но, к сожалению, он не разрешил поставленной задачи.

Трудности повышения механической прочности лаковых пленок были вызваны тем, что для производства эмалированной медной проволоки применяются лаки на основе растительных масел. Механическая прочность лаковых пленок масляных лаков относительно невелика; кроме того, наличие двойных связей в составе пленки обуславливает недостаточную стабильность свойств пленки во времени, в особенности при действии тепла. Применение синтетических глифталевых смол и лаков на их основе позволило значительно повысить термическую стабильность эмалированной проволоки, но глифталевые смолы не увеличили механической прочности пленок.

Многочисленные предложения использовать для производства эмалированной проволоки другие синтетические маслорастворимые смолы («альбертолы», продукты конденсации на основе замещенных фенолов и формальдегида, мочевиноформальдегидные, модифицированные глифталем, и т. д. (не нашли широкого промышленного применения из-за отсутствия значительных преимуществ по сравнению с уже применявшимися масляными лаками).

Эмалированная проволока для изготовления статорных и роторных обмоток электрических машин представляла исключительные перспективы по сравнению с проводами ПЭБО и ПЭЛБО, да-

вая возможность при тех же геометрических размерах машин увеличить их мощность, а в некоторых случаях улучшить к. п. д.

Большим достижением американской электротехнической промышленности является получение новой проводниковой изоляции «формекс». Судя по американским данным [Л. 1, 2, 3], провод с изоляцией «формекс» имеет высокие технические показатели и применяется в электромашино- и аппаратостроении без использования хлопчатобумажной и шелковой оплетки. Малые толщины изоляции «формекс» дали возможность уменьшить геометрические размеры электрических машин и аппаратов, повысить надежность их в работе и улучшить другие свойства изоляции. Несмотря на то, что в приводимых данных имеется значительный элемент рекламы, следует, однако, признать, что провода с изоляцией «формекс» значительно лучше проводов с обычной эмалевой изоляцией.

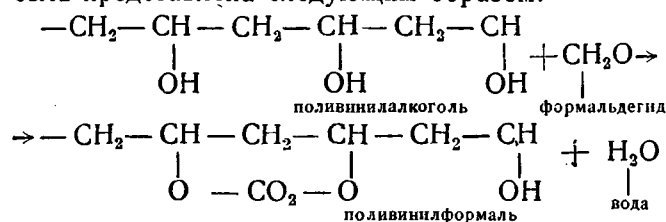
Фирма GEC при описании свойств «формекса» не указывает, на основе каких смол получается «формекс». Однако на основе сопоставления патентных данных можно предполагать, что для этого применяется поливинилформальевая смола [Л. 4]. Имеются указания, что поливинилформаль является хорошей смолой для изоляции электрических проводов [Л. 5]. Отмечаются хорошие электроизолирующие свойства, химическая стабильность и высокая эластичность поливинилформали. Однако из литературных данных остается неясным, какой поливинилформаль применяют для изготовления изоляции «формекс».

Нет возможности пока сказать, применяется ли пластификатор при изготовлении изоляции «формекс» или эластичность пленок определяется альдегидом, взятым в конденсацию. Этот вопрос исключительно важен. Известно, что поливинилацеталевые смолы, к которым относится поливинилформаль, это — класс смол, объединяющих десятки различных веществ, которые могут содержать в своем составе не только нитевидные молекулы, но и молекулы трехмерного строения. Естественно, что с ростом числа связей между нитевидными молеку-

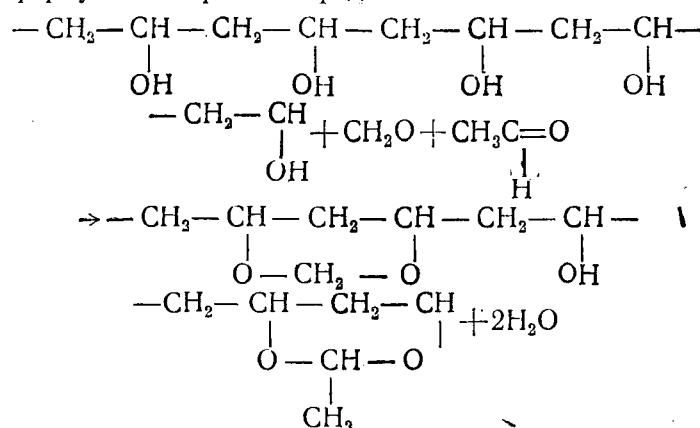
лами увеличивается возможность образования твердых, труднорастворимых полимеров, которые едва ли могут быть использованы без пластификации для получения эластичной изоляции «формекс».

Мы поставили перед собой задачу получить механически прочную эмалевую изоляцию на основе поливинилацетатевых смол. Вначале был получен в результате взаимодействия поливинилового спирта и формальдегида поливинилформаль.

Реакция получения поливинилформалья может быть представлена следующим образом:



Поливинилформаль, как нам удалось установить, трудно получить растворимым в высококипящих растворителях. Применение легкокипящих растворителей связано с большими трудностями получения эмальпровода при существующих станках для эмалирования меди. Поэтому мы пошли по пути получения поливинилформальэтилаля, т. е. продукта, содержащего одновременно формальные и этилальные группы. Одна из многих формул его строения представлена ниже:



Введение в состав поливинилацетатевой смолы наряду с формальными также этилальными группами дало возможность повысить растворимость и эластичность поливинилацетатевой смолы, не снижая ее механических, тепловых и других свойств. Поливинилформальэтилацетатевая смола и названа нами «винифлекс».

При введении уксусного альдегида расстояние между цепями молекул увеличивается из-за большой величины цепей уксусного альдегида по сравнению с формальдегидом. Растворимость поливинилформальэтилаля при одинаковой степени ацеталирования значительно выше и стойкость к действию воды больше, чем у поливинилформалья.

Способность растворяться в растворителях и совместимость поливинилацетатевых смол с высокомолекулярными соединениями и пластификаторами могут быть регулированы в чрезвычайно широких пределах. Эти свойства зависят от величины молекулярного веса поливинилового спирта, количества ацетатных групп, оставшихся в поливинилово-м спирте, применяемом для ацеталирования альдегида, и степени ацеталирования. Все эти

факторы были подвергнуты всестороннему изложению в обсуждаемой работе. Подробно все эти вопросы изложены в специальной брошюре [Л.]. Здесь будут приведены краткие сведения о свойствах пленок и проволоки с винифлексовой изоцией и результаты изготовления опытных машин.

Механические свойства и термостойкость пленок. Испытание механических свойств пленок производилось на эластометре Шоппера, с помощью которого определялось количество двойных перегибов. Угол перегиба — 90°, нагрузка — 100 г. На приборе Шоппера определялись также процент удлинения и разрывное усилие.

Расстояние между зажимами в приборе было 500 мм, ширина пленки — 15 мм и толщина пленки — 0,05 мм. Пленки испытывались в доставленном состоянии и после прогрева при 105° и 150° течение 2, 4, 6, 10 и 12 час.

На рис. 1, 2 и 3 показано изменение механических свойств пленок в процессе прогрева их при

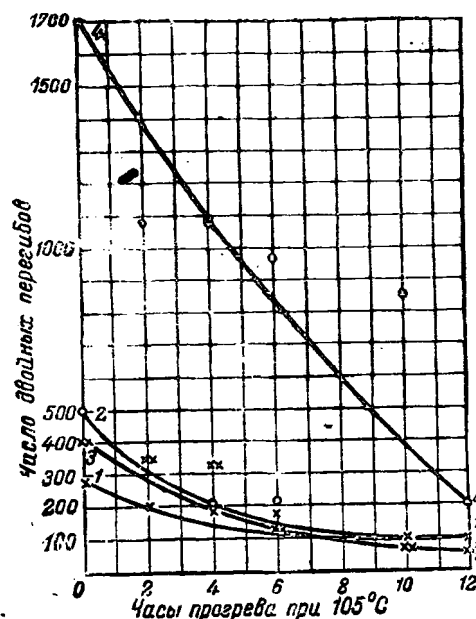


Рис. 1.

1—поливинилацеталь из поливинилового спирта; 2—поливинилформальэтилацеталь; 3—поливинилацеталь из поливинилацетата; 4—поливинилформальэтилацеталь.

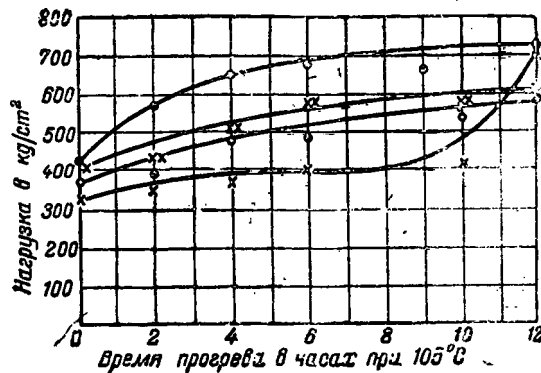


Рис. 2.

1—поливинилацеталь из поливинилацетата; 2—поливинилформальэтилацеталь из поливинилацетата; 3—поливинилацеталь из поливинилового спирта; 4—поливинилформальэтилацеталь из поливинилового спирта.

150° С. Как видно из приводимых данных, поливинилформальэтилацеталь, полученный на основе продуктов гидролиза поливинилацетата, имеет повышен-

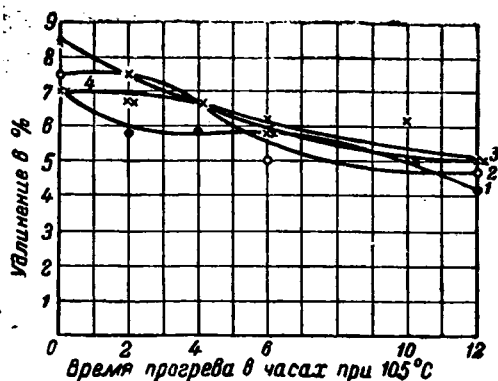


Рис. 3.

1—поливинилацетат из поливинилацетата; 2—поливинилформальацетат из поливинилацетата; 3—поливинилацетат из поливинилового спирта; 4—поливинилформальацетат из поливинилового спирта.

ное число двойных перегибов по сравнению с поливинилацетатами, полученными на основе поливинилового спирта.

Следует указать, что удлинение и разрывная прочность пленок, указанных на рис. 2 и 3, мало отличаются друг от друга. Изменение механических свойств пленок из поливинилацетатевой и из поливинилформальацетатевой смол в зависимости от прогрева при 150°C показано на рис. 4, 5 и 6.

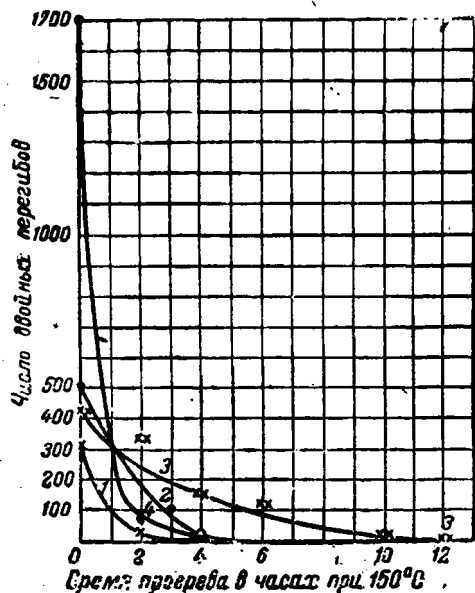


Рис. 4.

1—поливинилацетат из поливинилового спирта; 2—поливинилформальацетат; 3—поливинилацетат из поливинилового спирта; 4—поливинилформальацетат

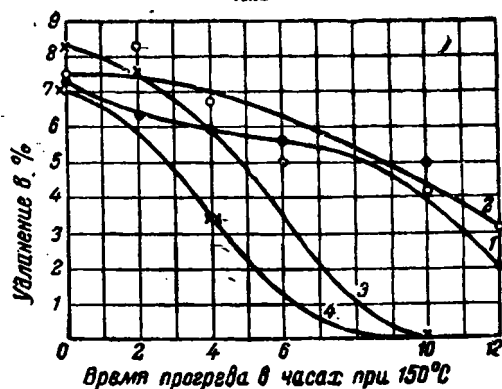


Рис. 5.

1—поливинилацетат из поливинилацетата; 2—поливинилформальацетат из поливинилацетата; 3—поливинилацетат из поливинилового спирта; 4—поливинилформальацетат из поливинилового спирта.



Рис. 6.

1—поливинилацетат из поливинилацетата; 2—поливинилформальацетат из поливинилацетата; 3—поливинилацетат из поливинилового спирта; 4—поливинилформальацетат из поливинилового спирта.

Из рисунков видно, что смолы, полученные ацеталированием чистого поливинилового спирта, дают пленки, которые относительно быстрее подвергаются термическому старению при температуре 150°C, чем смолы, полученные ацеталированием продуктов гидролиза поливинилацетата.

Для выяснения влияния соотношения альдегидов (формальдегида и ацетальдегида) на механические свойства пленок были испытаны смолы, которые изготовлялись ацеталированием продуктов гидролиза поливинилацетата из расчета 1 моль поливинилового спирта и 1,5 моля альдегидов.

При получении поливинилформальацетатов соотношение между формальдегидом и ацетальдегидом варьировалось следующим образом:

Формальдегид	Ацетальдегид
0,750 граммоля	0,750 граммоля
1,000 "	0,500 "
1,250 "	0,250 "
1,125 "	0,375 "
1,250 "	0,250 "

и для сравнения были взяты поливинилформали, полученные ацеталированием продуктов гидролиза поливинилацетата с молекулярным весом 5 000 и 10 000. Результаты испытаний механических свойств пленок указанных смол в доставленном состоянии и в процессе прогрева при температуре 105°C приведены на рис. 7 и 8.

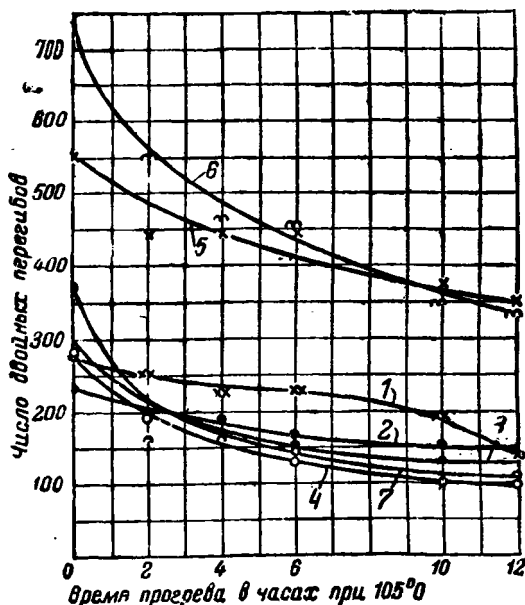


Рис. 7.

1—	параформ 0,75 м,	ацетальдегид 0,75 м
2—	" 1,00 "	" 0,50 "
3—	" 1,25 "	" 0,25 "
4—	" 1,125 "	" 0,375 "
5—	" 1,25 "	" 0,250 "
6—	" 1,5 "	мол. вес 10,000
7—	" 1,5 "	" 5,500

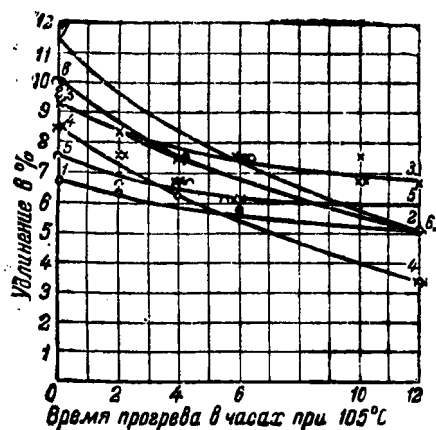


Рис. 8.

1—	параформ 0,75 м.	ацетальдегид 0,75 м
2—	" 1,00 "	" 0,50 "
3—	" 1,25 "	" 0,25 "
4—	" 1,25 "	" 0,375 "
5—	" 1,25 "	" 0,250 "
6—	" 1,50 "	мол. вес 10,000
7—	" 1,50 "	" 5,500 "

Из рис. 7 видно, что по числу двойных перегибов резко выделяются пленки из смол, полученных ацеталированием одним формальдегидом и смесью 1,25 моля формальдегида и 0,25 моля ацетальдегида. Число перегибов после прогрева в течение 12 час. при температуре 105°С у них остается большим.

Удлинение у пленок в доставленном состоянии близко, но в процессе прогрева при температуре 105°С оно уменьшается. Лучше ведут себя пленки из смолы, полученной ацеталированием смесью альдегидов (1,25 моля формальдегида и 0,25 моля ацетальдегида). Пленки из поливинилформала, имеют большое число двойных перегибов, но они резко снижают удлинение в процессе прогрева.

Механическая прочность в процессе прогрева медленнее всего нарастает у пленок из смолы, полученной ацеталированием смесью 1,25 моля формальдегида и 0,25 моля ацетальдегида. Это показывает, что введение в небольших количествах этильных групп в поливинилформаль положительно влияет на эластичность пленок, сохраняя высокие другие показатели механических свойств. Аналогичный характер изменения механических свойств наблюдается также и в процессе прогрева их при температуре 150°С. При этом следует отметить, что прогрев при температуре 150°С в течение 12 час. не вызывает резкого изменения механических свойств пленок по сравнению с прогревом при температуре 105°С.

Механические исследования пленок из поливинилформала, из поливинилацетата и поливинилформальацетата показали, что по совокупности механических свойств лучшими следует признать пленки из поливинилформальацетатевой смолы, полученные ацеталированием смесью альдегидов: формальдегида 1,25 моля и ацетальдегида 0,25 моля.

Водостойкость пленок. Водостойкость и гигроскопичность пленок поливинилацетатевых смол определялись по увеличению веса пленки после 24-часового пребывания в воде или в гидростате. Образцы пленок были взяты размеров 100 мм на 20 мм при толщине пленки 0,025 мм. Привес пленки в % относился к первоначальному весу чистой пленки. Испытанию подвергались пленки после сушки при 80° до постоянного веса и после про-

грева при 105 и 150°С в течение 2, 4, 6 и 12 час. Результаты испытаний пленок из смол, полученных ацеталированием чистого поливинилового спирта и продуктов гидролиза поливинилацетата 1,5 молями ацетальдегида и смесью 0,75 моля формальдегида и 0,75 ацетальдегида, приведен на рис. 9 и 10.

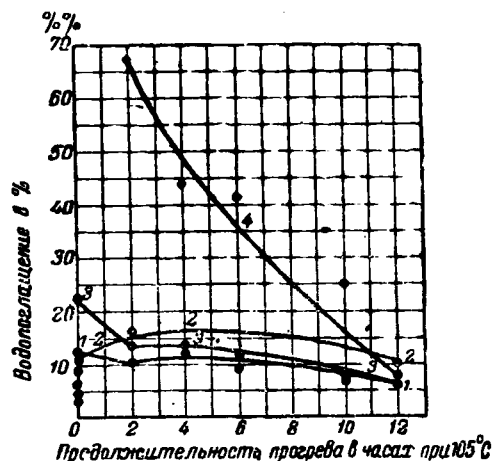


Рис. 9.

1 — поливинилформальацетат из поливинилового спирта; 2 — поливинилформальацетат из поливинилацетата; 3 — поливинилацетат из поливинилового спирта; 4 — поливинилацетат из поливинилацетата.

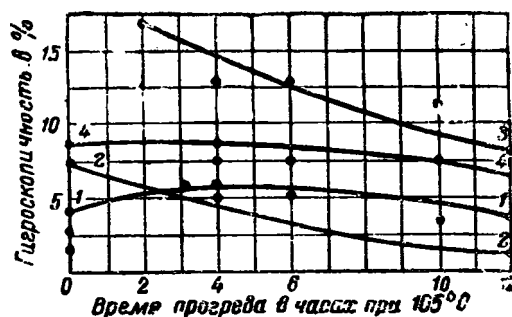


Рис. 10.

1 — поливинилформальацетат из поливинилового спирта; 2 — поливинилформальацетат из поливинилацетата; 3 — поливинилацетат из поливинилового спирта; 4 — поливинилацетат из поливинилацетата.

Из приведенных данных видно, что пленки всех смол в доставленном состоянии имеют большую влагопоглощаемость и гигроскопичность. В процессе прогрева стойкость пленок к действию воды и влаги значительно возрастает; особенно резко скачивается прогрев пленок при температуре 150°С. Резкого различия влаго- и водостойкости у пленок из смол, изготовленных из чистого поливинилового спирта и продуктов гидролиза поливинилацетата, не наблюдается.

Результаты опытных данных по гигроскопичности и влагопоглощаемости смол, полученных ацеталированием продукта гидролиза поливинилацетата смесью из формальдегида и ацетальдегида, приведены на рис. 11 и 12. На рисунках видно, что влагопоглощаемость пленок всех смол резко уменьшается в процессе прогрева; особенно сильное снижение наблюдается после прогрева при 150°С. Стойкость против действия влаги у пленок также возрастает после прогрева.

Электрические свойства пленок поливинилацетатевых смол. Электрические свойства пленок определялись непосредственно после сушки их в термо-

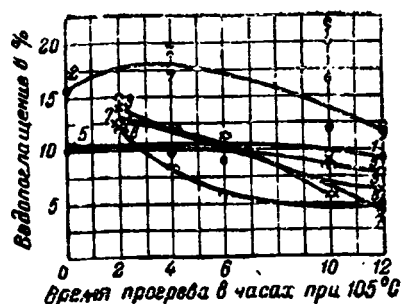


Рис. 11.

1 — параформ 0,75 м, ацетальдегид 0,75 м	
2 — " 1,00 " " 0,50 "	
3 — " 1,125 " " 0,375 "	
4 — " 1,20 " " 0,30 "	
5 — " 1,25 " " 0,25 "	
6 — " 1,50 мол. вес. 10,000	
7 — " 1,50 " " 5,500	

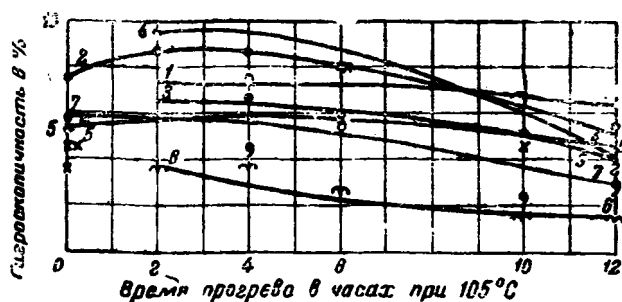


Рис. 12.

1 — параформ 0,75 м, ацетальдегид 0,75 м	
2 — " 1,00 " " 0,50 "	
3 — " 1,125 " " 0,375 "	
4 — " 1,20 " " 0,300 "	
5 — " 1,25 " " 0,25 "	
6 — " 1,50 мол. вес. 10,000	
7 — " 1,50 " " 5,500	

стате при 70° в течение 30 мин. и после действия воды. Электрическая прочность у пленок, кроме того, определялась после действия бензина и трансформаторного масла и при повышенных температурах 105° и 150° С. Результаты опытных данных сведены в табл. 1 и 2. Из таблиц видно, что

Таблица 1

Название смолы	Удельное сопротивление в $\Omega \cdot \text{см}$	
	в доставленном состоянии	после 24 час. пребывания в воде
Поливинилацеталь из поливинилового спирта	$1,0 \cdot 10^{13}$	Большая проводимость
Поливинилацеталь из продукта гидролиза поливинилацетата	$4,4 \cdot 10^{13}$	
Поливинилформаль	$1,1 \cdot 10^{14}$	
Поливинилформальацеталь из продукта гидролиза поливинилацетата (винифлекс)	$3,1 \cdot 10^{18}$	$8,0 \cdot 10^9$
Поливинилформальацеталь из поливинилового спирта (винифлекс)	$3,3 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{10}$

удельное объемное сопротивление пленок в доставленном состоянии — высокое, но после действия воды в течение 24 час. сопротивление снижается на 2—4 порядка. После действия воды также наблюдается относительно резкое снижение электрической прочности. Электрические характеристики пленок после действия на них бензина и трансформаторного масла и при температурах 105° и 150° С — высокие.

Название смолы	В доставленном состоянии	После 24 час. пребывания в воде	Электрическая прочность в kV/mm					
			после пребывания в бензине		после пребывания в трансформаторном масле		при температуре	
			21 ч.	48 ч.	24 ч.	48 ч.	105°	150°
Поливинилацеталь из поливинилового спирта	40,1	10,0	43,2	37,2	36,3	42,0	56,0	33,0
Поливинилацеталь из продукта гидролиза поливинилацетата	42,6	13,5	44,7	61,7	56,7	51,5	40,7	24,0
Поливинилформаль	46,8	4,6	34,9	43,8	46,5	41,2	45,2	29,3
Поливинилформальацеталь из продукта гидролиза поливинилацетата („винифлекс“)	52,3	9,4	39,0	65,6	40,2	34,3	67,0	28,3
Поливинилформальацеталь из поливинилового спирта („винифлекс“)	7,7	14,7	58,2	52,1	51,9	54,1	56,8	43,0

Физико-химические и электрические свойства проводов с изоляцией «винифлекс», изготовленных в Центральной кабельной лаборатории. Для определения физико-химических и электрических свойств проводов с винифлексовой изоляцией были взяты два провода диаметром 0,59 и 1,45 мм, имевшие изоляцию с радиальной толщиной 0,02—0,025 мм. Благодаря гибкости провода «винифлекс» при удлинении на 50% (навертывание на стержень однократного диаметра) трещин не получается. При разрыве проволоки диаметром 0,59 повреждение пленки до разрыва отсутствует. Эмальпроволока марки ПЭЛ имеет удлинение ~ 35% для диаметра 0,59 и ~ 25% для диаметра 1,45. Стойкость к истиранию провода с винифлексовой изоляцией значительно больше, чем у эмалированной проволоки. Для проволоки диаметром 0,59 «винифлекс» прочнее эмалированной в 12 раз, для провода диаметром 1,45 — в 4 раза. Адгезия пленки «винифлекса» к проводу диаметром 0,59 лучше в 1,5 раза и к проводу диаметром 1,45 — в 3 раза, чем у эмалированной проволоки. Термическая стабильность «винифлекса» значительно выше, чем у эмалированной проволоки. Удлинение винифлексовой пленки в состоянии поставки больше 50%, у эмалированной проволоки — около 35%; после прогрева в течение 240 час. при 125° оно снижается до 35%—20% у «винифлекса» и до 16—10% — у эмалированной проволоки. После прогрева при 150° в течение 24 часов эластичность винифлексовой пленки остается равной 35%, а эмалированной ~ 7—10% в зависимости от диаметра проволоки.

Электрические свойства проводов с винифлексовой изоляцией в состоянии поставки после прогрева и действия растворителей приведены в табл. 3.

В табл. 3 приведены результаты измерений электрической прочности пленок на медной проволоке диаметром 0,59 и 1,45 с толщиной пленки 0,04—0,06 мм. Пленки получены помощью обычного эмалирования в эмали печи ЦКЛ. Для этой цели взят поливинилформальацеталь («винифлекс»), полученный из продуктов гидролиза поливинилацетата, ацеталированной смесью 1,25 моля формальдегида и 0,25 моля ацетальдегида на 1 моль винилового спирта.

что двигатели, изготовленные с винифлексовой изоляцией, имели повышенную мощность против номинальной не меньше 20%.

В машинной лаборатории ВЭИ были изготовлены три типа двигателей: 1) двигатель типа Д-3 мощностью 0,65 W; 2) асинхронный двигатель на напряжение 220/380 V мощностью 3,7 kW; 3) крановый двигатель на напряжение 220/380 V мощностью 5,5 kW.

Все двигатели были подвергнуты испытанию не в нормальный режим работы, а также было исследовано поведение изоляции при длительной работе двигателя под нагрузкой при повышенной температуре.

Испытание пленок и провода с винифлексовой изоляцией на термическую стабильность показало, что они обладают по сравнению с эмалевой изоляцией большей теплостойкостью.

Для выяснения влияния поведения винифлексовой изоляции в реальных условиях были созданы для изоляции машин тяжелые тепловые условия испытаний. Они подвергались длительному испытанию при 113—115° или при 120° C. Указанный режим работы продолжался в течение 100 h, после чего изоляция испытывалась относительно корпуса при $U=1,5$ kV в течение 1 min., при витковом $U=1,3$ kV и U_k , равном 500 V, в течение 5 min при холостом ходе. Такому режиму испытаний подвергались все вышеуказанные двигатели.

На основании испытания изоляции на старение можно сделать вывод, что винифлексовая изоляция безусловно обладает достаточной термической стабильностью. По данным машинной лаборатории ВЭИ применение винифлексовой изоляции в машинах дает повышение мощности за счет заполнения паза медью не меньше 20% без изменения геометрии паза. Для кранового двигателя было получено увеличение мощности ~ 35%.

Асинхронный двигатель, изготовленный на заводе «Динамо», также показал увеличение мощности приблизительно на 20%. Значительно большее увеличение мощности и облегчения веса машин можно достичь, если машины рассчитывать специально под винифлексовую изоляцию.

Конструкторы электрических машин могут в своих расчетах толщин винифлексовой изоляции принимать их равными толщинам выпускаемой в настоящее время эмалевой изоляции для всех серий круглой меди.

По существующему ГОСТ 434-41 обмоточные провода с комбинированной эмалевой и шелковой изоляцией (марки ПЭШО и ПЭЛШО) изготавливаются диаметром 0,05—1,45 mm, причем основная масса этих проводов изготавливается в диапазоне 0,05—0,5 mm. Провода с однослойной хлопчатобумажной и эмалевой изоляцией (марки ПЭШО и ПЭЛБО) обычно изготавливаются в диапазоне 0,2—1,81 mm и, наконец, провода с двойной хлопчатобумажной и эмалевой изоляцией, которые применяются исключительно в автотракторной промышленности, изготавливаются в диапазоне 1,00—1,45 mm. При применении обмоточной меди указанных марок коэффициент заполнения паза мал и в этом заключается один из основных недостатков перечисленных марок обмоточной меди. Применение проводов «винифлекс» полностью устраняет этот существенный недостаток.

Характеристика образцов и условия испытаний	Электрическая прочность в kV/mm после действия в течение 24 час.						бакелитового лака
	Без действия реактормасла	трансформаторного масла	бензина	бензола	вода	лака № 19 крезольно-масляного лака	
Проволока с винифлексовой изоляцией без прогрева...	3,8	3,75	3,85	2,89	Большая проводимость при 1000 V	5,55	4,09
После предварительной термической обработки при 150° C в течение 4 час. ...	3,8	3,24	2,54	3,24		4,39	4,1
Проволока с винифлексовой изоляцией без прогрева...	4,1	3,3	2,4	1,75		5,0	5,6
После предварительной термической обработки при 150° C в течение 4 час. ...	4,1	3,6	3,2	2,9		4,2	4,8

¹ Большую проводимость при 1000 V имеет после действия воды и обыкновенная эмальпроводка.

Как видно из приводимых данных, пленки обладают хорошей стойкостью к бензину, трансформаторному маслу, бензолу, лаку № 19 (анилидоформальдегидный лак, растворитель бензол и бензин), крезольно-масляному лаку (растворитель бензол и бензин). Вода и бакелитовый лак, содержащий в своем составе водный спирт и фенол, действуют на пленку, снижая ее механические и электрические свойства.

Диэлектрические потери $\lg \delta$ проводов с винифлексовой изоляцией при частоте 1 600 Hz и температуре 10° C равны 0,0066, эмальпроводами — 0,0095; при 90° C — соответственно 0,0077 и 0,0112. Тангенс угла диэлектрических потерь при радиочастотах у провода с винифлексовой изоляцией при 1 MHz равен 0,0062, при 18 MHz — 0,0062.

Опыты по изготовлению электромашин с винифлексовой изоляцией. Провода сечением в 0,47 0,59, 1,35, 1,45 mm с винифлексовой изоляцией толщиной от 0,03 до 0,06 mm, изготовленной на опытной установке ЦКЛ, были переданы в один из научно-исследовательских институтов, в машинную лабораторию ВЭИ и на завод «Динамо» им. Кирова для изготовления опытных машин. Провода без дополнительной оплетки шелком и хлопчатобумажными нитями были использованы для изготовления опытных машин.

Опытные машины были изготовлены без учета геометрии паза машин. Для опытов были взяты машины, обмотки которых выполняются в настоящее время из проводах ПЭШО или ПБО. В этих машинах пазовая изоляция оставалась без изменения, а вместо указанных проводов были применены провода с винифлексовой изоляцией. В силу того что винифлексовая изоляция имеет очень незначительную толщину по сравнению с изоляцией ПЭШО и ПБО, это дало возможность, не увеличивая плотности заполнения паза, повысить коэффициент заполнения паза медью.

В научно-исследовательском институте были изготовлены трехфазные короткозамкнутые асинхронные двигатели типа Д-3 мощностью 0,65 W в количестве 10 шт. Испытание этих двигателей показало,

Изоляция «винифлекс» обладает значительно меньшим удельным тепловым сопротивлением, чем шелк и хлопчатобумажная пряжа. Удельное тепловое сопротивление хлопчатобумажной пряжи составляет 1 700, натурального шелка — 2 200 тепловых омсантиметров. Мы пока не располагаем достаточно проверенными данными о тепловом удельном сопротивлении «винифлекса», но оно во много раз меньше теплового сопротивления пряжи и шелка, а в этом — большое преимущество «винифлекса».

Интересно сравнить примерную стоимость обмоточных проводов с комбинированной и с одной лишь эмалевой изоляцией. Достаточно сказать, что провода марки ПЭЛШО диаметром 0,05 mm более чем в семь раз дороже эмалированной проволоки марки ПЭЛ.

В эмалированных проводах вес меди составляет 95,3—99,16% (для диапазона 0,05—2,02 mm).

Таким образом на долю эмалевой изоляции приходится всего 4,68—0,84%. Если же для сравнения взять провода марки ПЭЛШО, то в них вес меди составляет 59,08—95,06% (для диапазона 0,05—0,72 mm). Остальное падает, главным образом, на шелковую изоляцию. Удельный вес хлопчатобумажной изоляции в марках ПЭЛБО, ПЭБО и ПЭЛБД еще выше. Таким образом, если даже при организации производства проводов «винифлекс» стоимость последних будет даже значительно выше эмалированных нормальных проводов, совершенно очевидно, что и в этом случае от внедрения их получится большой экономический эффект.

Одним из основных недостатков существующего производства эмалированных проводов является

сравнительно очень узкий диапазон выпускаемой круглой эмалированной проволоки, причем прямоугольные эмалированные провода до последнего времени вообще не изготавливались.

Одной из причин отсутствия в производстве прямоугольных эмалированных проводов является образование трещин и просветов на углах прямоугольной меди. Нужно полагать, что эмалевая изоляция «винифлекс», обладающая такими прекрасными механическими свойствами, а также новый способ наложения эмали на провод позволяют организовать производство прямоугольных обмоточных проводов, что сулит новые и широкие перспективы для нашего электромашиностроения.

Наконец, переоборудование и постройка новых станков для производства новых эмалированных проводов дадут возможность организовать производство эмалированной проволоки более крупных размеров, в которой нуждается «электропромышленность»¹.

Литература

1. J. J. Curtin. GSK, № 5, p. 285, 1942.
2. P. P. Nilson and J. A. Weh. GSK, № 11, p. 613, 1942.
3. J. A. Weh. Win and Wire Products, № 9, 1941.
4. Porhade, Tegum and Weh. El. Eng., № 3, 1939.
5. Modern Plast., № 1, 1940; № 1, 1940.
6. К. Андрианов, С. Минц, П. Муляр, К. Забырина, В. Привезенцев и Л. Юкина. Новая изоляция «винифлекс» (печатается Госэнергоиздатом).

¹ В настоящей работе кроме автора статьи принимали участие сотрудники ЦНИЛИЗ ВЭИ—П. Муляр, К. Забырина, Л. Юкина, сотрудник Центральной кабельной лаборатории С. Минц, сотрудник кабельного завода В. Привезенцев.

Новые пути в методике профилактических испытаний изоляции

М. И. РАПОПОРТ

ОРГРЭС

Статья освещает новый метод испытания изоляции—снятие абсорбционных кривых, дает оценку возможностей и намечает основные контуры методики.

Общезвестные недостатки испытания изоляции повышенным напряжением привели в последние годы к усиленным поискам так называемых неразрушающих методов, позволяющих испытывать изоляцию без применения высоких напряжений.

Строго говоря, измерения угла диэлектрических потерь, тока утечки на выпрямленном напряжении и распределения напряжения могли бы решить задачу, если бы эти испытания в состоянии были обнаружить все встречающиеся в изоляции дефекты. Однако даже комплексное применение всех этих методов позволяет решить задачу лишь частично, вследствие чего возникает необходимость разработки новых методов испытания.

Одним из них является метод изучения абсорбционных кривых, оживленно обсуждающийся и под-

вергающийся уже в течение ряда лет экспериментальной проверке в Америке.

Электромагнитный спектр изолятора. Угол диэлектрических потерь, представляющий собой меру поглощения материалом энергии, и диэлектрическая постоянная изменяются в зависимости от частоты приложенного поля примерно так, как это показано по Murphy and Morgan [Л. 1] для идеального диэлектрика на рис. 1, где охвачен диапазон частот от долей периода до частот световых колебаний включительно.

При частотах, соответствующих видимой части спектра, диэлектрическая постоянная имеет наименьшее значение, обусловленное единственно возможным при столь высоких частотах видом поляризации — электронной поляризацией, представляю-

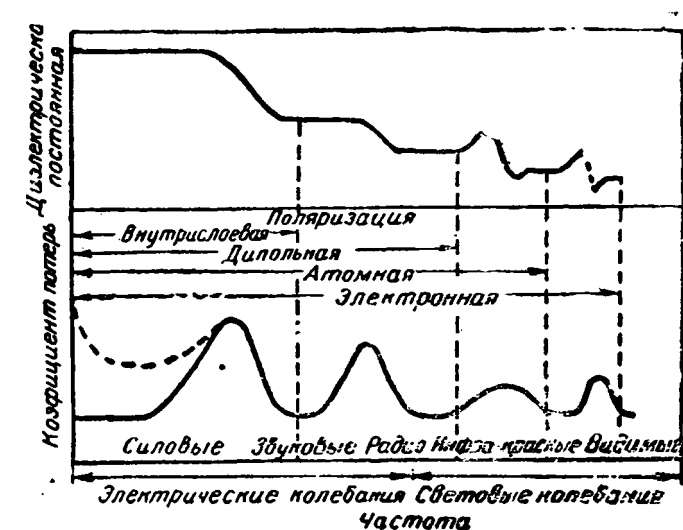


Рис. 1. Зависимость диэлектрической постоянной и потерь от частоты по Murphy и Morgan (пунктирная кривая учитывает влияние сквозной проводимости).

щей собой смещение орбиты электрона по отношению к положительному ядру атома, производимое силами электрического поля.

При более низких частотах, соответствующих инфракрасной части спектра, одного полупериода оказывается достаточно для того, чтобы вызвать полное или по крайней мере ощутимое смещение атомов в молекуле. Таким образом, электронная поляризация при этих частотах дополняется атомной, что вызывает увеличение диэлектрической постоянной.

Дальнейшее увеличение диэлектрической постоянной наблюдается в области высоких или средних радиочастот и происходит за счет дипольной поляризации, обусловленной поворотом в электрическом поле молекул, обладающих смещенными по отношению друг к другу зарядами (дипольные молекулы).

Наконец, последний подъем кривой диэлектрической постоянной происходит в области технических или еще более низких частот и объясняется так называемой внутрислойной (interfacial) поляризацией, представляющей накопление объемного заряда у поверхностей раздела слоев диэлектрика, обладающих неодинаковой проводимостью. Наличие подобной неоднородности в технических диэлектриках совершенно неизбежно и является скорее нормой, чем исключением.

Потери в диэлектрике обусловлены трением, возникающим при переориентации или перемещении частиц. Тангенс угла диэлектрических потерь или, как его называют американцы, коэффициент мощности ($\operatorname{tg} \delta \approx \cos \varepsilon$) пропорционален потерям в диэлектрике за один период. Если частота приложенного поля настолько низка, что переориентация частиц (электронов, атомов, молекул), соответствующих данному виду поляризации, происходит за ничтожную долю полупериода, а затем на протяжении всей остальной части его вплоть до изменения polarity, т. е. до следующего полупериода, частицы остаются в покое, — потери, если их относить ко всему периоду, ничтожно малы и, следовательно, мал и $\operatorname{tg} \delta$.

По мере роста частоты абсолютная величина потерь в диэлектрике остается неизменной, но $\operatorname{tg} \delta$

растет. Этот рост происходит вплоть до частоты f_m , называемой частотой релаксации и связанно уравнением

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \quad (1)$$

с так называемым «временем релаксации» — представляющим собой время, необходимое для завершения переориентации большей части участвующих в поляризации зарядов. При этой частоте переориентация происходит в течение всего полу периода и $\operatorname{tg} \delta$ достигает максимума. Дальнейшее увеличение частоты приводит к тому, что в течение полупериода переориентация зарядов (и соответствующих им частиц) не успевает завершиться и $\operatorname{tg} \delta$ снижается за счет уменьшения абсолютной величины потерь.

Таким образом каждому виду поляризации соответствует свой пик частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ как это и показано на рис. 1. Эти пики поглощения энергии так же характерны для материала, как и линии поглощения световой части спектра, и следовательно, могут быть использованы для суждения о состоянии диэлектрика.

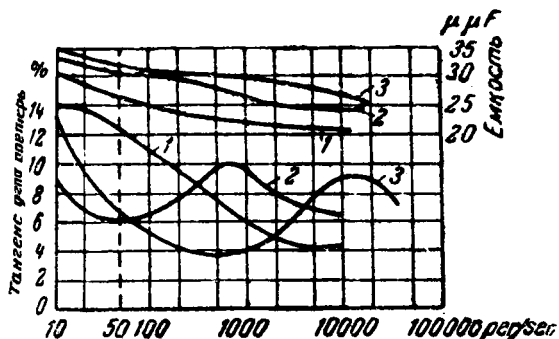
Абсорбционные кривые. Острые максимумы частотной зависимости угла диэлектрических потерь свойственны лишь изоляторам, обладающим во всех своих частях одинаковым временем релаксации. Диэлектрики составные, т. е. имеющие в своем составе различные материалы, из которых каждый обладает своим временем релаксации, дают расщепленный на несколько отдельных пиков или при близких временах релаксации расширенный максимум. Наблюдающиеся в эксплуатации дефекты, в частности: проникновение влаги, загрязнение, разложение изоляции под влиянием ионизации, дают аналогичный эффект.

Исходя из этого, Field [Л. 2], выступивший в 1941 г. с большой работой, посвященной анализу разобранных выше свойств диэлектриков, предлагает использовать для эксплуатационной оценки состояния изоляции показатели, предложенные K. S. Cole и R. H. Cole [Л. 3], а именно:

- 1) емкость диэлектрика при высокой частоте C_∞ , характеризующую электронную поляризацию;
- 2) разность $C_0 - C_\infty$, где C_0 — емкость, измеренная на постоянном токе и характеризующая величину максимума диэлектрических потерь;
- 3) частота релаксации f_m ;
- 4) коэффициент α , представляющий собой меру расширения максимума частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$.

Недостаточность одной лишь величины $\operatorname{tg} \delta$ измеренной при частоте 50 периодов, характеризуется приводимыми Field [Л. 2] кривыми зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от частоты (рис. 2) для фарфорового многообочного изолятора 66 kV, совершенно сухого (кривая 1), после 5½ час. пребывания в воде (кривая 2) и после четырех суток увлажнения (кривая 3). Как видно из этих кривых, в противоположность обычным представлениям увлажнение приводит к резкому снижению угла диэлектрических потерь, измеренного при 50 периодах, и может быть обнаружено лишь по значительному смещению максимума.

Таким образом правильная оценка состояния изоляции требует снятия зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от частоты.



Ж. 2. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ и емкости от частоты для многооблочного фарфорового изолятора.
1 — сухой изолятор; 2 — после увлажнения в течение $5\frac{1}{2}$ ч; 3 — после увлажнения в течение 1 суток.

Основываясь на работах А. Ниппел [Л. 4], раз-
вившего в последних трудах свою теорию пробоя
вердых и жидких диэлектриков ударом электро-
нов, Field [Л. 2] считает, что наибольшее значение
для суждения о состоянии диэлектрика играет по-
ляризация, зависящая от наличия свободных элек-
тронов в диэлектрике, их подвижности, характера
распределения в диэлектрике, различных включе-
ний, и ограничивает диапазон частот, для которых
должна определяться зависимость $\operatorname{tg} \delta$, с одной сто-
роны, долями периода, с другой, — несколькими ки-
лоциклами.

Трудности, связанные с измерением зависимо-
сти диэлектрических потерь от частоты, побуждают
в качестве более простого метода использовать для
получения такой зависимости снятие так называе-
мых абсорбционных кривых.

Как известно, ток, протекающий через диэлек-
трик, при приложении к последнему постоянного
напряжения постепенно снижается. Аналогично по-
сле снятия напряжения с диэлектрика, в случае
если его электроды между собой электрически
соединены, во внешней цепи возникает изменяю-
щийся во времени ток, обусловленный так называе-
мой э. д. с. высоковольтной поляризации. Зависи-
мость тока от времени (при заряде или разряде)
носит название абсорбционной кривой.

Всякое изменение приложенного к диэлектрику
напряжения является поводом к возникновению та-
кого тока. Если к диэлектрику приложено непре-
рывно изменяющееся (переменное) напряжение,
токи, соответствующие элементарным изменениям
напряжения, будут складываться между собой и
определят ток, текущий через диэлектрик. Полу-
чив экспериментально кривую абсорбции, можно
установить расчетным путем (аналитически или
графически) величину тока и угол δ для любой
частоты. Подобные подсчеты производились и про-
верялись неоднократно Benedict [Л. 5] в 1930 г.,
Whitehead and Banos [Л. 6] в 1932 г., Field [Л. 2] в
1941 г. и дали удовлетворительные результаты.

Таким образом, достаточно приложить к диэлек-
трику постоянное напряжение и снять зависимость
тока утечки от времени, чтобы далее расчетным пу-
тем определить величину $\operatorname{tg} \delta$ и полной емкости C
объекта при разных частотах и получить данные,
позволяющие оценить состояние изоляции значи-
тельно полнее, чем это можно сделать по величине
 $\operatorname{tg} \delta$, измеренной лишь при одной частоте.

Непосредственная оценка. Предлагаемые Field
[Л. 2] подсчеты, однако, чересчур громоздки, чтобы

ими можно было воспользоваться при массовых
профилактических испытаниях. Внимательное рас-
смотрение этого вопроса, а также изучение накоп-
ленного опыта, правда, далеко недостаточного, по-
зволяет прийти к выводу о возможности непосред-
ственной оценки состояния изоляции по абсорбци-
онным кривым.

Действительно, экспериментально полученный в
зависимости от времени ток утечки может быть
разделен на две составляющие: 1) не изменяю-
щийся по времени сквозной омический ток I_0 ;
2) постепенно уменьшающийся ток, обусловленный
поляризационными явлениями, — ток абсорбции I_a .
Положим, что зависимость абсорбционной состав-
ляющей тока от времени выражается прямой в по-
лулогарифмической сетке, т. е. подчиняется урав-
нению:

$$i_0 = i_0 e^{-at}, \quad (2)$$

где i_0 — начальное значение абсорбционного тока;
тогда, если ввести обозначение

$$\beta = \frac{i_0}{UC_\infty}, \quad (3)$$

можно согласно Whitehead and Banos [Л. 6] для
величины полной емкости объекта написать:

$$C_0 = C_\infty \left(1 + \frac{\omega\beta}{\omega^2 + \alpha^2} \right), \quad (4)$$

а величину тангенса угла диэлектрических потерь
определить как

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega\beta}{\omega^2 + \alpha^2 + \alpha\beta}. \quad (5)$$

Наибольшего значения $\operatorname{tg} \delta$ достигает при $\omega =$
 $= \sqrt{\alpha^2 + \alpha\beta}$; оно равно $\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\beta}{2\omega}$. (6)

Таким образом увеличение крутизны абсорбци-
онной кривой влечет за собой смещение максимума
поглощения в сторону более высоких частот (увел-
ичение частоты релаксации f_m); увеличение же
начального значения абсорбционного тока β вы-
зывает помимо увеличения f_m также и увеличение
абсолютной величины $\operatorname{tg} \delta_m$. Значение $\operatorname{tg} \delta$ при любой
частоте, не равной f_m , определяется в основном
значением β и несколько снижается при увеличе-
нии крутизны σ .

Если зависимость тока от времени, нанесенная
на полулогарифмическую сетку, отличается от пря-
мой, то она всегда может быть представлена как
сумма ряда функций вида $i_n = \beta_n e^{-a_n t}$. Каждая из
этих функций имеет максимум при своем значении
 ω_n . Чем больше отличается эта зависимость от
прямой, тем более расплывчат пик поглощения.
Этим пользуются для подсчета величины $\operatorname{tg} \delta$ и ем-
кости по абсорбционным кривым. Представляя
кривую в виде ряда составляющих, определяют для
каждой из них величину $\operatorname{tg} \delta$ и C_0 по формулам (4)
и (5) и суммируют затем значения, полученные
для отдельных составляющих. Таким образом для
непосредственной оценки состояния изоляции по
абсорбционным кривым могут быть применены
следующие характеристики: 1. Величина сквозного
тока I_0 , определяемая как установившееся значе-
ние тока утечки. 2. Начальное значение абсорбци-
онной составляющей тока утечки. Однако, так как
эта величина может быть определена лишь путем
экстраполяции по кривой к моменту времени

$t = 0$, а такая экстраполяция связана со значительной погрешностью, удобнее характеризовать величину абсорбционной составляющей по ее значению для какого-либо определенного момента $t = 0$, заведомо достаточного для производства первого замера. Для этой цели удобнее всего пользоваться пятнадцатисекундным значением абсорбционного тока. 3. Крутизна спада абсорбционного тока, которая может быть охарактеризована отношением пятнадцатисекундного значения абсорбционной составляющей к ее одно- или двухминутному значению (одноминутное значение следует применять лишь тогда, когда ток утечки устанавливается ранее, чем через две минуты). 4. Форма зависимости абсорбционной составляющей от времени, для чего эта зависимость представляется в виде кривой на полулогарифмической сетке ($\log i$ и t), причем производится оценка степени отличия этой кривой от прямой. Количественные показатели для такой оценки, вероятно, не потребуются.

В качестве примера на рис. 3 приведена снятая Высоковольтной лабораторией Орггрэс зависимость

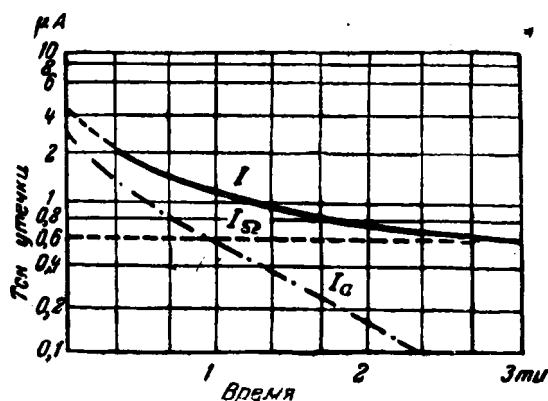


Рис. 3. Зависимость утечки от времени для трансформатора ТМ-360/6.

I — полный ток утечки; I_{Ω} — составляющая сквозной проводимости; I_{α} — абсорбционная составляющая.

тока утечки трансформатора ТМ-360/6 и его абсорбционной составляющей от времени. Для этой кривой

$$I_{\Omega} = 0,6 \text{ мкА}; i_{15} = 1,6 \text{ мкА}; \frac{i_{15}}{i_{120}} = \frac{1,6}{0,18} = 8,9.$$

Характеристики, полученные из абсорбционных кривых, соответствуют частотам порядка 0,02 периода в секунду и ниже, т. е. очень далеким от рабочей частоты. Это, однако, не может в какой-либо мере снизить, как полагают некоторые, ценность метода, так как в данном случае речь идет лишь о способе обнаружения дефекта, а не с какой-либо приближении к рабочим условиям.

Возможности метода. Практическое использование для суждения о состоянии изоляции зависимости тока абсорбции от времени началось задолго до того, как этот метод получил теоретическое обоснование. Davis и Leftwich [Л. 7], Wisemant [Л. 8], комитет AIEE [Л. 9] и комитет ETJ [Л. 10] в период 1932—1941 гг. опубликовали ряд материалов об испытании изоляции по зависимости тока утечки от времени. В Советском Союзе исследование абсорбционных кривых до последнего времени почти не производилось. Первые опыты в этой области относятся лишь к 1941—1942 гг., когда лабораториями Кемеровэнерго, Мосэнерго, Ленэнерго и

Орггрэс сняты были единичные кривые для генераторов, трансформаторов и кабелей.

Обширность материалов (главным образом з граничных) не в силах компенсировать их одностронность, так как большинство работ направлено лишь к выяснению влияния увлажнения на характер изменения сопротивления изоляции по времени. Но, указывая вполне определенно на увеличение крутизны повышения сопротивления изоляции с временем по мере подсушки ее, эти данные устанавливают, за счет какой из составляющих происходит такое изменение. Между тем, обработка опубликованных данных с этой точки зрения позволяет сделать весьма любопытный вывод: том, что абсорбционная составляющая тока утечки под влиянием подсушки остается почти неизменной, а сквозной ток резко снижается.

Иную картину рисуют приводимые комитетом AIEE [Л. 9] данные об изменении абсорбционных характеристик генератора в течение первых лет его работы, указывающие на весьма значительное изменение абсорбционной составляющей (увеличение по мере подсушки) при малых временах и высоких температурах, — порядка 60—70° С. Является ли это признаком более глубоких изменений в состоянии изоляции данной машины, работавшей со значительной нагрузкой, или представляет результат особого характера подсушки (удаление летучих), трудно установить определенно без дальнейшего экспериментального обследования.

Считая, что серьезным изменениям структуры изоляции должно соответствовать значительное изменение абсорбционной составляющей, можно было бы попытаться обнаружить таким образом электрическое старение изоляции, тепловой износ ее и тому подобные дефекты.

Особый интерес при выяснении эффективности этого метода представляет чувствительность его к местным дефектам, так как другие, не повреждающие изоляцию, методы испытания реагируют на них очень слабо; дефекты же этого рода в эксплуатации чрезвычайно распространены.

Комитет AIEE [Л. 9], а также комиссия по профилактике кабелей ETJ [Л. 10] приводят данные, показывающие, что местные дефекты в виде предварительного пробоя изоляции кабелей и секций обмоток генераторов вызывают появление сильно выраженной зависимости сопротивления изоляции от напряжения (снижение по мере роста напряжения).

К сожалению, указанные данные касаются лишь единичных случаев и не позволяют установить, как меняется с напряжением абсорбционная составляющая. Окончательное выяснение вопроса требует дополнительного экспериментирования в этой области.

Выводы. 1. Исследование утечек на выпрямленном напряжении, если оно ведется с учетом изменения тока утечки по времени, с разделением на составляющие, с обследованием влияния на них величины приложенного напряжения, а в надлежащих случаях и температуры, может явиться весьма ценным методом профилактики изоляции. Уже сейчас этот метод позволяет:

а) по крутизне нарастания сопротивления изоляции в зависимости от длительности приложения напряжения однозначно определять увлажнение;

б) путем сравнения измеренной на промышленной частоте величины $\operatorname{tg} \delta$ с данными измерения абсорбционного тока выявить причины повышения $\operatorname{tg} \delta$, выявляя, таким образом, случаи электрического старения;

в) по изменению сопротивления изоляции в зависимости от величины приложенного напряжения обнаруживать наличие, по крайней мере, некоторых местных дефектов.

2. Этот метод, главным образом, может найти применение при профилактических испытаниях вращающихся машин, статических конденсаторов и кабелей, где токи утечки сравнительно велики и след их достаточно длителен.

Применение этого метода к трансформаторам вполне возможно, но требует использования приборов высокой чувствительности (порядка $0,1 \mu A$ на одно деление шкалы) и затруднено быстрым затуханием абсорбционной составляющей.

Использование метода абсорбционных кривых для объектов малой емкости (вводы, проходные изоляторы и т. п.) вряд ли целесообразно, так как требует сложной записывающей аппаратуры (абсорбционная составляющая затухает в течение нескольких секунд).

3. Освоение метода оценки изоляции по ее электромагнитному спектру и полное выяснение возможностей его требуют проведения широких опытных работ, направленных к изучению влияния различных дефектов и внешних факторов на абсорбционные характеристики и к выяснению методики измерения токов абсорбции.

4. В методику измерения сопротивления изоляции мегомметром должны быть внесены уточнения,

учитывающие изменение величины сопротивления изоляции в зависимости от длительности приложения напряжения.

Весьма желателен, в частности, переход от ручных (индукторных) мегомметров к мегомметрам, обеспечивающим постоянство приложенного напряжения (мегомметры с моторным приводом, катодные меггеры и т. п.) и доведение верхнего предела измеряемых величин сопротивления изоляции до $10\,000\, M\Omega$.

Литература

1. E. I. Murphy and S. O. Morgan. The Dielectric Properties of Insulating Materials. Bell System Technical Journ., v. 16, № 4, 1937.
2. R. F. Field. The Basis of Nondestructive Testing of Insulation. El. Eng., v. 60, № 9, 1941.
3. K. S. Cole and R. H. Cole. Discharge and Absorption in Dielectrics. Journ. of Chem. Phys., v. 9, p. 341—351, 1941.
4. A. Hippel. Electric Breakdown of solid and Liquid Insulators. Journ. of Applied Phys., v. 8, № 12, 1937.
5. Benedikt. Behavior of Dielectrics. Journ. AIEE, 1930.
6. J. B. Whitehead and A. Banos. Predetermination of the A.-C. Characteristics of Dielectrics. Journ. AIEE, Transactions, v. 51, p. 392—409, 1932.
7. E. R. Davis and M. F. Leftwich. Progress Report of D.-C. Testing of Generators in the Field. El. Eng., vol. 61, № 1, 1942.
8. B. W. Wieseman. Insulation Resistance of Armature Winding. Journ. AIEE, Transactions, v. 53, June, 1934.
9. Field. Testing of Generator Insulation. El. Eng., v. 60, № 12, 1941 и Edison Electr. Ins. Bull., № 1, 1942.
10. Predetermination of Power Cable Faults. ETJ Electrotechnical Journ., v. 3, № 2, 1939.
11. Г. Н. Лысаковский и М. Г. Соловьев. Заме-ры сопротивления изоляции статоров генераторов. Электрические станции, № 4, 1944.

Расчет электромагнитного поля при наличии железа

Кандидат техн. наук, доц. Г. С. АРОНЗОН

Московский институт инженеров связи

Работа посвящена некоторым мало выясненным в существующей литературе вопросам расчета магнитного поля произвольной системы токов, окруженных железом. Метод иллюстрируется конкретным примером.

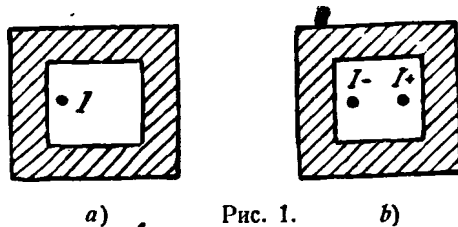
Расчет магнитного поля системы токов, алгебраическая сумма которых отлична от нуля, окруженных замкнутым магнитопроводом, осложняется тем, что поверхность железа не может быть принята эквипотенциальной, даже при бесконечно большой магнитной проницаемости железа. На основании закона полного тока

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 4\pi \Sigma I \quad (1)$$

тангенциальная составляющая магнитного поля на границе железа не может равняться всюду нулю. Этот случай (рис. 1а) значительно более сложный, чем рассматриваемый обычно в литературе (рис. 1б), когда силовые линии входят перпендикулярно в железо, имеет как принципиальное, так и практическое значение.

Ниже для подобного случая излагается общий метод расчета.

Во второй части изложенный здесь метод расчета будет применен к некоторым конкретным проблемам из области электрических машин.



а) Рис. 1. б)

На границе двух сред с магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 имеем

$$H_{t1} = H_{t2}, \quad (2)$$

$$\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2}, \quad (3)$$

где H_{t1} и H_{t2} — тангенциальные, а H_{n1} и H_{n2} — нормальные составляющие вектора напряженности маг-

нитного поля в обеих средах. Пусть μ_2 — бесконечно велико. Так как магнитная индукция в воздухе (среда 1) конечна, то из (3) следует, что при $\mu_2 = \infty$ H_{n2} должно равняться нулю, т. е. для магнитного поля в железе граница его является силовой линией.

Нас интересует поле в воздухе. Однако для этого поля мы пока не знаем граничных условий, что делает невозможным его непосредственное определение. Определим поэтому сначала поле вектора H в железе.

Пусть поле создается одним током I (рис. 1а). Это поле удовлетворяет следующим условиям: 1) граница — силовая линия; 2) в бесконечности — особая точка логарифмического типа, так как там находится обратный ток. Этими условиями поле вектора H в железе однозначно определяется и может быть найдено методом электрических изображений или методом конформных отображений — в зависимости от вида контура. Определив поле в железе и пользуясь уравнением (2), найдем граничное значение тангенциальной составляющей в воздухе и, таким образом, будем иметь достаточное число данных для расчета этого поля.

Из вышеизложенного следует, что магнитное поле в железе зависит только от формы контура и не зависит от того, в каком месте канала помещен ток. Поэтому, если внутри канала находится и обратный ток $-I$ (рис. 1б), то тангенциальные составляющие напряженности поля на границе, создаваемые токами $+I$ и $-I$, взаимно уничтожаются, т. е. в этом случае $H_t = 0$ — поверхность железа действительно эквипотенциальна. Это же будет иметь место в случае незамкнутой железной поверхности, когда оба тока — прямой и обратный — находятся

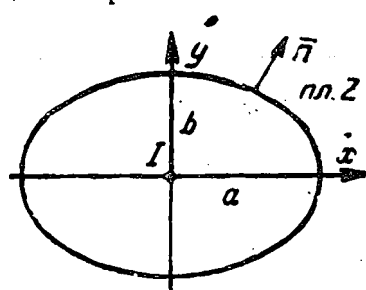


Рис. 2.

В качестве примера на применение предлагаемого метода, в котором сравнительно легко провести расчет, рассмотрим канал эллиптического сечения с полуосями a и b ; ток I пусть находится в центре (рис. 2).

Функция

$$z = k \left(t + \frac{1}{t} \right) \quad (4)$$

конформно отображает внешность круга некоторого радиуса R (рис. 3а) на внешность данного эллипса; k и R подлежат определению.

Пусть

$$z = x + jy; t = \rho e^{j\Theta}. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (4), найдем:

$$x = k \left(\rho + \frac{1}{\rho} \right) \cos \Theta; y = k \left(\rho - \frac{1}{\rho} \right) \sin \Theta. \quad (6)$$

Для точки $(a; 0)$ имеем $\Theta = 0$; $\rho = R$. Для точки $(0; b)$ имеем $\Theta = \frac{\pi}{2}$; $\rho = R$. Следовательно, получим

$$k \left(R + \frac{1}{R} \right) = a; k \left(R - \frac{1}{R} \right) = b. \text{ Отсюда находим:}$$

$$R = \frac{a+b}{c} > 1; k = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{2} = \frac{c}{2}, \quad (7)$$

$$\text{где } c^2 = a^2 - b^2.$$

Применив еще инверсию $w = \frac{R}{t}$, получим функцию

$$w = \frac{2Rk}{z + \sqrt{z^2 - 4k^2}}, \quad (8)$$

конформно отображающую внешность эллипса на внутренность единичного круга плоскости w (рис. 3б), причем бесконечно удаленная точка ($z = \infty$)

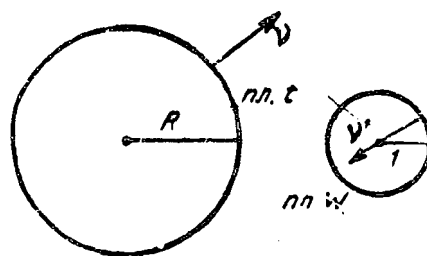


Рис. 3а.

Рис. 3б.

где находится обратный ток $-I$, перейдет в начало координат ($w = 0$). В плоскости w будем иметь ток I , расположенный в центре круга $|w| = 1$, граница которого — силовая линия. Следовательно функция потока для поля в железе будет равна

$$\psi_{\text{желе}} = 2I \ln |w| + \text{const} = -2I \ln |t| + \text{const}. \quad (9)$$

Тангенциальная составляющая напряженности поля

$$H_t = \frac{\partial \psi_{\text{желе}}}{\partial n}, \quad (10)$$

где n — внешняя нормаль к эллипсу.

Пользуясь соотношением между производными при конформном отображении, получим:

$$H_t = \frac{\partial \psi_{\text{желе}}}{\partial v'} \cdot \frac{dw}{dz}, \quad (11)$$

где v' — внутренняя нормаль к окружности в плоскости w .

Имеем:

$$\frac{\partial \psi_{\text{желе}}}{\partial v'} = - \frac{\partial \psi_{\text{желе}}}{\partial r} \Big|_{r=1} = 2I \frac{\partial \ln r}{\partial r} \Big|_{r=1} = 2I;$$

$$\left| \frac{dw}{dz} \right| = \left| \frac{dw}{dt} \right| \cdot \left| \frac{dz}{dt} \right| = \frac{R}{k t^2 \left(1 - \frac{1}{t^2} \right)} \Big|_{\rho=R}$$

$$= \frac{1}{kR \left(1 - \frac{1}{R^2} e^{-2j\Theta} \right)} \Big|_{\rho=R} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2 \cos 2\Theta}{R^2} + \frac{1}{R^4}}}$$

Следовательно,

$$H_t = \frac{2I}{kR \sqrt{1 - \frac{2}{R^2} \cos 2\Theta + \frac{1}{R^4}}}. \quad (12)$$

Теперь перейдем к определению поля в воздушном канале. Пусть ψ — функция потока для этой области:

$$\psi = -2I \ln \sqrt{x^2 + y^2} + u, \quad (13)$$

где первое слагаемое определяет поле тока в однородной среде; u — подлежащая определению гармоническая во всем эллипсе функция, учитывающая влияние ферромагнитной среды.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial \psi}{\partial n} + I \frac{\partial \ln (x^2 + y^2)}{\partial n}, \quad (14)$$

где $\frac{\partial \psi}{\partial n} = H_t$ определяется по формуле (12).

$$\frac{\partial}{\partial n} \ln(x^2 + y^2) = \frac{\partial}{\partial x} \ln(x^2 + y^2) \cos(n; x) + \frac{\partial}{\partial y} \ln(x^2 + y^2) \cos(n; y).$$

Пользуясь уравнением эллипса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, получим:

$$\operatorname{tg}(n; x) = -\frac{1}{y} \frac{a^2 y}{b^2 x} = -\frac{1}{y} \frac{a^2 y}{b^2 x}. \text{ Следовательно, } \cos(n; x) = \frac{b^2 x}{\sqrt{a^4 y^2 + b^4 x^2}}.$$

Подставляя в (14), после упрощений получим:

$$\frac{du}{dn} = -\frac{2I}{kR \sqrt{1 - \frac{2}{R^2} \cos 2\theta + \frac{1}{R^4}}} + \frac{2Ia^2 b^2}{(x^2 + y^2) \sqrt{a^4 y^2 + b^4 x^2}}. \quad (15)$$

Таким образом для искомого функции u найдем граничное значение ее нормальной производной. Для определения u вновь применим метод конформных отображений. Функция, отображающая внутренность эллипса на круг, весьма сложна, она выражается громоздким образом через эллиптические функции. Чтобы значительно упростить расчеты, разрежем эллипс вдоль отрезка, соединяющего его фокусы. Функция (4), как легко проверить, пользуясь уравнениями (6), конформно отображает кольцо, заключенное между окружностями $|t|=1$ и $|t|=R$ (рис. 4) на внутренность разрезанного указанным способом эллипса, причем окружность $|t|=1$ отображается на эллипс, вырожденный в двойной отрезок, соединяющий фокусы данного эллипса (рис. 5).

Комплексный потенциал $\chi = u + jv$, где v функция, сопряженная с u , будет аналитической функцией в кольце, заключенном между окружностями $\rho=R$ и $\rho=1$.

Следовательно, χ разлагается в степенной ряд

$$\chi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n t^n. \quad (16)$$

Полагая $t = \rho e^{j\theta}$; $c_n = a_n + jb_n$, получим:

$$\chi = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (a_n + jb_n) \rho^n e^{jn\theta}. \quad (17)$$

Отделяя действительную и мнимую части, найдем:

$$\left. \begin{aligned} u &= a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \rho^n + a_{-n} \rho^{-n}) \cos n\theta - \\ &\quad - \sum_{n=1}^{+\infty} (b_n \rho^n - b_{-n} \rho^{-n}) \sin n\theta; \\ v &= b_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} (b_n \rho^n + b_{-n} \rho^{-n}) \cos n\theta + \\ &\quad + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \rho^n - a_{-n} \rho^{-n}) \sin n\theta. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Произведенный разрез эллипса налагает дополнительные условия, согласно которым каждая из функций u и v должна принимать равные значения при неограниченном приближении к двойному отрезку сверху и снизу. Это будет выполнено, если

$$u(1; \theta) = u(1; -\theta); v(1; \theta) = v(1; -\theta). \quad (19)$$

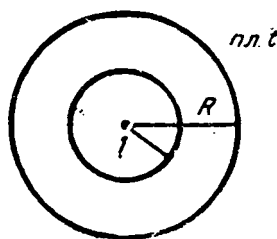


Рис. 4.

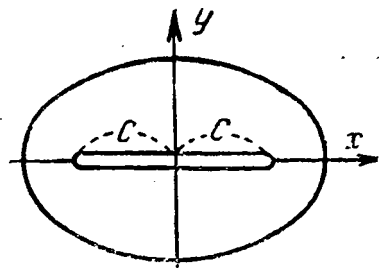


Рис. 5.

Подставляя условия (18) в (16) и (17), получим:

$$a_n = a_{-n}; b_n = b_{-n}.$$

Следовательно,

$$u = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \left[(a_n + \rho^{-n}) \cos n\theta + b_n (\rho^n - \rho^{-n}) \sin n\theta \right]. \quad (20)$$

Граничное условие на окружности $\rho=R$ получим, преобразовав (15), введя переменную t :

$$\begin{aligned} \frac{du}{d\rho} &= \frac{du}{dn} \left| \frac{dn}{d\rho} \right| = -\frac{2I}{R} + \frac{2Ia^2 b^2 \sqrt{1 - \frac{2}{R^2} \cos 2\theta + \frac{1}{R^4}}}{(x^2 + y^2) \sqrt{a^4 y^2 + b^4 x^2}} = \\ &= -\frac{2I}{R} + I \frac{bc}{a^3} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{2}{R^2} \cos 2\theta + \frac{1}{R^4}}}{(1 - e^2 \sin^2 \theta) \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta}}. \end{aligned} \quad (21)$$

где $e = \frac{c}{a}$.

Из выражения (21) имеем при $\rho=R$:

$$\frac{du}{d\rho} = \frac{du}{d\rho} \Big|_{\rho=R} = \sum_{n=1}^{+\infty} \left[na_n (R^{n-1} - R^{-n-1}) \cos n\theta - nb_n (R^{n-1} + R^{-n-1}) \sin n\theta \right]. \quad (22)$$

Из условия (21) следует, что $\frac{du}{d\rho}$ — четная функция, содержащая только косинусы четного порядка, так как $\frac{\partial}{\partial \rho} u(\theta) = \frac{\partial}{\partial \rho} u(\pi - \theta)$.

Разлагаем (21) в ряд Фурье:

$$\frac{du}{d\rho} = \alpha_0 + \alpha_2 \cos 2\theta + \alpha_4 \cos 4\theta + \dots \quad (23)$$

Здесь $\alpha_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{du}{d\rho} d\theta = 0$, что следует из того, что u — гармоническая функция, не имеющая источников внутри эллипса:

$$\alpha_k = \frac{4Ibc}{\pi a^3} \int_0^{\pi/2} \frac{\sqrt{1 - \frac{2}{R^2} \cos 2\theta + \frac{1}{R^4}} \cos k\theta d\theta}{(1 - e^2 \sin^2 \theta) \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta}}; \quad (24)$$

$$k=2; 4; 6, \dots$$

Последний интеграл не выражается в конечном виде через элементарные функции. При заданных числовых значениях a и b его легко можно вычислить, пользуясь приближенными формулами для определенных интегралов.

Сравнивая (22) и (23), получим:

$$b_1 = b_2 = b_3 = \dots = 0;$$

$$a_{2p-1} = 0; a_{2p} = \frac{a_{2p}}{2p(R^{2p-1} - R^{-2p-1})}; p=1; 2; 3 \dots \quad (25)$$

Подставляя в (16) и (13), получим окончательное выражение для функции потока:

$$\psi = -2/\pi \sqrt{x^2 + y^2} + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{a_p (p^{2p} + p^{-2p})}{k(R^{2p-1} - R^{-2p-1})} \cos 2p\theta + \text{const.} \quad (26)$$

Был произведен числовой расчет для $a=2, b=1$. Интеграл (24) вычислялся по формуле Симпсона. Ограничиваясь первыми четырьмя членами ряда,

можно получить (вычисления производились при помощи логарифмической линейки)

$$\psi = -1/\pi \ln(x^2 + y^2) + 1/[-0,254(p^2 + p^{-2}) \cos 2\theta + 0,0124(p^4 + p^{-4}) \cos 4\theta - 0,000951(p^6 + p^{-6}) \cos 6\theta + 0,0006(p^8 + p^{-8}) \cos 8\theta]. \quad (27)$$

Как видим, коэффициенты ряда убывают весьма быстро. Поэтому даже в самом неблагоприятном случае, когда исследуемая точка поля лежит на границе и $p=R = \frac{a+b}{c} = \sqrt{3}$, ряд будет хорошо сходиться.

Импульсные характеристики линейной изоляции

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГОРЕВ и кандидат техн. наук Б. М. РЯБОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В статье сообщаются опытные данные об импульсных разрядных напряжениях стандартного стержневого разрядника, промежутка: стержень—заземленная плоскость и промежутка: провод—заземленная плоскость, при расстояниях между электродами, достигавших 4,5 м. Найденные зависимости сравниваются с аналогичными усредненными кривыми американских лабораторий.

При проектировании грозоупорных систем важно иметь возможность оценить для определенного разрядного расстояния не только значение разрядного напряжения промышленной частоты, но по меньшей мере также 50%-ное разрядное напряжение или, как его часто называют, критическое разрядное напряжение [Л. 1] при импульсах напряжения определенной формы и притом обеих полярностей.

Результаты испытаний, полученные в различных лабораториях для типичных электродов «стержень—заземленный стержень» и «стержень—заземленная плоскость», были тщательно изучены, усреднены и представлены в виде кривых и таблицы. Р. Jacottet и W. Weidker [Л. 2]. Эти кривые, построенные, главным образом, по результатам измерений, обработанным EEL—NEMA [Л. 3], охватывают критические разрядные напряжения указанных типичных электродов только до расстояний в 2,4 м и до напряжений в 1 630 kV.

Мощный генератор импульсов напряжений [Л. 4] Ленинградского политехнического института (ЛПИ) им. Калинина позволил значительно расширить результаты импульсных испытаний.

Первым образцом для испытаний в лаборатории ЛПИ служил стандартный стержневой разрядник с профилем стержней 12×12 мм.

Вторым объектом испытаний было устройство «стержень—заземленная плоскость». Плоскость представляла собой площадку хорошо притертого бетонированного пола размером 9×15 м, оклеенную станиолом в несколько слоев. Над площадкой подвешивался стержень, снятый с описанного выше стержневого разрядника. Наименьшее расстояние от края площадки до стен зала равнялось примерно 11 м.

Наконец, для третьего испытуемого образца «провод—заземленная плоскость» была взята та

же площадка размерами 9×15 м и были использованы провод АС диаметром 17 мм и медный провод диаметром 3 мм; длина обоих проводов равнялась 6,4 м. Концы испытуемого провода во избежание краевых разрядов изгибались по окружности с помощью двух деревянных полудисков диаметром 800 мм.

Осциллографирование напряжения производилось с помощью «короткого» емкостного делителя напряжений. Электродом высокого напряжения служил диск Роговского диаметром 3,5 м.

Делитель был удален от генератора импульсов напряжения на расстояние 25 м и от испытуемого образца на расстояние 12 м. Градуировка делителя и измерение напряжения производились с помощью шарового разрядника с диаметром шаров 2,5 м. Градуировочная кривая шарового разрядника была получена путем экстраполяции экспериментальных данных различных авторов для разрядных напряжений шаровых разрядников с диаметром шаров от 6,25 см до 200 см.

Обработка осциллограмм производилась по методу, принятому ГОСТ.

Процедура измерения критического (50%) разрядного напряжения на образце состояла в следующем. Амплитуда волны импульсного генератора подгонялась до такого значения, что вызывала разряд при 50% общего числа приложенных к образцу импульсов. Снимались 3—4 осциллограммы разряда на образце. При этом параллельно образцу был подключен шаровой разрядник с установленным между шарами расстоянием, при котором разряд между шарами не возникал. Затем шары сближались до такого расстояния, что между ними возникал разряд при 50% общего числа приложенных импульсов. Такого рода измерение возможно потому, что разряд на образце, как правило, происходит на хвосте волны, а разряд между шарами—

амплитудном значении, т. е. разряд образцу происходит с запаздыванием, вследствие чего одновременные разряды измерительном шаровом разряднике и испытуемом объекте невозможны. Были осциллограммы разряда на шарах. Из этих осциллограмм определялся коэффициент деления. По градуировочной кривой определялось разрядное напряжение на шарах для данного расстояния между шарами. Это разрядное напряжение принималось за критическое разрядное напряжение образца, которое тем приводилось к условиям нормальной влажности. Определенное таким образом критическое разрядное напряжение контролировалось затем по осциллограммам разряда на образце и на шарах. Расхождение в значениях критического разрядного напряжения, полученных с помощью шарового разрядника, не превышало, как показывают осциллограммы, 2%. За нормальную влажность была принята абсолютная влажность 11 г/м³. Поправки на влажность определялись по кривой для критических разрядных напряжений положительной полярности. С целью сравнения результатов для критических разрядных напряжений отрицательной полярности процентная поправка на влажность бралась равной не 0,80 от поправки для положительной полярности, как этого требуют рекомендации МЭК, а 0,85, как принято в работе Р. Jacottet и W. Weicker.

На рис. 1 приведены кривые критических разрядных напряжений для стандартного стержневого разрядника, полученные в лаборатории ЛПИ, и кривые, приведенные Р. Jacottet и W. Weicker. При рассмотрении этих кривых видно, что для отрицательной полярности кривая, полученная в лаборатории ЛПИ, во всем интервале в точности совпадает с усредненной кривой Р. Jacottet и W. Weicker и ход кривой ЛПИ продолжает оставаться прямолинейным до расстояния между электродами в 3,0 м. Начиная с расстояния в 3,0 м, ход кривой ЛПИ отклоняется от прямолинейного в сторону меньших значений разрядных напряжений.

При рассмотрении кривых для критического разрядного напряжения в случае положительной полярности видно, что во всем интервале ход кривых совершенно одинаков и расхождение не превышает 8%, что Р. Jacottet и W. Weicker считают допустимым при сравнении результатов наблюдений различных лабораторий. Прямолинейный ход кривой ЛПИ продолжается до расстояния в 3,5 м между электродами. Начиная с 3,5 м, ход кривой ЛПИ отклоняется от прямолинейного также в сторону меньших значений разрядных напряжений.

О значениях разрядных напряжений между электродами «стержень — заземленная плоскость» в литературе имеются еще более скудные сведения и в действительности приведенные Р. Jacottet и W. Weicker данные являются повторением данных Р. L. Bellaschi и W. L. Teague [Л. 5]. Отсут-

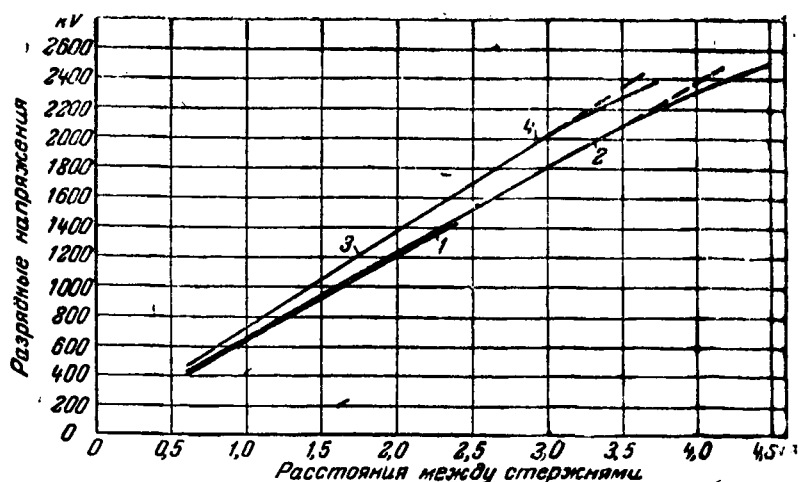


Рис. 1. Критическое (50%) разрядное напряжение стержневого разрядника. Волна 1,5/40 мкс.

1—по Jacottet и Weicker (+); 2—лаборатория ЛПИ (+); 3—по Jacottet и Weicker (—); 4—лаборатория ЛПИ (—); В=760 мм Hg; t=20°C; абсолютная влажность — 11 г/м³.

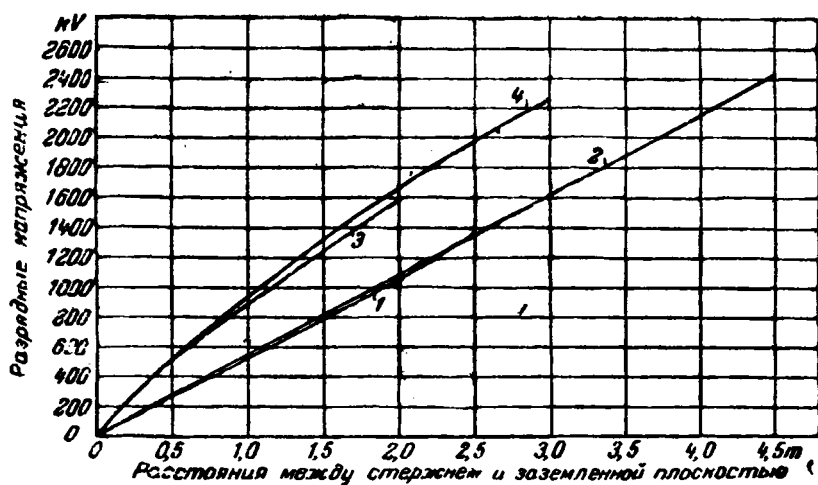


Рис. 2.

1—по Jacottet и Weicker (+); 2—лаборатория ЛПИ (+); 3—по Jacottet и Weicker (—); 4—лаборатория ЛПИ (—).

Критическое (50%) разрядное напряжение между стержнем и плоскостью. Волна 1,5/40 мкс; В=760 мм Hg; t=20°C; абсолютная влажность — 11 г/м³.

ствие достаточного количества экспериментальных данных и менее регулярный характер разряда между электродами «стержень — заземленная плоскость» являются причиной того, что Р. Jacottet и W. Weicker рекомендуют при применении предложенных ими критических разрядных напряжений для электродов «стержень — заземленная плоскость» допускать расхождения при промышленных испытаниях более чем $\pm 8\%$.

На рис. 2 приведены кривые критических разрядных напряжений для электродов «стержень — заземленная плоскость», полученные в лаборатории ЛПИ, и усредненные кривые Р. Jacottet и W. Weicker. При рассмотрении кривых для отрицательной полярности видно, что ход кривых имеет один и тот же характер, а расхождение не превышает 5%. Полученная в лаборатории ЛПИ кривая имеет во всем интервале отчетливо выраженный выпуклый характер. Такой же характер имеет и кривая усредненных значений. Кривая лаборатории ЛПИ расширяет пределы экспериментальных данных в 1,5 раза. Кривые положительной полярности можно считать практически совпадающими во всем интервале. При этом полученная в лаборатории ЛПИ кривая сохраняет прямолинейный

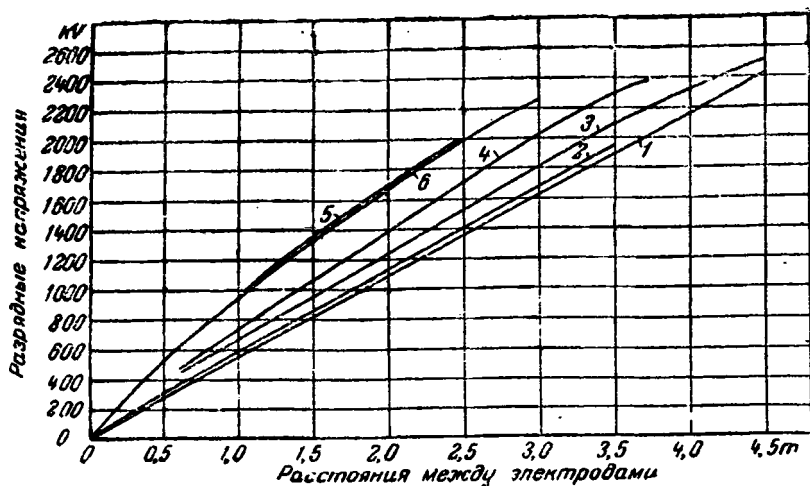


Рис. 3. Критическое (50%) разрядное напряжение между типичными электродами. Нормальные атмосферные условия:
 $B=760$ mm Hg; $t=20^{\circ}\text{C}$; абсолютная влажность — 11 g m^{-3} ;
 1—стержень—плоскость (+); 2—провод—плоскость (+); 3—стержень—стержень (+); 4—стержень—стержень (—); 5—провод—плоскость (—); 6—стержень—плоскость (—). Волна $1,5,40 \text{ мкс}$.

характер на всем протяжении и расширяет пределы экспериментальных данных более чем в два раза.

Экспериментальные данные относительно критических разрядных напряжений между электродами «провод—заземленная плоскость» в лите-

Критические разрядные напряжения в зависимости от расстояния между электродами для волны $\pm 1,5/40 \text{ мкс}$ и атмосферных условий

$B=750$ mm Hg; $t=20^{\circ}\text{C}$; влажность 11 g m^{-3}

Расстояние между электродами в см	Стандартный стержневой разрядник		Стержень—заземленная плоскость		Провод—заземленная плоскость	
	+	—	+	—	+	—
25	187	217	—	—	—	—
50	338	395	265	500	—	—
75	—	—	—	—	—	—
100	662	720	539	945	570	912
125	803	883	673	1 140	705	1 140
150	945	1 045	807	1 305	841	1 328
175	1 030	1 205	941	1 502	976	1 515
200	1 230	1 370	1 075	1 670	1 112	1 682
225	1 370	1 530	1 209	1 830	1 247	1 845
250	1 515	1 695	1 343	1 980	1 383	2 000
275	1 655	1 855	1 477	2 125	1 518	—
300	1 800	2 020	1 611	2 260	1 654	—
325	1 940	2 155	1 745	—	1 789	—
350	2 080	2 285	1 879	—	1 925	—
375	2 210	2 400	2 013	—	—	—
400	2 320	—	2 147	—	—	—
425	2 425	—	2 281	—	—	—
450	2 512	—	2 415	—	—	—

ратуре совершенно отсутствуют; поэтому кривые критических разрядных напряжений между электродами «провод—заземленная плоскость», полученные в лаборатории ЛПИ, можно сравнивать только с аналогичными кривыми для электродов «стержень—заземленная плоскость» и для стандартного стержневого разрядника. На рис. 3 приведены все указанные выше кривые; при этом для электродов «провод—заземленная плоскость» применялся медный провод диаметром 3 mm. Кривая критических разрядных напряжений электродов «провод—заземленная плоскость» для отрицательной полярности практически совпадает с аналогичной кривой для электродов «стержень—заземленная плоскость»; кривая же для положительной полярности имеет прямолинейный характер и проходит несколько выше чем, аналогичная кривая для электродов «стержень—заземленная плоскость».

Расхождение между кривыми не превышает погрешности измерений. Кривые критических разрядных напряжений стандартного стержневого разрядника проходят между аналогичными кривыми для положительной и отрицательной полярности для электродов «стержень—заземленная плоскость».

С целью выяснения влияния диаметра провода на значение критического разрядного напряжения в лаборатории ЛПИ были получены две кривые критического разрядного напряжения в зависимости от расстояния для провода АС диаметром 17 mm и медного провода диаметром 3 mm; в обоих случаях длина провода была одной и той же, а именно—6 400 mm. Экспериментальные точки, полученные как для провода диаметром 17 mm, так и для провода диаметром 3 mm, в точности совпадают. Таким образом, можно сделать заключение, что для критического разрядного импульсного напряжения диаметр провода в рассматриваемом интервале изменения его не оказывает влияния на величину разрядного напряжения. Результаты полученных в лаборатории ЛПИ измерений сведены в таблицу.

Литература

1. El. Eng., v. 59, Trans., p. 598, 1940.
2. P. Jacottet und W. Weicker. ETZ, № 25, p. 565, 1940.
3. El. Eng., v. 56, p. 712, 1937.
4. А. А. Горев и Б. М. Рябов. Электричество, № 5, 1941.
5. P. L. Bellaschi and W. L. Tague. El. Eng., v. 53, p. 1638, 1934.

Универсальный прибор переменного тока

Доктор техн. наук, проф. А. Е. КАПЛЯНСКИЙ

Ленинградский институт железнодорожного транспорта

В электроизмерительной лаборатории Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта разработан, испытан и изготовлен универсальный прибор переменного тока, который позволяет непосредственно—прямым отсчетом—измерять напряжение, ток и мощность. В этом приборе переход от измерения напряжения к измерению тока или мощности осуществляется простым поворотом рукоятки, без изменения схемы включения прибора в сеть.

Идея устройства очень проста: к обычному электродинамическому или индукционному ваттметру (рис. 1а) добавляется маломощный трансформатор T и переключатель (не показанный на рис. 1). При использовании прибора в качестве ваттметра его внутренняя схема не претерпевает никаких изменений.

При использовании прибора в качестве вольтметра (рис. 1 б) последовательная обмотка оказывается отключенной от зажимов и подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора T ; обмотка высшего напряжения трансформатора подключается параллельно к параллельной обмотке прибора. В то же время переключатель соединяет накоротко токовые зажимы прибора так, что ток в цепи нагрузки не прерывается.

При использовании прибора в качестве амперметра (рис. 1с) параллельная обмотка прибора отключается от зажимов прибора и питается от обмотки высшего напряжения трансформатора T ; обмотка низшего напряжения трансформатора включена с последовательной обмоткой прибора и обтекается током исследуемой цепи.

Рассмотрим работу в схемах измерения напряжения и тока электродинамического ваттметра, формула для угла отклонения которого, как известно, имеет вид:

$$\alpha = k I_1 I_2 \cos \psi \sin (\beta - \alpha),$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов последовательной и параллельной обмоток, ψ — фазный сдвиг между этими токами, β — начальный угол между осями обмоток, k — постоянная.

В схеме вольтметра (рис. 1 б) последовательная обмотка прибора питается через трансформатор, в схеме амперметра через трансформатор питается параллельная обмотка. Сопротивление вторичных цепей неизменно; тогда ток вторичной цепи в схеме вольтметра

пропорционален измеряемому напряжению и ему же пропорционален ток параллельной обмотки; в схеме амперметра ток вторичной цепи пропорционален измеряемому току. При этом, как видно из приведенной формулы, в правой части оказывается квадрат измеряемого напряжения или тока. Как известно, шкала этих приборов может быть улучшена — приближена к линейной — надлежащим выбором начального угла β между осями катушек.

Величина и фаза вторичного тока трансформатора зависят от частоты; следовательно, вольтметр и амперметр, градуированные при определенной частоте, должны иметь частотные ошибки. Эта частотная ошибка больше для схемы вольтметра, так как питаемая через трансформатор последовательная обмотка прибора имеет большую постоянную времени, чем его параллельная обмотка. Большим фазным сдвигом у вольтметра объясняется также несовпадение его шкалы со шкалой амперметра.

Аналогичны результаты анализа работы в предлагаемых схемах индукционного ваттметра.

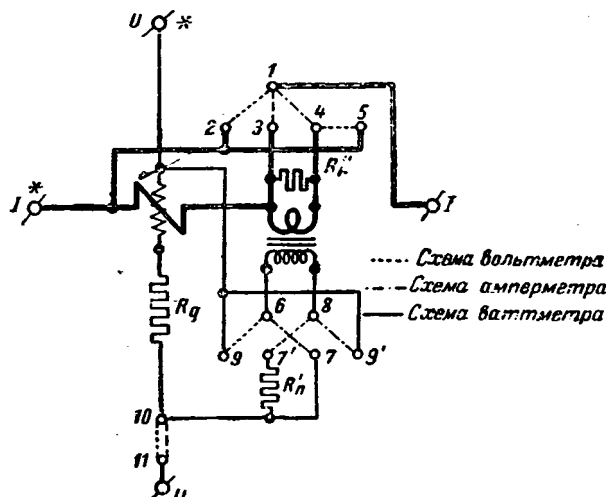


Рис. 2.

Опытный прибор этого типа был переделан из обычного электродинамического переносного ваттметра. Пределы измерения прибора — 5А, 150В и 750W. Трансформатор намотан на железе типового «междупольного» трансформатора. Обмотка низшего напряжения трансформатора имеет 27 витков, высшего напряжения — 3 333 витка. В качестве переключателя использован радиотехнический переключатель диапазонов. Как трансформатор, так и переключатель встроены в верхнюю часть корпуса прибора, где ранее было помещено добавочное сопротивление параллельной цепи. Это сопротивление установлено теперь в нижней части, рядом с механизмом прибора и отделено от последнего перегородкой. Полная схема прибора показана на рис. 2. Она составлена таким образом, что переходное сопротивление контактов не влияет заметно на показания прибора.

При работе прибора вольтметром переключатель осуществляет соединение точек 1—2, 4—5, 6—9, 8—7' и 10—11. Соединение 1—2 нужно для того, чтобы не прервать ток в цепи нагрузки. При работе амперметром соединяются точки 1—4, 6—7, 8—9, а нижний зажим параллельной обмотки оказывается отключенным. При работе ваттметром соединяются точки 1—3 и 10—11; трансформатор оказывается отключенным.

R_d — обычное добавочное сопротивление ваттметра; R_n' и R_n'' — подгоночные сопротивления, необходимые для получения одинаковой длины шкал для всех родов измерения ($R_n' \approx 500 \Omega$, $R_n'' = 1 \Omega$).

Исследование прибора дало следующие результаты. Изменение температуры на 10°C вызывает дополнительную погрешность менее, чем 0,5%. Изменение частоты от 40 до 55 Гц вызывает дополнительную погрешность, не выходящую за пределы 0,7%. Внешние магнитные поля влияют на прибор так же, как на обычный прибор электродинамической системы.

Таким образом, универсальный прибор достаточно прост, удобен и точен для монтажно-контрольных измерений, заменяя собой три отдельных прибора. Он может применяться как для непосредственного включения в исследуемую цепь, так и для измерения помощью измерительных трансформаторов. Выпуск приборов для заводов и организаций, изготовляющих электродинамические или индукционные ваттметры, не представит никаких затруднений; необходимо лишь применить более солидный переключатель, чем переключатель диапазонов, использованный в описанном приборе.

Триггерная схема высокой чувствительности

Кандидат техн. наук А. А. СОКОЛОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Триггером называется релейный электронный усилитель постоянного тока с положительной обратной связью, выходной ток которого изменяется скачком, когда его входное напряжение достигает определенного критического значения. Триггеры широко применяются в научной и промышленной аппаратуре в качестве безинерционных электронных реле напряжения, электронных переключателей, нулевых реле, генераторов прямоугольной формы волны, счетчиков быстрых частиц, генераторов импульсов, источников высокого напряжения малого веса, анализаторов распределения импульсов по их длительности. Триггер — важная деталь в схемах электронных интеграторов, приборов для измерения скорости, малых промежутков времени и т. п. Особое значение имеют триггеры в технике специальных устройств, работающих на ультравысоких частотах.

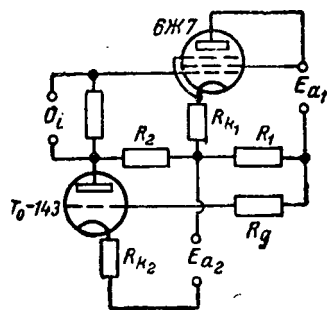


Рис. 1.

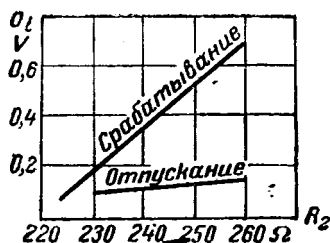


Рис. 2.

Испытания в лаборатории автоматики и телемеханики МЭИ показали, что триггер Икклса-Йордана (Л. 1) чувствителен, но работает нечетко, если изменяется сопротивление источника сигнала. Вместо одного резкого скачка тока могут наблюдаться 2—3 небольших скачка. Такое ступенчатое срабатывание можно объяснить наличием гальванической связи между целью сигнала и целью питания триггера. Это явление делает схему триггера непригодной для многих случаев применения. Триггер Рейха (Л. 2) на двух пентодах свободен от этого недостатка, но четко срабатывает только при поступающем сигнале с крутым фронтом волны. Триггер Шмидта (Л. 3) с положительной обратной связью по току работает очень устойчиво и от медленно изменяющегося сигнала, его напряжение срабатывания не зависит от сопротивления источника сигнала. Однако схема триггера Шмидта малочувствительна, напряжение срабатывания велико — порядка 50—70 В (лампа 6Н7), что требует большого предварительного усиления.

На рис. 1 показана новая, чувствительная триггерная схема, свободная от указанных выше недостатков.

Анализируя схему известными методами (Л. 4), можно написать, что напряжение срабатывания, т. е. критическое значение входного сигнала, при котором ток во второй лампе изменяется скачком, составляет:

$$U_{ic} = \frac{1}{\mu_1} \left\{ \frac{[R_{a1} + R_{i1} + R_{k1}(1 + \mu_1)][E_{a2}(1 + \mu_2) - E_{a02}]}{R_{a1}\mu_2} - E_{a1} + E_{a01} \right\} \quad (1)$$

и входное напряжение отпускания, при котором ток второй лампы возвращается скачком в первоначальное положение, равно

$$U_{io} = \frac{1}{\mu_1} \left\{ \frac{R_{a1}\mu_1[E_{a2}(1 + \mu_2) - E_{a02}] - E_{a1} + E_{a01}}{R_{a2} + R_{i2} + R_{k2}(1 + \mu_2)} \right\} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) показывают, что напряжения срабатывания и отпускания могут быть сделаны очень малыми величинами, что и подтверждается практикой. Уменьшение управляющего напряжения ниже 0,1В характеристики триггера оказались нецелесообразными потому, что нестабильность источников анодного питания и нестабильность элементов схемы не позволяют практически воспользоваться меньшими

управляющими напряжениями. Таким образом в данной схеме достигнут практически возможный предел чувствительности триггера. Крутизна также высока; скачок тока второй лампы составляет примерно 20 мА при входном сигнале 0,1В, следовательно, крутизна составляет около 0,2 мА/В, много больше, чем в других предложенных до сих пор схемах. Характеристика новой схемы триггера дана на рис. 2. Схема питается двумя выпрямителями на одном трансформаторе 30ЦС, поэтому необходимость второго источника анодного питания не является большим недостатком, общее число ламп в схеме остается таким же, как и в других, менее чувствительных схемах. Разность между напряжением срабатывания и отпускания также легко сделать равной 0,1В.

Литература

1. Eccles-Jordan. Radio Rev., № 1, 1919.
2. Reich. Electronics, № 8, 1939.
3. Schmitt. Journ. Sc. Inst., № 1, 1939.
4. А. А. Соколов. Электричество, № 10, 1944.

Абсолютный метод измерения емкости и индуктивности

Инж. А. И. ФЮРСТЕНБЕРГ

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

Ранее автором было рассмотрено применение лампочек накаливания для электрических измерений [Л. 1]. Представляется возможным использовать этот принцип для абсолютного измерения емкости и индуктивности с высокой точностью. Для этого помимо очищения кривой напряжения от обертонов и обеспечения постоянства частоты и амплитуды колебаний источника энергии необходимо повысить чувствительность индикатора равенства токов в ветвях схемы (рис. 1).

Мостики типа Howell'a [Л. 2, 3], которые употребляются для замены нормального элемента в потенциометрах невысокой точности, могут служить весьма чувствительными индикаторами вблизи некоторого фиксированного значения силы тока в том случае, если указателем равновесия является измерительный телефон.

Рассмотрим соотношения, имеющие место в мостике, содержащем одну лампочку вблизи состояния равновесия.

Пусть характеристика лампочки дана зависимостью $U = \varphi(I)$ (рис. 2). При изменении тока, проходящего через лампочку с величины I , соответствующей молчанию телефона до $I + \Delta I$ потенциал точки А увеличивается на $\Delta U_A = \Delta I \frac{d\varphi}{dI}$. Пренебрегая шунтирующим действием цепи $R_2 - R_3$ (и

соображений минимального потребления мощности выбирая $R_2 \approx R_1$) и $R_3 \approx R_1$, можно считать, что потенциал точки А получит приращение

$$\Delta U = (\Delta I \frac{d\varphi}{dI} + \Delta I R_1) \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

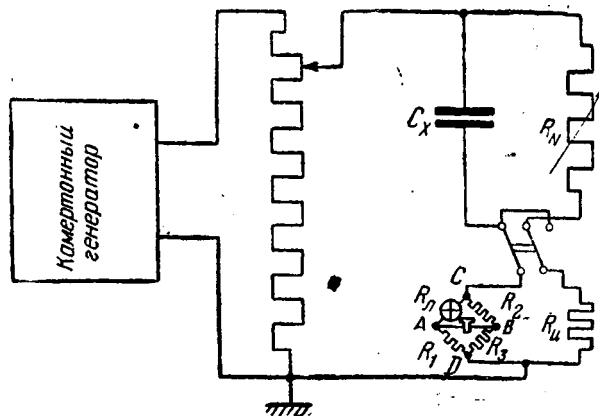


Рис. 1.

Разность потенциалов между точками A и B , которая является в цепи индикатора равновесия

$$U = \Delta U_A - \Delta U_B = \Delta I \left[\frac{d\varphi}{dI} - \left(\frac{d\varphi}{dI} + R_1 \right) \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right]$$

При незначительной разбалансировке мостика ток в цепи индикатора во много раз меньше, чем токи в ветвях схемы. Поэтому, следуя Нестеренко [Л. 4], мы считаем, что токи, являющиеся эквивалентной э. д. с., не меняют распределения токов в схеме и определение чувствительности мостика выводится, исходя из предположения наличия в схеме только эквивалентной э. д. с.

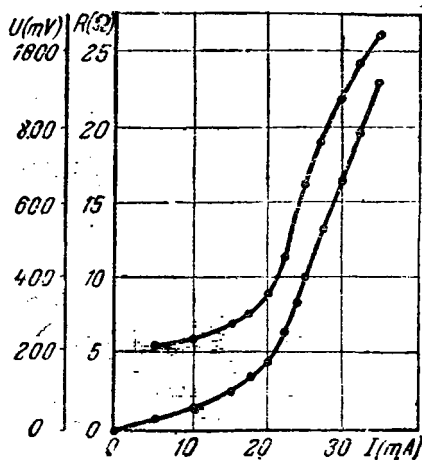


Рис. 2.

Для источника ΔU точки C и D вблизи равновесия мостика могут считаться эквипотенциальными; это дает основание пренебречь влиянием цепи Z_x (либо R_N в зависимости от того, в какую ветвь схемы включен мостик). Положив $I_x = \infty$ и $R_N = \infty$ на основании закона Кирхгофа, получим следующее выражение для тока, проходящего через нулевой прибор:

$$I_u = - \frac{\Delta I \left[\frac{d\varphi}{dI} - \left(\frac{d\varphi}{dI} + R_1 \right) \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right]}{\sqrt{\left[\frac{(R_1 + R_2)(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \right]^2 + \omega^2 L_0^2}}, \quad (1)$$

где R_0 — активное сопротивление, а L_0 — индуктивность нулевого прибора.

Подставив в выражение (1) $R_1 = R_A$ и $R_2 = R_3$, получим:

$$I'_u = \frac{\frac{\Delta I}{2} \left(\frac{d\varphi}{dI} - R_1 \right)}{\sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2} + R_0 \right)^2 + \omega^2 L_0^2}}. \quad (2)$$

В случае мостика с двумя лампочками при равных постоянных сопротивлениях плеч получаем аналогично:

$$I''_u = \frac{\frac{\Delta I}{2} \left(\frac{d\varphi}{dI} - R \right)}{\sqrt{(R_0 + R)^2 + \omega^2 L_0^2}}. \quad (3)$$

Если минимальное значение силы тока, вызывающее заметный эффект в нулевом приборе, обозначить через I_0 , то из выражения (2) может быть вычислено наибольшее отклонение тока, проходящего через мостик, которое лежит в пределах чувствительности индикатора

$$\Delta I'_{\max} = 2I_0 \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2} + R_0 \right)^2 + \omega^2 L_0^2} \frac{d\varphi}{dI} - R_1. \quad (4)$$

Относительная чувствительность мостикового индикатора с одной лампочкой выразится формулой

$$\delta'_u = \frac{\Delta I'_{\max}}{I} 100\% = \frac{200I_0 \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2} + R_0 \right)^2 + \omega^2 L_0^2}}{I \left(\frac{d\varphi}{dI} - R_1 \right)}. \quad (5)$$

Для мостика с лампочками в двух плечах

$$\Delta I''_{\max} = \frac{2I_0 \sqrt{(R_0 + R)^2 + \omega^2 L_0^2}}{\frac{d\varphi}{dI} - R}, \quad (6)$$

$$\delta''_u = \frac{200I_0 \sqrt{(R_0 + R)^2 + \omega^2 L_0^2}}{I \left(\frac{d\varphi}{dI} - R \right)}. \quad (7)$$

Сопоставив выражения (5) и (7), видим, что знаменатели идентичны, а числители отличаются друг от друга незначительно (и при $\frac{R_1 + R_2}{2} = R$ имеет место равенство).

Таким образом, можно считать, что относительная чувствительность к изменению внешнего тока для мостиков с одной и двумя лампочками практически одинакова.

Весьма важным свойством мостиков типа Howell'a является неизменность общего сопротивления. Для варианта с одной лампочкой очевидно, что мостик может находиться в состоянии равновесия только в том случае, если удовлетворяется условие $R_1 R_2 = R_3 R_4$. Следовательно, в том случае, если постоянные плечи достаточно стабильны, изменения внешней температуры, диаметра нити лампочки, переходного сопротивления у выводных контактов и т. п. не могут повлиять на величину сопротивления лампочки (а следовательно, и мостика в целом) при равновесии мостика.

Можно показать, что и в случае мостика с лампочками в двух плечах, при равных постоянных сопротивлениях, сопротивление, эквивалентное находящемуся в состоянии равновесия мосту, также является неизменным.

Незначительные отклонения эквивалентного сопротивления мостика все же имеют место, так как чувствительность нулевого прибора конечна.

Наибольшее приращение сопротивления лампы, которое вызвано наименьшим поддающимся обнаружению током, равно:

$$\Delta R_A = \Delta I_{\max} \frac{dR}{dI}.$$

Для мостика с одной лампочкой при $R_2 = R_3 \gg R_A$ можно считать, что приращение эквивалентного сопротивления примерно равно приращению сопротивления лампочки

$$\Delta R'_u \approx \Delta R_A = \Delta I_{\max} \frac{dR}{dI}.$$

Относительная погрешность измерения, вызванная изменением сопротивления индикатора для этого случая, согласно выражению (4) составит

$$\delta'_{R_u} = \frac{\Delta R_u}{R_N} 100\% = \frac{100 \Delta I_{\max} \frac{dR}{dI}}{R_N} = \frac{200I_0 \frac{dR}{dI} \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2} + R_0 \right)^2 + \omega^2 L_0^2}}{\left(\frac{d\varphi}{dI} - R_1 \right) R_N}. \quad (8)$$

В случае мостика с лампочками в двух плечах при равных постоянных сопротивлениях приращение сопротивления каждой ветви под действием тока ΔI_{\max}

$$\Delta R_A = \Delta R_B = \frac{\Delta I_{\max}}{2} \frac{dR}{dI}.$$

Приращение эквивалентного мосту сопротивления

$$\Delta R''_u = \frac{\Delta R_A}{2} = \frac{\Delta R_B}{2} = \frac{\Delta I_{\max}}{4} \frac{dR}{dI}. \quad (9)$$

Подставив в равенство (9) вместо ΔI_{\max} его значение из выражения (6), получим:

$$\Delta R_u'' = \frac{0,5 I_0}{\frac{d\varphi}{dI} - R} \sqrt{(R + R_0)^2 + \omega^2 L_0^2}.$$

Относительная погрешность измерения в процентах

$$\delta_{R_u}'' \cong \frac{\Delta R_u}{R_N} 100\% = \frac{50 I_0 \sqrt{(R + R_0)^2 + \omega^2 L_0^2}}{R_N} \frac{\frac{dR}{dI}}{\frac{d\varphi}{dI} - R}. \quad (10)$$

Сравнение формул (8) и (10) показывает, что в случае мостика с лампочками в двух плечах погрешность измерения, обусловленная изменениями сопротивления индикатора, примерно в четыре раза меньше, чем для мостика с одной лампочкой.

Очень высокая чувствительность мостиковых индикаторов, доходящая до нескольких тысячных долей процента, создает трудности при балансировании схемы. Совмещение двух методов индикации (предварительная — визуально, по начальному свечению и окончательная — при помощи телефона) является весьма удобным.

При измерении малых емкостей во избежание повышения мощности генератора мостиковый индикатор может быть включен через трансформатор, снижающий рабочий ток.

В этом случае, как нетрудно убедиться,

$$C_x = \frac{-L_u + \sqrt{L_u^2 + \frac{R_N^2 + 2R_N R_u}{\omega^2}}}{R_N^2 + 2R_N R_u}. \quad (11)$$

Здесь C_x — измеряемая емкость в фарадах; L_u — приведенная к первичной цепи индуктивность рассеяния трансформатора в генри; R_N — образцовое сопротивление в Ω ; ω — круговая частота колебаний в 1/сек.

При мощности генератора $P = 2,5$ ВА на частоте $f = 1000$ Гц пределы измерения по индуктивности составляют 0,001–25 Н; по емкости 0,001–25 мФ.

Точность измерения при соблюдении указанных выше требований составляет $\pm 0,02\%$.

Литература

1. А. И. Фюрстенберг. Доклады Академии наук СССР, т. 48, № 1, 1943.
2. J. Howell, U. S. patents 339, 058/1886; 356, 041, 1886; 356, 042, 1887.
3. Perry A. Borden. Instruments, v. 9, № 10, p. 289, 1936.
4. А. Д. Нестеренко. Электричество, № 7, 1940.

Новый прибор для измерения реактивной мощности при больших токах приемника

Кандидат техн. наук Д. В. ГОЛУБЕВ

В настоящее время имеется обширная группа потребителей значительной мощности, у которых наличие больших токов и отсутствие соответствующих трансформаторов тока, или невозможность их включения, создают затруднения в измерении как токов, так и активной и реактивной мощности на стороне низкого напряжения. Это относится, например, к дуговым и индукционным электрическим печам. С другой стороны, при подыскании более рационального режима эксплуатации и создании предпосылок для более совершенного конструирования подобных устройств указанные измерения представляют большой практический интерес. В настоящей статье дается описание прибора для измерения реактивной мощности в подобных установках, в дальнейшем называемого „киловарметр“ (измеряющий киловольтамперы реактивные).

Устройство и теория прибора. Прибор состоит из двух элементов: 1) электродинамического прибора, неподвижная и подвижная катушки которого имеют большое число витков тонкой проволоки (нами использован обычный электродинамический вольтметр), 2) пояса Роговского, в цепи которого

осуществлено определенное соотношение между r и L , обеспечивающее прибору необходимые качества. Для получения наибольшей чувствительности прибора должен быть правильно решен вопрос о выборе диаметра наматываемой на проволоку. Для измерения реактивной мощности однофазной цепи осуществляется следующее включение: неподвижная катушка вместе с добавочным сопротивлением включается в напряжение цепи, реактивная мощность которой измеряется подвижная же катушка приключается к концам обмотки пояса Роговского, охватывающего проводники с током этой цепи. Ток в параллельной цепи отстает от напряжения, благодаря индуктивности неподвижной катушки, на угол α . Ток в последовательной цепи I_A отстает от э. д. с., возникающей в поясе, на угол β (благодаря индуктивности подвижной катушки и пояса). В свою очередь, э. д. с., возникающая в поясе, отстает от тока I в цепи на угол $\frac{\pi}{2}$, по величине же пропорционален

на ему. Соответствующим переключением концов обмотки пояса достигается то, что ток I_A опережает ток цепи I на угол

$\frac{\pi}{2} - \beta$ (рис. 1). При указанном включении вращающий момент определяется выражением:

$$D = c_1 I_A I_u \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi + \alpha - \beta\right) = c_2 UI \sin(\varphi + \beta - \alpha).$$

Из формулы (1) вытекает, что при $\beta = \alpha$ отклонение подвижной системы определяется реактивной мощностью цепи.

Последнее легко может быть достигнуто, если выполнить последовательную и параллельную цепи так, чтобы

$$\frac{\omega L_A}{r_A} = \frac{\omega L_u}{r_u}, \quad (2)$$

где L_A , L_u , r_A и r_u — обозначают индуктивность и активное сопротивление последовательной и параллельной цепей. Интересно отметить, что соотношение (2) нарушается при изменении частоты.

Знак реактивной мощности, если он неизвестен, легко определяется при измерении путем включения в цепь пояса добавочной катушки, которая меняет общее сопротивление

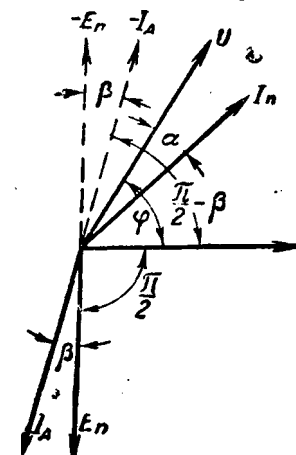


Рис. 1.

цепи пояса, но нарушает равенство $\beta = \alpha$. При этом не трудно усмотреть из некоторой диаграммы (рис. 1) при индуктивном характере реактивной мощности включения добавочной индуктивности в цепь пояса уменьшает угол между векторами I_A и I_u и, следовательно, увеличивает показания прибора, а при емкостном характере реактивной мощности уменьшает их.

Расчет последовательной цепи прибора. Используя для изготовления киловарметра обычный электродинамический вольтметр, легко получить такой прибор, в котором полное отклонение подвижной системы при номинальном напряжении и заданном $\sin \varphi$ будет иметь место при токе в десятки и даже сотни тысяч ампер, но значительно труднее подобрать параметры пояса так, чтобы достигнуть полного отклонения при токе порядка 5–10–20 тысяч ампер. Последний же диапазон токов практически в указанных выше случаях встречается гораздо чаще. Установим оптимальные соотношения параметров последовательной цепи, при которых достигается наибольшая чувствительность прибора.

Сопротивление подвижной рамки прибора r_1 , а также величину тока в рамке I_{A1} при полном отклонении рамки, номинальном напряжении и $\sin \varphi = 1$ следует считать заданными; поэтому остается варьировать лишь параметры пояса.

Если поясом Роговского охватить проводник с током I , то с обмоткой пояса будет связано число потокоцеплений

$$\Psi = \frac{\pi d^2}{4} \mu_0 \omega I,$$

где d — диаметр сечения пояса (круговое сечение), μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, ω_1 — число витков на сантиметр длины l пояса, I — ток цепи.

Величина w_1 связана с диаметром проволоки x , намотанной на пояс, соотношением:

$$w_1 = \frac{n}{x + \delta}, \quad (3)$$

n — число слоев обмотки (обязательно четное), а $(x + \delta)$ — расстояние между соседними витками обмотки пояса (с учетом изоляции провода).

Сопротивление обмотки пояса

$$r_2 = \frac{4\rho l n d w_1}{\pi x^2} = \frac{4\rho l d n}{x^2(x + \delta)} \quad (4)$$

д. с., наводимая в поясе²

$$E = w_1 \omega \frac{\pi d^2}{4} \mu_0 I = \frac{\omega \pi d^3 \mu_0 I n}{4(x + \delta)} \quad (5)$$

Для температурной компенсации в цепь пояса и рамки должно быть включено добавочное сопротивление из манганина, чтобы при изменении температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$ погрешность, вызываемая изменением сопротивления рамки и пояса, не превышала 1,5%: $r_2 = 1,7(r_1 + r_2)$.

Общее сопротивление последовательной цепи: $r_1 + r_2 = 2,7(r_1 + r_2)$ (учитывается только активное сопротивление ввиду незначительности индуктивностей рамки и пояса).

Ток в последовательной цепи

$$I_A = \frac{E}{r_1 + r_2} = \frac{\pi \omega d^3 \mu_0 I n}{4 \cdot 2,7 \left[(x + \delta) r_1 + \frac{4\rho l d n}{x^2} \right]} \quad (6)$$

Чтобы достигнуть наибольшей чувствительности прибора, необходимо выбрать такое значение x , при котором I_A имеет максимум, а выражение, стоящее в квадратных скобках в знаменателе, минимум.

Находя минимум знаменателя в формуле для I_A , получаем для оптимального x выражение:

$$x_0 = \sqrt[3]{\frac{8\rho l d n}{r_1}} \quad (7)$$

в выражение для тока принимает вид:

$$I_A = \frac{\pi \omega d^3 \mu_0 I n}{4 \cdot 2,7 (1,5x_0 + \delta) r_1} \quad (6')$$

Величина тока I , при которой подвижная система получает полное отклонение при номинальном напряжении и $\sin \varphi = 1$, может быть вычислена по выражению (6'), если положить в нем $I_A = I_{An}$; тогда:

$$I = \frac{4 \cdot 2,7 (1,5x_0 + \delta) r_1 I_{An}}{\pi \omega d^3 \mu_0 n} \quad (7)$$

Свойства прибора. Задача расширения пределов измерения легко может быть решена путем включения последовательно с поясом добавочного сопротивления (сохраняя условие 2).

Большое влияние внешних магнитных полей, обычное для электродинамических приборов, может быть ослаблено посредством расположения прибора вдали от проводников с большой силой тока (сопротивление соединительных проводов даже при большом удалении от объекта измерения окажется незначительным по сравнению с сопротивлением как последовательной, так и параллельной цепей прибора).

Положительным качеством прибора является также простота схемы для градуировки и поверки прибора. Нет необходимости иметь огромные токи, реактивную мощность которых прибор должен измерять. Достаточно лишь иметь катушку с большим числом витков, что даст даже при токах порядка 3—5 А десятки тысяч ампервитков. Э. д. с. же, возникающая в поясе Роговского, пропорциональна полному току, охваченному поясом. В силу того, что в последовательной цепи действует небольшая э. д. с., наведенная в поясе, кратковременные значительные перегрузки по току не угрожают целостности прибора.

² ω — круговая частота тока.

³ Все величины следует выражать в единицах практической системы, т. е. x, δ, d — в сантиметрах, удельное сопротивление в омега-сантиметрах;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \frac{\text{Н}}{\text{см}}$.

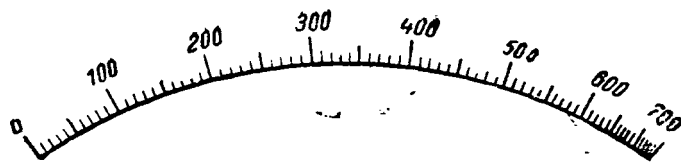


Рис. 2. Шкала киловарметра на 5 000 А и 150 В.

Положительными качествами прибора являются также незначительное собственное потребление энергии и возможность проведения измерения без размыкания цепи тока потребителя. Шкала киловарметра приведена на рис. 2.

Статические радиопомехи в полете на самолете и их устранение

Доктор техн. наук И. С. Стекольников

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Среди многочисленных видов помех радиоприему, которые можно разбить на ряд групп (регенерация приемников, электростанции, близко расположенные мощные радиовещательные станции и др.), особое место занимают помехи, вызываемые атмосферным электричеством. Эта группа в свою очередь разделяется на две — к одной относятся помехи, вызываемые бурными и кратковременными разрядами атмосферного электричества, проявляющимися в виде грозных разрядов. Эти помехи динамического характера, вызываемые электромагнитным возмущением в атмосфере, известны как «атмосферики». Другая группа атмосферных помех создается зарядами, осаждающимися на поверхности самолета и антенны при пролетании его через определенные слои атмосферы, например, через тучи, осадки, пылевые бури и т. п. В то время как природа атмосфериков хорошо изучена и борьба с помехами этого вида уделено много внимания, вопросы, связанные с изучением механизма образования статических радиопомех, освещены в литературе мало и неполно.

Согласно различным источникам такого рода помехи являются весьма существенными; необходима борьба с фактором, создающим эти помехи.

Цель и задачи исследований сводятся к выяснению механизма возникновения статических радиопомех и изысканию способов борьбы со статическими радиопомехами.

Согласно существующим представлениям основным явлением, вызывающим радиопомехи, связанным со статическим электричеством, является истечение электрических зарядов с самолета и его конструктивных элементов в атмосферу; это явление обусловлено разностью потенциалов, образующейся под влиянием заряда самолета наэлектризованными частицами дождя, тумана, снега или пыли. Специальные исследования, поставленные с целью изучения механизма стекания зарядов в атмосферу, показали, что истечение обуславливает прерывистый высокочастотный ток в цепи: самолет — коронирующее острие — атмосфера.

Так как всякое изменение величины тока в цепи связано с возмущением электромагнитного поля и так как излучение энергии в пространстве пропорционально квадрату частоты, является естественным выводом, что пульсации коронного тока могут оказывать определенное мешающее влияние на радиоприем. Частота пульсаций коронного тока зависит от его величины, формы и размеров коронирующей поверхности, от давления воздуха и ряда других факторов. В нормальном атмосферном воздухе при коронировании острия число пульсаций тока измеряется миллионами Нз. Естественно, что пульсации с такой частотой будут влиять на радиоприем. Таким образом заключаем, что: прерывистый характер тока коронного разряда является основной причиной статических радиопомех. В свою очередь отмеченное изменение тока разряда тесно связано с истечением электричества, происходящего благодаря ионизации воздуха вблизи острия, и обусловлено различием в физических свойствах электронов и положительных ионов.

С целью изучения характера пульсаций ток коронирующего в воздухе острия осциллографировался. Было установлено, что введение в цепь короны омического сопротивления уменьшает периодичность пульсаций и сглаживает импульсы тока. Далее было выяснено, что источником радиопомех является не сама «корона», а контур коронного тока. Основная схема опыта, поставленного с целью выяснения

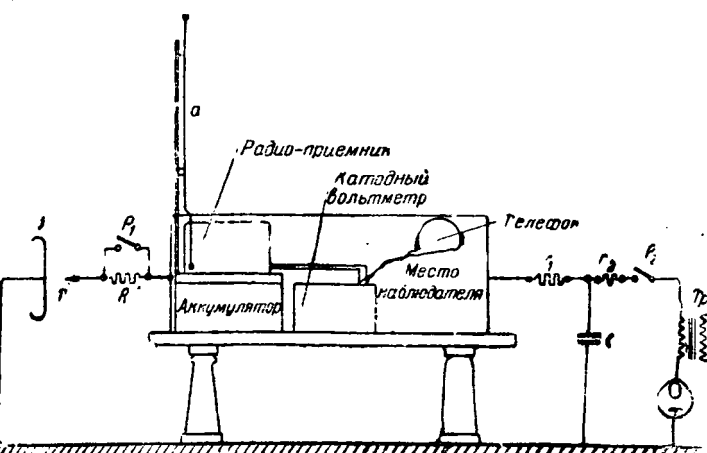


Рис. 1.

действия короны, изображена на рис. 1. Эксперимент велся следующим образом. Наблюдатель помещался в большом металлическом ящике, изолированном от земли. В ящике находились аккумулятор, питающий динамомашину радиоприемника, и сам радиоприемник (типа В-3). Приемной антенной служила вертикально натянутая проволока. Прием производился на телефон, параллельно которому для объективного определения уровня помех включался катодный вольтметр. Замыканием трензальтера P_2 ящик включался на высокое напряжение до 70 кВ постоянной величины, генерируемое трансформатором через кенотрон. После заряда конденсатора и ящика наблюдателя трензальтер P_2 включался и плоский электрод S (с закругленными краями) приближался к острию T до тех пор, пока в искровом промежутке возникала корона. Появление видимой в темноте короны даже в самой начальной стадии, при закороченном с помощью рубильника P_1 сопротивлении R , вызывало резкий шум в телефоне, который исключал возможность радиоприема. Если после этого производилось размыкание P_1 , т. е. введение в цепь коронного тока сопротивления (не меньше $10^5 \Omega$), помехи резко уменьшались, практически почти полностью исчезали, несмотря на то, что корона продолжала существовать.

Этим опытом доказывается справедливость нашего утверждения о демпфировании высокочастотных колебаний коронного тока большим омическим сопротивлением. Основой действия омического сопротивления является увеличение реаксационной постоянной RC_0 цепи коронного тока; величина C_0 здесь определяет емкость коронирующего промежутка. В условиях самолета, находящегося в воздухе, величина C_0 будет определяться емкостью корабля относительно близлежащих ионизированных слоев атмосферы. Эта емкость будет несколько больше емкости самолета относительно земли.

С целью проверки влияния на коронный ток быстрого движения воздуха у острия был сделан опыт в следующем виде.

Острие, укрепленное на стержне, приводимое во вращение от моторчика, располагалось против заземленной плоскости. Моторчик питался от аккумуляторов. Вся установка помещалась на изолированной от земли подставке и включалась на постоянное напряжение (до 70 кВ) от выпрямительной установки. Коронный ток измерялся гальванометром. Установка искрового промежутка (О—П) была выполнена таким образом, чтобы избежать изменения расстояний острие—плоскость при вращении острия, за счет возможных деформаций стержня.

Опыт заключался в том, что в промежутке О—П при включении его на напряжение устанавливался коронный ток I_1 . Затем острие приводилось во вращение, причем окружная скорость доводилась до 120 м/сек и делался замер

тока I_2 . Как показали эксперименты, выполненные при обеих полярностях острия, отношение $\frac{I_2}{I_1}$ колеблется в пределах 1,5—2.

Следовательно, можно заключить, что быстрое движение воздуха, в котором находится коронирующее острие, не приводит к изменениям тока, которые имели бы существенно значение в рассматриваемом вопросе, хотя сам факт влияния движения воздуха на ток короны весьма интересен. Эти данные показывают, что истечение зарядов в условиях летящего самолета не будет принципиально отличаться от короны истечения в неподвижном воздухе.

Аналогичные опыты были проделаны на самолете, стоявшем на земле (опыты проводились совместно с сотрудниками НИИ ГВФ в 1941 г. в г. Казани). Наземные эксперименты подтвердили возможность борьбы с коронными помехами рекомендованным методом. Необходимо, однако, учесть, что в полете корона может образовываться на самых разнообразных элементах самолета, в силу чего ее демпфирование крайне усложняется.

Каждое острие, каждая острая грань (например, задняя кромка крыла, лопасти пропеллера и т. д.) могут быть местами коронных разрядов.

Ввиду изложенного задача устранения статических радиопомех может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо, с одной стороны, принять меры к тому, чтобы затруднить коронообразование с самолета в воздух в произвольных местах, а с другой стороны, создать искусственное устройство для усиленного коронообразования с демпферными сопротивлениями для подавления помех.

Первая задача, в свою очередь, сводится к тому, чтобы: 1) устранить все острые элементы конструкции (что вполне далеко не полностью) и тем самым увеличивать потенциал зажигания (начала) короны. Здесь приходится иметь в виду невозможность устранения таких острых кромок, как края лопастей пропеллеров;

2) устранить изолированные участки на самолете с целью предупреждения разрядов. К таким участкам поверхности относятся, например, стекла кабины, неметаллические покрытия и пр. Здесь может оказать помощь покрытие такого рода поверхностей электропроводными лаками (эти вопросы усложняются при обледенении самолета).

Для решения второй задачи нами было предложено (1941 г.) устройство «коронных разрядников», конструкция которых изображена на рис. 2. Один тип разрядника, стержневой (рис. 2а), предназначен для установки его на передней кромке крыла самолета, другой тип, тросовый (рис. 2б), на задней кромке самолетного крыла и хвостовой части. Благодаря наличию острей потенциал зажигания короны снижается, в силу чего достигается сток зарядов в определенных местах самолета.

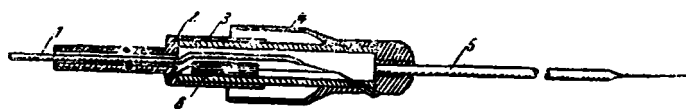


Рис. 2а.

1—изолированный провод; 2—наконечник с резьбой для крепления к самолету; 3—трубка, изолирующая; 4—обтекатель; 5—металлический стержень с углом; 6—сопротивление ТО-250 000 Ω .

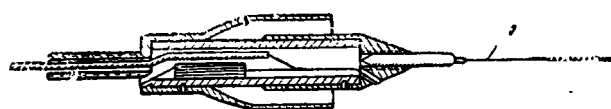


Рис. 2б.

1. Стальная проволока $\varnothing 0,25$ мм.

Особо следует подчеркнуть, что источником разрядов может служить сама антенна. Для затруднения истечения зарядов можно рекомендовать применение для антенны провода в резиновой изоляции. Еще к лучшим результатам

привести применение экранированных рамочных антенн, которые по американским данным успешно устраняли статические помехи, за исключением наиболее сильных их проявлений.

Количество разрядников и их расстановка на самолете должны определяться типом самолета и его конструкцией. Одним моментом здесь является некоторая экранировка конструкции самолета остриями с целью создания наибольших градиентов именно у разрядников.

Для полной оценки разработанных разрядников необходимо проведение летных испытаний.

О расчете мощности и выборе типа игнитронных ламп для прерывателей тока точечных электросварочных машин

Инж. Б. Я. КОГАН

За последние годы точечная электросварка алюминиевых сплавов нашла широкое применение в самолетостроении. Зарядка таких сплавов осуществляется на специальных машинах большой мощности с синхронными прерывателями тока, в которых коммутирующим элементом служат две крестообразно включенные игнитронные лампы. Конструирование эксплуатации этих машин требуют умения, правильного выбора подходящих по мощности и типу игнитронных ламп для заданных конкретных условий. В связи с отсутствием достаточной ясности в этом вопросе зачастую весьма ценное и дорогостоящее оборудование остается неиспользованным.

Каждая игнитронная лампа в зависимости от ее величины, конструктивных особенностей и способа охлаждения ограничивает: максимально допустимое значение тока по условиям устойчивости против обратных зажигания, среднеквадратичное значение тока по термической устойчивости выводов и среднее значение тока, эквивалентное длительному постоянному току по допустимой температуре перегрева.

При самых тяжелых условиях работы сварочной машины игнитронные лампы попадают в повторно-кратковременный режим. Такой режим помимо абсолютной величины нагрузки характеризуется также относительной продолжительностью рабочего цикла. Поэтому при выборе игнитронных ламп, помимо перечисленных выше значений тока, должна быть также задана зависимость максимально допустимого импульсного тока от относительной продолжительности его существования. Американские фирмы GEC и Westinghouse задают такие зависимости в виде кривых (рис. 1). Пользование этими кривыми требует знания тех предпосылок, допущений и ограничений, которые приняты при их построении, т. е. анализа процесса нагрева игнитрона под влиянием потерь энергии при пропуске сварочного тока.

В качестве первого приближения уравнения нагрева выводятся для эквивалентной модели, отвечающей обычно принятым допущениям при выводе классических уравнений нагрева. При этих допущениях, как известно, решение уравнения баланса тепла для периода нагрева и охлаждения соответственно дает:

$$\tau = \left(\tau_1 - \frac{Q}{A} \right) e^{-\frac{t}{T}} + \frac{Q}{A} \quad (\text{нагрев}); \quad (1)$$

$$\tau = \tau_2 e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{охлаждение}). \quad (2)$$

Здесь τ_1 — начальная температура перегрева цикла работы; τ_2 — конечная температура перегрева цикла работы, равная начальной температуре перегрева цикла охлаждения; Q — тепловые потери в Дж/сек; A — теплоотдача во внешнюю среду в Дж/сек°C; $T = \frac{C}{A}$ — тепловая постоянная времени эквивалентной модели.

При установившемся повторно-кратковременном режиме начальная температура перегрева рабочего участка должна

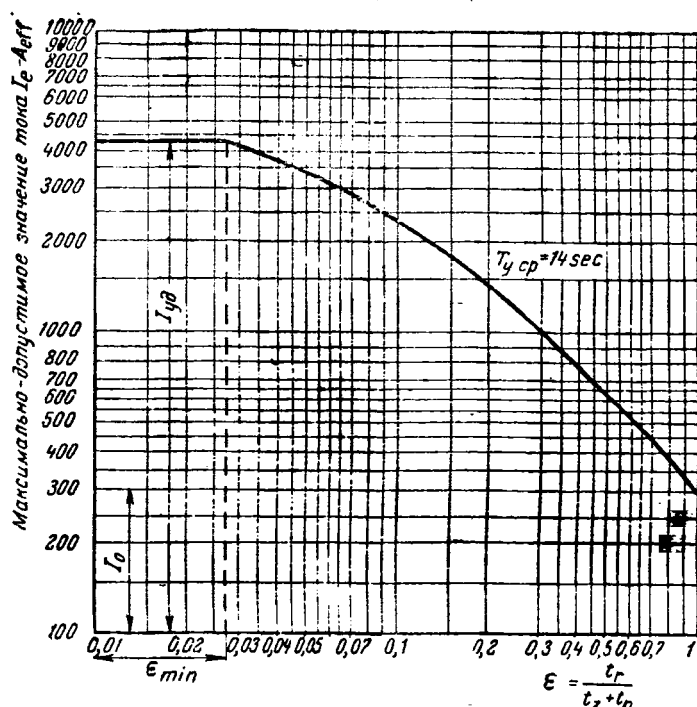


Рис. 1.

равняться конечной температуре перегрева участка паузы. Уравнения (1) и (2) для этого предельного случая после

исключения τ_1 и подстановки $\epsilon = \frac{t_r}{t_r + t_p} = \frac{t_r}{t_c}$ дают:

$$\tau_2 = \frac{Q}{A} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}} \quad (3)$$

При длительном режиме $\epsilon = 1$ и τ_2 из уравнения (3) примет значение: $\tau_2 = \frac{Q}{A}$.

Допустим, что опытным путем найдено значение максимально допустимой температуры перегрева при длительном режиме:

$$\tau_2 = (\tau_2)_{\max} = \frac{Q_0}{A}, \text{ где } Q_0' \text{ — максимально-допустимые потери,}$$

соответствующие температуре перегрева при длительном режиме. Совершенно очевидно, что ни при каком другом режиме работы максимальная температура перегрева не должна превышать найденное значение $(\tau_2)_{\max}$. Следовательно,

$$\frac{Q}{Q_0} \leq \frac{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}}{1 - e^{-\frac{\epsilon t_c}{T}}} \quad (4)$$

В случае знака равенства выражение (4) при заданных Q_0 и T представляет собой семейство кривых $\frac{Q}{Q_0} = f(\epsilon)$ для различных t_c . Marshall и Arnott [Л. 1] предложили графоаналитический метод построения этого семейства кривых, основанный на использовании свойств вспомогательной кривой, выражающей зависимость $\ln \frac{1}{1 - e^{-\frac{\epsilon t_c}{T}}}$ от $\ln \frac{\epsilon t_c}{T}$ (рис. 2).

Действительно, прологарифмировав выражение (4), получим:

$$\ln \frac{Q}{Q_0} = \ln \frac{1 - e^{-\frac{\epsilon t_c}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}} = \ln \frac{1 - e^{-\frac{\epsilon t_c}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_c}{T}}} \quad (5)$$

При заданных значениях t_c и $T = T_1$ второй член правой части уравнения (5) не будет зависеть от величины ϵ и будет представлять собой постоянную величину. На вспомогательной кривой (рис. 2) эта величина будет определять ординаты точки F , абсцисса которой $\ln \frac{t_{c1}}{T_1}$. Если эту точку выбрать за начало новой системы координат CFG, то можно пока-

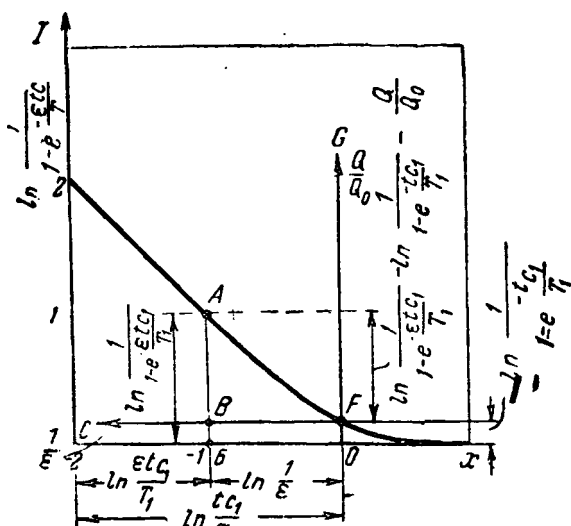


Рис. 2.

зать, что ордината любой точки на вспомогательной кривой, расположенной влево от точки F , будет в определенном масштабе в новой системе координат давать значение $\ln \frac{Q}{Q_0}$, а абсцисса — значение $\ln \frac{1}{\epsilon}$.

Каждому значению длительности рабочего цикла при заданной неизменной тепловой постоянной времени будет соответствовать новое положение начала новой системы координат CFG, а следовательно, и свой участок вспомогательной кривой. Таким способом можно найти семейство кривых $\frac{Q}{Q_0} = f(\epsilon t_c)$ для различных значений t_c и заданной величины T .

Как известно, тепловые потери в игнитроне пропорциональны суммарной мощности, выделенной внутри лампы. Используя зависимость $\Delta U_{\text{дуги}} = f(I)$, можно перестроить полученное семейство кривых, выразив потери через токи.

В целом ряде применений величина рабочего цикла оказывается на много меньше, чем постоянная времени нагрева. Выражение (4) при этом допущении значительно упрощается. Если разложить в ряд показательные функции в правой

части выражения (4) и при $T \gg t_c$ пренебречь членамиложения выше первого, то получим:

$$\frac{Q}{Q_0} \leq \frac{\frac{t_2}{T}}{\frac{\epsilon t_c}{T}} = \frac{1}{\epsilon}$$

Полагая падение в дуге постоянным, заменяем соотношением потерь соотношением токов:

$$\frac{I_A}{I_0} \leq \frac{1}{\epsilon}$$

Здесь I_A — допустимый ток, протекающий через лампу в повторно-кратковременном режиме; I_0 — допустимый ток лампы в длительном режиме.

Из выражения (7) вытекает определение так называемого максимального времени усреднения, задаваемого частотой качества параметра ионного прибора. Действительно, так

$$\epsilon = \frac{t_r}{t_c},$$

то

$$\frac{I_A}{I_0} \leq \frac{t_r}{t_c}, \text{ а } I_0 \geq \frac{I_A t_r}{t_c} = I_{cp}.$$

Правая часть неравенства (8) представляет собой среднее арифметическое значение тока нагрузки за рабочий цикл, причем величина t_c играет здесь роль времени усреднения. Так как выражение (8) выведено не для всех значений t_c , а только для тех, при которых $t_c \ll T$, то, очевидно, для любой лампы в зависимости от величины ее постоянной времени нагрева существует предельно допустимое максимальное значение $(t_c)_{max} = T_{уср}$, при котором ошибка в определении максимальной температуры перегрева не выходит за пределы, обычно задаваемых практикой ($\pm 5\%$).

В случае, когда величина $t_c > T_{уср}$, уже нельзя пользоваться приближенным выражением (8), а следует перейти к графоаналитическому методу. При $\epsilon = 1$, $I_A \leq I_0$, а при $\epsilon \leq \epsilon_{min}$ $I_A \leq I_{yd} = \text{const}$. Под ϵ_{min} понимаем то наибольшее значение ϵ , при котором ток через лампу ограничивается уже не тепловым режимом лампы, а ее способностью противостоять возникновению обратных зажигания.

Специфика работы современных точечных электродных машин, заключающаяся в относительно малой длительности рабочего цикла и работе при широком диапазоне рабочих токов, позволяет при выборе игнитронных ламп пользоваться приближенными кривыми $\frac{I_A}{I_0} = f(\epsilon)$, построенными

с учетом зависимости падения в дуге от тока нагрузки.

С другой стороны, требования технологии в отношении величины и продолжительности сварочных токов, в зависимости от свариваемого материала и его толщины, и заданные основные параметры сварочной машины, сварочного трансформатора и автотрансформатора позволяют высчитать максимальное значение тока при постановке сварной точки и его относительную продолжительность. Относительная продолжительность рабочего цикла для удобства вычисления может быть выражена через параметры сварочной машины

$$\epsilon = \frac{t_r}{t_r + t_p} = \frac{kz}{f60}. \quad (9)$$

Здесь k — число периодов пропуска сварочного тока; z — число сварных точек в минуту (установка автомата). Сопоставляя эти данные с каталожными, можно судить о возможности использования того или иного типа игнитронной лампы для работы в прерывателе тока точечной сварочной машины.

Проведенные автором, совместно с инженером В. Я. Купрадзе, испытания и расчеты на основе изложенной выше методики позволили путем использования другого типа-размера ламп пустить в эксплуатацию на одном из заводов остро необходимую электросварочную машину без какого-либо заметного ущерба ее техническим показателям.

Литература

1. D. E. Marshall and Arnott. Analytical Treatment for Establishing Load-Cycle Ratings of Ignitrons. AIEE Transactions, v. 61. p. 545, August, 1942.

Тробокопическая регистрация угла расхождения Э. д. с. (угол δ)

Кандидат техн. наук В. А. ВЕНИКОВ
и ст. научный сотрудник С. С. ЧУГУНОВ

Энергетический институт им. Кржижановского
Академии наук СССР

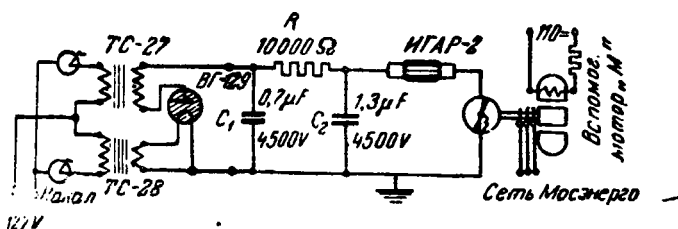
В практике эксплуатации энергосистем при различных δ (как в производственных, так и лабораторных условиях) бывает исключительно важно измерять угол δ — параметр, весьма ярко характеризующий степень устойчивости и работу синхронных машин.

Различные способы измерения угла δ , предложенные у нас, так и за границей, обладают существенными недостатками: они недостаточно точны, непригодны для замера δ в нестационарных режимах, показания их зависят от различных посторонних факторов, например, от напряжения, токи и т. д.

Предлагаемый авторами способ свободен от этих недостатков и является наиболее точным, позволяя регистрировать и измерять угол во время нестационарных процессов; при этом возможны как непосредственное наблюдение, так и автоматическая запись угла $\delta = f(t)$.

На вал генератора, угол δ которого подлежит измерению, насажен диск (может быть использован шкив, соединительная муфта и т. д.). На диске, окрашенном в черный цвет, нанесены белой краской отметки через интервалы, соответствующие определенной доли окружности, например электрических градусов. Перед диском помещена прозрачная шкала с делениями. Отметки на диске, видимые сквозь эту шкалу при освещении ее лампой стробоскопа, дают возможность отсчитать угол δ .

Стробоскоп в собранном виде состоит из аргонортутной лампы типа ИГАР-2, прерывателя, сидящего на валу вспомогательного синхронного двигателя небольшой мощности, и двух конденсаторов C_1 и C_2 , зарядного сопротивления $R = 10000 \Omega$. Электрическая схема стробоскопа представлена на рисунке.



Электрическая схема стробоскопа для регистрации угла

Работа стробоскопа происходит следующим образом: выпрямитель B , дающий напряжение порядка 2000 В, заряжает конденсаторы C_1 и C_2 в момент, когда прерыватель P разомкнут. При замыкании прерывателя конденсатор C_2 разряжается на лампу, дающую при этом вспышку. Конденсатор C_1 служит для фильтрации пульсирующего напряжения выпрямителя. Сопротивление R служит для ограничения тока и предотвращения затягивания вспышки вследствие горения лампы непосредственно от выпрямителя. При подборе элементов стробоскопа между ними должны иметь место следующие соотношения, вытекающие из изложенных выше условий их работы: постоянная времени конденсатора C_2 с сопротивлением R , равная RC_2 , должна быть достаточно мала, чтобы конденсатор C_2 успевал заряжаться за время между двумя вспышками. С другой стороны, емкость C_1 должна быть достаточно велика для получения достаточной энергии вспышки, а сопротивление R — достаточно велико для ограничения тока через лампу, текущего непосредственно от выпрямителя. Далее наиболее важно иметь достаточно малую постоянную времени разрядной цепи, цепи лампы с конденсатором C_2 , для получения достаточно короткой вспышки лампы, а следовательно, достаточно резкой фотозаписи. Так как постоянная времени разрядной цепи при заданной емкости C_2 определяется в основном индуктивностью и омическим сопротивлением соединительных проводов, последние должны быть по возможности короче и располагаться бифилярно. Вспомогательный

синхронный двигатель присоединен к напряжению U , по отношению к которому мы хотим измерить угол δ . При синхронизме вектора напряжения U и вектора E_d (оси ротора генератора) диск, освещаемый вспышками лампы, будет виден как неподвижный. При изменении скорости генератора положение отметок диска относительно шкалы будет соответственно перемещаться, и наблюдатель, смотрящий на диск, освещаемый вспышками лампы, будет видеть его так, как если бы он смотрел на него, находясь на роторе вспомогательного двигателя.

Автоматическая запись угла производится на светочувствительную бумагу, помещаемую в барабанную кассету. Последняя устанавливается на фотоаппарате, имеющем дополнительную щелеобразную диафрагму. Кассета вращается со скоростью 2 об/мин моторчиком Уоррена, питающимся от трансформатора 220/12 В, причем цепь питания включена через два реле; реле 1 включает питание стробоскопа при пуске в ход моторчика Уоррена, а реле 2 пускает в ход осциллограф, на котором могут записываться остальные электрические процессы в исследуемом генераторе или электро-системе. Запись угла может производиться или в течение некоторого промежутка времени, фиксируемого поворотом барабанной кассеты на определенный угол, или же непрерывно, в течение ряда оборотов ее. В первом случае моторчик Уоррена, повернув кассету на определенный угол, останавливается, так как цепь питания его разрывается. Для разрыва цепи используются контактные диски, через которые осуществляется питание моторчика. Благодаря имеющимся на дисках вырезам цепь питания может разрываться через ту или иную долю оборота кассеты. При помощи переключателей устанавливаются нужные условия записи. Зная частоту вспышек, легко определить масштаб времени.

При одновременной записи на осциллографе остальных электрических процессов важно согласовать масштаб времени стробогаммы (фотозаписи угла) с масштабом времени осциллограммы. Это осуществляется следующим образом: в цепь лампы включен трансформатор тока, замкнутый на шунт, к которому подключен шлейф осциллографа; этот шлейф дает на осциллограмме запись вспышек, зафиксированных в виде точек на стробогамме; ведя начало отсчета времени от первой вспышки лампы, имеем полную согласованность во времени стробогаммы и осциллограммы. Описанная установка является опытным лабораторным макетом; но она могла бы быть выполнена и в виде компактного, переносного прибора.

Расчет электронно-ионного регулятора напряжения тензорным методом

Кандидат техн. наук, доц. Н. И. ШИФЕРСОН

Тензорный метод, получивший широкое применение в американской литературе к различным вопросам электрических машин, сетей и устойчивости параллельной работы систем, благодаря статьям и книгам Крона, может быть применен и к вопросам автоматического регулирования [Л. 1—3]. Настоящая работа имеет целью показать приложение тензорного метода к получению характеристического уравнения регулирования, осуществляемого электронным регулятором напряжения.

1. Схема регулятора. Исследуемый регулятор работает по следующей схеме (рис. 1). Регулируемое междуфа-

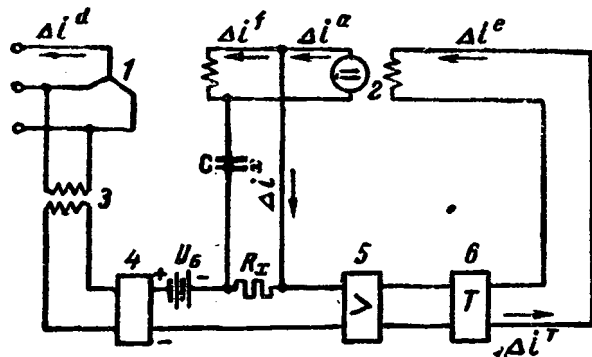


Рис. 1. Схема электронно-ионного регулятора.

1 — генератор; 2 — возбудитель; 3 — измерительный трансформатор; 4 — выпрямитель и потенциометр; 5 — усилитель; 6 — тиристор; C — емкость

звое напряжение генератора после трансформации через трансформатор напряжения выпрямляется с помощью выпрямителя и подается к потенциометру; напряжение, снятое с потенциометра, сравнивается с напряжением противобатарей и разность этих напряжений подается к сетке приемной лампы двухступенчатого аperiodического усилителя, состоящего из двух электронных ламп на сопротивлениях. Силовая часть регулятора представляет собой двухполупериодную схему тиристорных с регулирующими сетками. Регулирование тиристорных производится путем наложения на синусоидальное напряжение, отстающее на фиксированный угол от рабочего анодного напряжения, изменяющегося, но постоянного по знаку смещения. В качестве противоколебательного устройства (обратной связи) взят контур, состоящий из последовательно соединенных активного сопротивления (R_x) и емкости C .

Действие регулятора. Допустим, что произошло понижение напряжения генератора, вследствие роста нагрузки. Понижение напряжения вызовет (через усилитель) изменение отрицательного смещения на сетке тиристорных, приводящее к увеличению тока возбуждения возбудителя, а следовательно, тока ротора и регулируемого напряжения до требуемой величины. Предотвращение перерегулирования достигается тем, что за счет появления зарядного тока конденсатора (протекающего через сопротивление R_x) вследствие повышения напряжения возбудителя в результате действия регулятора приемной лампы усилителя сообщается импульс, противоположный по знаку тому, какой был ей сообщен вначале действия регулятора.

Ход расчета. Разобьем всю схему регулятора на следующие расчетные элементы, изображенные на рис. 2.

Введем следующие обозначения: u_f и i^f — напряжение на зажимах и ток в цепи возбуждения генератора; u_d и i^d — напряжение генератора (эффективное) и ток в цепи статора; u_e и i^e — напряжение на зажимах в цепи возбуждения возбудителя и ток в этой же цепи; u_{g1} — напряжение, поданное к сетке приемной лампы усилителя; u_{gd} — постоянное смещение, поданное к сетке тиристора; k — коэффициент, учитывающий наличие измерительного трансформатора напряжения, выпрямителя и потенциометра; $\mu_1 = \mu_2$ — коэффициенты усиления усилителя; $\mu_1 = \mu_2$ — коэффициенты усиления тиристорных; u_b — напряжение противобатарей; E_f — внутренняя э. д. с. генератора; A_1 — крутизна спрямленной характеристики холостого хода генератора; A_2 — крутизна спрямленной характеристики холостого хода возбудителя; Δ — малое приращение величины

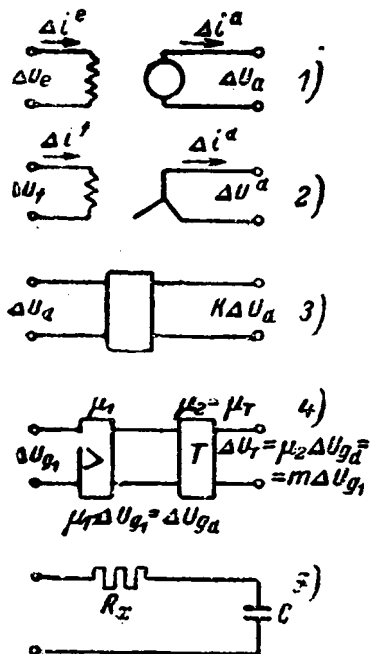


Рис. 2. Элементы схемы.

1 — возбудитель; 2 — генератор; 3 — выпрямитель и потенциометр; 4 — усилитель и тиристор; 5 — обратная связь.

(тока или напряжения); M_{fd} — коэффициент взаимной индукции цепей ротора и статора; p — оператор дифференцирования; L_e, L_a, L_f — индуктивности цепи возбуждения возбудителя, якоря возбудителя и ротора; r_e, r_a, r_f — активные сопротивления тех же цепей; $T_e = \frac{L_e}{r_e}$; $T_f = \frac{L_f}{r_f}$; $T_a = \frac{L_a}{r_a}$; $T_x = R_x C$ — постоянные времени цепей возбуждения возбудителя, генератора, якоря возбудителя и обратной связи.

Расчетные уравнения, связывающие малые приращения токов и напряжений и служащие для составления тензора полного сопротивления составных элементов всей системы, таковы:

$$\Delta u_e = \Delta i^e (r_e + pL_e) + pM_{ea} \Delta i^a, \quad (1)$$

$$\Delta u_d = \Delta i^d (r_d + pL_d) + pM_{fd} \Delta i^f, \quad (2)$$

$$\Delta u_f = \Delta i^f (r_f + pL_f) + pM_{fd} \Delta i^d,$$

$$\Delta u_a = \frac{\partial F_f}{\partial i^f} A_1 \Delta i^f = \Delta i^a (r_a + pL_a),$$

$$\Delta u_{g1} = -k \Delta u_d - \Delta i^x R_x = -k A_1 \Delta i^f - \Delta i^x R_x,$$

$$\Delta u_T = \Delta u_e = m \Delta u_{g1} = -mk A_1 \Delta i^f - mk \Delta i^x R_x.$$

Тензор полного сопротивления всех составных элементов системы

	e	a	f	d	x	T
e	$r_e + pL_e$	$M_{ea} p$				
a	A_2	$r_a + pL_a$				
$Z = f$			$r_f + pL_f$	$M_{fd} p$		
d			A_1	$r_a + pL_d$		
x					$R_x + \frac{1}{pC}$	
T			$-mk A_1$		$-m R_x$	r_T

Тензор преобразования (transformation matrix) C с учетом общей схемы соединения всех составных элементов системы согласно рис. 1 будет

	e'	a'	f'	d'	x'	T'
e	1					
a					1	
$C = f$			1			
d			1			
x				1		
T	1					

Транспонированный тензор C_t представляет собой тензор у которого строки заменены столбцами, а столбцы строками. Тензор $Z' = C_t \cdot Z \cdot C$

	e'	f'	d'	x'
e'	$(r_e + pL_e) + r_T$	$pM_{ea} - mk A_1$		$pM_{ea} - m R_x$
$Z' = f$	A_2	$(r_f + pL_f) + (r_a + pL_a)$	pM_{fd}	$r_a + pL_a$
d'		A_1	$r_d + pL_d$	$R_x + \frac{1}{pC}$
x'	A_2	$r_a + pL_a$		

Принимая $r_a + pL_a \approx 0$; $M_{ea} \approx 0$; $M_{fd} \approx 0$; $r_T \approx 0$ и $r_d + pL_d \approx 0$, имеем окончательно $Z' = C_t Z C$

	e'	f'	x'
e'	$r_e + pL_e$	$-mk A_1$	0
$Z' = f$	A_2	$r_f + pL_f$	0
x'	A_2	0	$R_x + \frac{1}{pC}$

Решая детерминант последнего тензора и приравняв его нулю, находим характеристическое уравнение переходного процесса регулирующей системы

$$T_f T_e T_x p^3 + p^2 \left[T_f T_e + T_x T_e + T_x T_f \left(1 + \frac{mA_2}{r_e} \right) \right] + p \left[T_e + T_f + T_x \left(1 + \frac{mA_2}{r_e} + \frac{kA_1}{r_f} \cdot \frac{mA_2}{r_e} \right) \right] + \left(1 + \frac{mA_2}{r_e} \cdot \frac{kA_1}{r_f} \right) = 0. \quad (11)$$

Для того чтобы процесс регулирования был устойчивым вращающимся, необходимо, чтобы корни характеристического уравнения (11) были отрицательными в случае действительных корней или чтобы, по крайней мере, действительная часть комплексных корней была отрицательной.

Условия устойчивости математически определяются известными признаками Гурвица или Routh'a.

Если оператор p характеристического уравнения заменить комплексной переменной, $x + jy$, то устойчивость системы может быть проверена критерием Nyquist'a [Л. 4].

Литература

1. G. Kron. The application of tensors to the analysis of rotating electrical machines. Gen. El. Rev., 1935—1938.
2. G. Kron. Tensor analysis of networks, 1939.
3. Kron, Boice, Crary, Thompson. The direct acting regulator. El. Eng., № 3, 1940.
4. А. В. Михайлов. Метод гармонического анализа теории регулирования. Автоматика и телемеханика, № 3, 1938.

Переходные явления в „плавающей схеме“ с дополнительным торможением на выбеге

Кандидат техн. наук Б. П. ПЕТРОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В современном городском и пригородном электропоездном составе наряду с многоступенчатым регулируемым автоматическим управлением применяются так называемые „плавающие схемы“. С их помощью во время выбега основные аппараты, управляющие режимами тяговых двигателей (реостатный контроллер, переключатель ступеней трансформатора и т. п.), по мере изменения скорости поезда автоматически занимают положения, при которых возможен в любой момент переход с одного режима движения на другой при умеренных колебаниях тягового усилия. Тем самым исключается потеря времени на переключение аппаратов в исходное (нулевое) положение и обратно—до положения, соответствующего новому режиму и скорости движения.

„Плавающие“ схемы являются разновидностью „следящих систем“, у которых „датчик“ связан со скоростью движения. В новейших трамвайных вагонах датчиками являются тяговые двигатели, развивающие некоторую э. д. с., даже при выбеге. Для этого они соединяются по обычной схеме реостатного торможения (рис. 1б) с подвозбуждением от батареи или сети. Реле торможения перестраивается на очень малый ток, что обеспечивает ничтожное замедление (порядка 0,1 м/сек²).

Под воздействием реле торможения сервомотор многопозиционного реостатного контроллера (R_2 и R_3) перемещает контакт K так, что тормозной ток I_T в цепи двигателей остается постоянным при изменении скорости, а скорость движения v и величина включенного в тормозную цепь сопротивления R_T связаны следующей зависимостью:

$$R_T = \frac{c\psi\Phi}{I_T} - r = C_T v - r, \quad (1)$$

где r — сопротивление обмоток двигателей.

Ниже рассматриваются колебания тока, имеющие место в этой схеме при всех вариантах переключений, и меры их ограничения.

Переход с выбега на служебное реостатное торможение осуществляется изменением установочного реле торможения на большой ток и может быть совершен с любой степенью плавности по воле водителя поезда.

Переход с выбега или реостатного торможения на моторный режим. Для схем пуска (рис. 1а) и торможения (рис. 1б) зависимость пускового сопротивления R_{II} , подготавливаемого во время выбега (торможения), и скорости движения v —следующая:

$$c_T v_T \Phi_T = I_T (R_T + r) = I_T [R_1 + (R_2 - R_{II}) + r]$$

или, учитывая, что выбег (торможение) совершается при

$$I_T = \text{const},$$

$$\begin{aligned} R_{II} &= (R_1 + R_2 + r) - c_T v_T \frac{\Phi_T}{I_T} = \\ &= (R_1 + R_2 + r) - C_T v. \end{aligned} \quad (2)$$

Эта зависимость представлена на рис. 2 линиями $e - e' - o'$ (для I_T), $e - e'' - o''$ (для I''_T) и $e - e''' - o'''$ (для I'''_T), причем $I'''_T > I''_T > I_T$ согласно рис. 3.

Для перехода с относительно небольшой разницей между тормозным и моторным током необходимо, чтобы в цепи двигателей было подготовлено такое сопротивление R_{II} , при котором моторный ток в первый момент после перехода I_{II} не превышал бы тока I'_II первой ступени пуска ($R_{II} = R_2$) при $v = 0$.

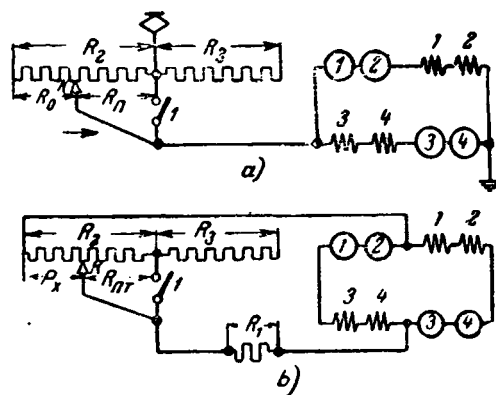


Рис. 1.

а—схема моторного режима; б—схема торможения и выбега

Если полностью соблюдать это условие, то изменение пускового сопротивления R_{II} должно подчиняться уравнению

$$R_{II} = \frac{U_c - c_{II} v_{II} \Phi_{II} - I'_{II} r}{I'_{II}} = R_2 - C_{II} v, \quad (3)$$

которому соответствует прямая $e - o''$.

Из рис. 2 и уравнений (2) и (3) следует, что $R_{II} = R_{II}$ лишь при одной скорости.

Пока $R_{II} > R_{II}$, то $I_{II} < I'_{II}$ и поставленное условие выполняется.

Во всем же диапазоне скорости оно будет выполняться лишь при таких токах I_T , при которых согласно рис. 2 и 3

$$\frac{C_T}{C_{II}} \leq \frac{R_1 + R_2 + r}{R_2}. \quad (4)$$

Там, где условие (4) нарушается, т. е. $R_{II} < R_{II}$, неизбежно $I_{II} > I'_{II}$.

Когда в тормозной схеме нет подвозбуждения, условие (4) означает, что ток I_{II} при переходе превышает I'_{II} только при $I_T = I'_{II}$.

Для устойчивого торможения обмотки двигателей „подвозбуждаются“. Тогда, как видно из рис. 3, тому же значению C_T будет соответствовать больший ток I_T перед переходом, т. е. разность токов $(I_T - I_{II})$ увеличивается.

Допустимыми значениями $(I_T)_{\min}$ и $(I_{II})_{\min} = I'_{II}$ определяется в данном случае оптимальное значение сопротивления R_1 , на окончательный выбор которого, однако, влияют скорость конца торможения и переход с моторного на тормозной режим.

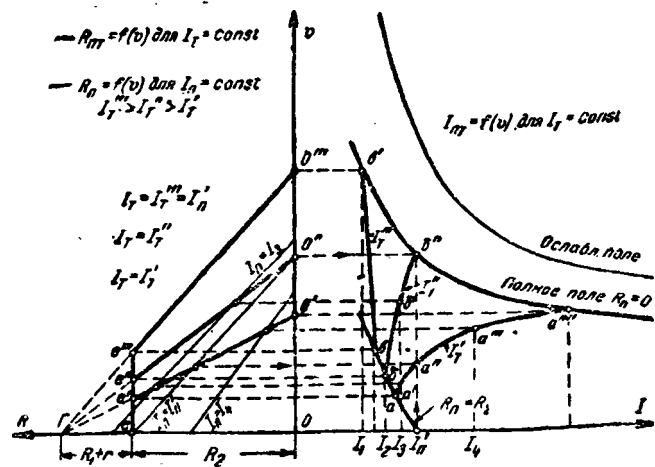


Рис. 2. Построение кривых моторного тока после перехода с торможения [$I_{II} = f(v)$] по кривым подготовленного во время торможения пускового сопротивления [$R_{II} = f(v)$].

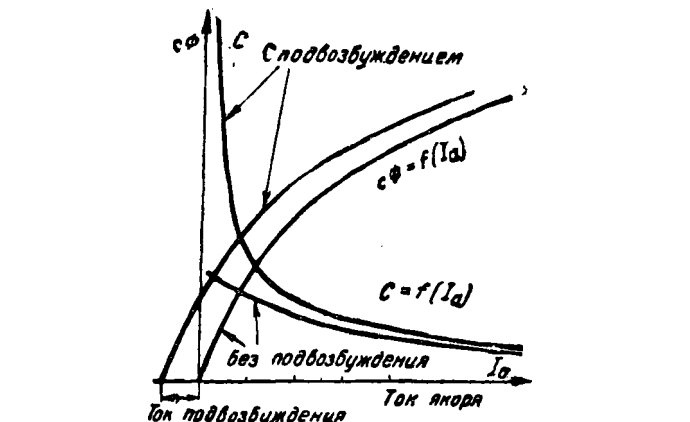


Рис. 3. Кривые $C = f(I_T)$ и $\Phi = f(I_T)$ для серийного двигателя.

значений I_T . Эти кривые (рис. 2) можно построить графическим путем по кривым $R_{II} = f(v)$, используя сетку характеристик двигателей $v = f(I_{II})$ для $R_{II} = \text{const}$ или сетку прямых $R_{II} = f(v)$ при $I_{II} = \text{const}$.

Токи Фуко в двигателях усложняют процесс перехода, особенно когда происходит включение двигателей на сеть без пусковых сопротивлений и с шунтированными обмотками (контактор 1 на моторной схеме замыкается сейчас же после перехода, если контакты К находятся при торможении на сопротивлении R_3). Целесообразно поэтому шунтировать обмотки возбуждения индуктивными шунтами, а моторную схему включать и выключать через кратковременно включаемое смягчающее сопротивление.

Переход с моторного на тормозной режим. Реостатный пуск происходит за время движения контакта К по секции R_2 реостатного контроллера. Движение контакта К по секции R при моторном режиме подготавливает сопротивление R_3 к включению на торможение. Одновременно ступенями ослабляется поле (рис. 1а). Для режима пуска (рис. 1а), учитывая, что

$$R_{II} = R_2 - R_x,$$

можно написать

$$U_c = c_{II} \Phi_{II} v_{II} + I_{II} (R_2 - R_x + r). \quad (5)$$

Отсюда определим R_x , имея в виду, что реле ускорения поддерживает $I_{II} = \text{const}$:

$$R_x = \frac{c_{II} v_{II} \Phi_{II}}{I_{II}} + \left[(R_2 + r) - \frac{U_c}{I_{II}} \right] = C_{II} v_{II} + R_0. \quad (6)$$

Тормозное сопротивление, подготавливаемое во время пуска (R_{TII}), меняется в зависимости от скорости соответственно уравнению:

$$R_{TII} = R_1 + R_x = R_1 + R_0 + C_{II} v, \quad (7)$$

где R_0 — сопротивление, которое должно быть выключено из R_2 , чтобы при $v = 0$ получить ток m -ой позиции $I_{II} = I^{(m)}_{II} > I'_{II}$.

На рис. 4 построена зависимость (7) для двух токов — $I_{II} = I'_{II}$ и $I_{II} = I^{(m)}_{II}$, причем $I^{(m)}_{II} > I'_{II}$. Зависимость прямолинейна, пока $C_{II} = \text{const}$, т. е. пусковой ток неизменен, что будет иметь место до выхода на характеристику полного

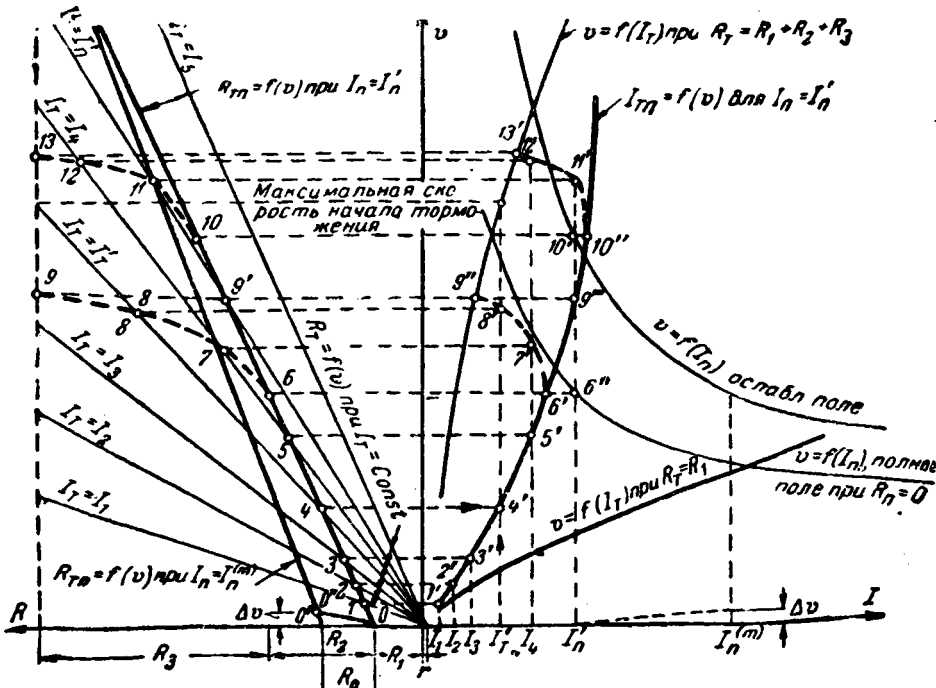


Рис. 4. Построение кривых тормозного тока после перехода с моторного режима [$I_{TII} = f(v)$] по кривым $R_{TII} = f(v)$ с учетом ускоренного движения реостатного контроллера после выхода на ходовые характеристики.

но возможно, при желании, и до характеристики ослабления поля. После же, начиная с точек 6 или 10, ось движения контакта K увеличивается и включение отпирания R_3 произойдет очень быстро (на рис. 4 при о показано пунктиром).

Плавная тормозного тока, устанавливающегося после педаль $I_{ТП} = f(v)$, может быть получена графически из кривой $R_{ТП} = f(v)$ по сетке тормозных характеристик $v = f(I_T)$ для $R_T = \text{const}$ или сетке прямых $R_T = f(v)$ для $v = \text{const}$, как это сделано на рис. 4. Аналитический расчет может на основании следующего соотношения, имеющего то после перехода на торможение, и по кривым рис. 3:

$$C_{ТП} v_{ТП} \Phi_{ТП} = I_m (R_{ТП} + r) = I_{ТП} [C_{П} v_{ТП} + R_1 + R_0 + r] \quad (8)$$

$$\frac{C_{ТП} \Phi_{ТП}}{I_{ТП}} = C_{ТП} = C_{П} + \frac{(R_1 + R_0 + r)}{v_{ТП}}, \quad (9)$$

т. е. $C_{ТП}$ всегда больше $C_{П}$, особенно при малой скорости. Или при реостатном торможении нет подвозбуждения, то уравнения (9) следует: 1) $I_{ТП} < I_{П}$, что благоприятно для плавности перехода, и 2) $I_{ТП} \approx I_{П}$, что неблагоприятно для плавности перехода, так как растет разность между $I_{П}$ и $I_{ТП}$.

В схемах с подвозбуждением тому же значению $C_{ТП}$ будет соответствовать больший ток, т. е. разность $I_{П} - I_{ТП}$ увеличится и толчки тягового усилия при переходе возрастают. Удобно подобно предыдущему случаю сравнить ток $I_{ТП}$ с током I'_T на первой ступени реостатного торможения при максимальной скорости v_{\max} начала торможения.

Сравнивая кривую $R_{ТП} = f(v)$ с лучом $R_T = f(v)$ при $I'_T = \text{const}$ или при любом другом токе, принятом для сравнения, легко убедиться, что только при малой скорости $I_{ТП} < I'_T$. Можно уменьшить разницу токов, увеличивая скорость движения контакта K после точек 6 и 10, а также увеличивая сопротивление R_1 .

Следует учитывать в процессе перехода помимо влияния индуктивности цепи и токов Фуко возможное запаздывание с возбуждением схемы.

Выводы. Изложенное позволяет сделать некоторые выводы:

1) в ряде случаев схема не обеспечивает плавного перехода с одного режима на другой;

2) подвозбуждение схемы уменьшает плавность перехода и поэтому должно быть умеренным;

3) при пуске целесообразно ускорить движение реостатного контроллера после выключения пусковых сопротивлений;

4) плавность перехода улучшается с увеличением постоянно включенного сопротивления R_1 , однако в ущерб нижнему пределу скорости конца реостатного торможения.

К вопросу о неустойчивой части пусковой характеристики асинхронного двигателя

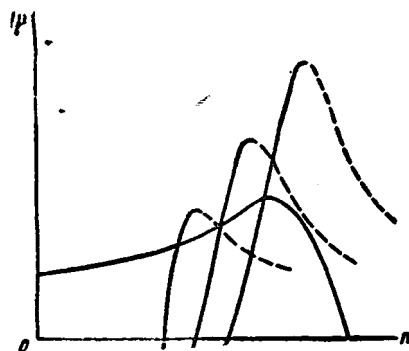
Инж. Н. А. Киклевич

Комбинат „Сталинуголь“, Донбасс

Автором были описаны ранее (Электричество № 2, 1941) некоторые способы нагрузки асинхронных двигателей, обеспечивающие устойчивую работу в так называемой неустойчивой части характеристики $M = f(n)$.

Еще один возможный способ заключается в использовании в качестве нагрузочной машины двигателя Шраге-Рихтера, работающего в генераторном режиме с различными синхронными скоростями вращения.

На рисунке показаны генераторные характеристики двигателя Шраге-Рихтера для трех значений синхронного числа



оборотов (помещенные выше оси абсцисс для удобного сопоставления с двигательной характеристикой асинхронного двигателя).

Недостатком двигателя Шраге-Рихтера при работе его в качестве тормозной машины является значительное снижение максимального вращающего момента с уменьшением синхронного числа оборотов, что затрудняет торможение на малых скоростях. С целью расширения пределов торможения следует выбирать мощность тормозной машины по возможности большей.

Дискуссия по статье проф. В. И. Полонского „Закон электромеханического подобия и универсальные диаграммы переходных процессов электродвигателей постоянного тока“¹

Электроотделом Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР совместно с редакцией журнала „Электричество“ проведено (под председательством доктора техн. наук Э. А. Мееровича) обсуждение опубликованной в журнале статьи проф. В. И. Полонского „Закон электромеханического подобия и универсальные диаграммы переходных процессов электродвигателей постоянного тока“. Материалы дискуссии помещаются ниже.

Член-корреспондент Академии наук СССР
К. А. Круг

Я остался неудовлетворенным статьей В. И. Полонского. Создается такое впечатление, что диаграммы, построенные автором, применимы ко всем случаям жизни. Вместе с тем они не могут иметь неограниченного применения. Прежде всего неясно, в какой мере автором учтены вопросы нелинейности, из статьи этого совершенно не видно. Когда вчитываешься в статью, то приходишь к убеждению, что автор говорит лишь об электродвигателях, которые уже исследованы, для которых характеристики уже построены. При всем интересе, который могут вызвать подобные работы, статья оставляет желать много лучшего в смысле ясности постановки и освещения затронутых вопросов.

Член-корреспондент Академии наук СССР
И. С. Брук

Практически может оказаться, что процессы в шунтовых и серийных двигателях могут характеризоваться одними и теми же критериями. При больших токах поток очень мало изменяется и серийный двигатель по своим свойствам очень приближается к двигателю с посторонним возбуждением. Поэтому экспериментальные кривые, в которых все значительно сглаживается, могут, как это указано в статье проф. В. И. Полонского, сблизиться. Если это обстоятельство толкнуло автора на такое объединение в его универсальных диаграммах всех двигателей, то это может быть с практической точки зрения и приемлемо, но на это следовало бы сделать ясное указание, которого, к сожалению, в статье нет.

Кандидат техн. наук, доц. В. А. Веников

Метод „универсальных диаграмм“, предложенный проф. В. И. Полонским, не дает каких-либо преимуществ по сравнению с номограммами, составленными обычным путем решения дифференциальных уравнений или путем обработки опытных данных.

Решение уравнений электромеханических процессов в двигателях, имеющих независимое возбуждение, имеет вид²

$$\omega = \frac{\omega}{\omega_n} = \varphi_1\left(\frac{t}{T}; \frac{T}{B}\right) \quad (1)$$

и

$$i = \frac{i}{i_n} = \varphi_2\left(\frac{t}{T}; \frac{T}{B}\right), \quad (2)$$

где $T = \frac{L}{R}$; $B = \frac{J_0 \omega_n^2}{P_n}$; P_n, i_n, ω_n — номинальные,

мощность, ток, скорость; J_0 — момент инерции.

Номограммы (1) и (2) видов, составленные аналитически или путем обработки опытных данных, дадут возможность найти $i = f(t)$ и $\omega = f(t)$ у двигателей с данными $\frac{T}{B}$, при данном типе возбуждения, и с данной магнитной характеристикой (относительно одинаковыми э. д. с., насыщением и реакцией якоря), при определенной характеристике момента сопротивления: $M = f(\omega) = inv$ (инварианта). Для двигателей, не удовлетворяющих данным условиям, эти номограммы иногда могут дать практически удовлетворительные результаты в силу незначительности (или взаимной компенсации) влияющих факторов.

Проф. В. И. Полонский предложил, пользуясь номограммой (1), для нахождения ω определять ток не по номограмме (2), а более сложным путем, с использованием полученной им путем анализа размерностей „универсальной диаграммы“:

$$\lg z = f(\lg x), \text{ где } z = T\omega, x = ai\omega^4, T \text{ и } a$$

— константы. Таким путем якобы получена возможность номографически проводить расчет для любых двигателей, при любых магнитных характеристиках, правильно учитывая насыщение и т. д. „Универсальная диаграмма“ должна быть более общей и совершенной, чем номограмма (2), построенная, исходя из „обычных“ методов. В действительности эта диаграмма есть не что иное, как услож-

² * Значок под буквами обозначает, что данная величина взята в относительных единицах.

¹ Электричество № 4, 1945.

ная номограмма (2). Покажем это: преобразуя (2) введением вместо переменной t относительного времени \dot{t} , равного $\dot{t} = t\omega_n$, имеем $\dot{t} = \varphi$ ($T\omega_n$; $\frac{T}{B}$); критериями подобия здесь служат $\dot{t} = inv_1$ и $\frac{T}{B} = inv_2$. Но, согласно теории подобия критерии могут заменяться новыми, составленными из комбинации данных, например, inv_2 равносильно $\dot{t} = \frac{1}{\omega_n TB}$. Таким образом inv_1 и inv_3 суть то же, что z_n и x_n , определяющие положение „универсальной характеристики“ по проф. Полонскому.

Поскольку при заданных inv_1 и inv_3 , \dot{t} и ω являются однозначной функцией \dot{t} , то можно, исключив t , перейти к зависимости $\dot{t} = \varphi(\omega)$ или $\dot{t}\omega^4 = f(T\omega)$, т. е. номограмма (2) идентична с „универсальной диаграммой“. Поскольку же последняя не содержит каких-либо новых параметров по сравнению с (2), то очевидно, она есть не более общий случай, чем (2), а только ее излишне усложненный вариант, не позволяющий определить ток непосредственно, а требующий еще дополнительных вычислений. К ошибочным выводам автор пришел, не учтя ряда факторов и необоснованно отказавшись от использования в практических расчетах инварианты U . Пользование анализом размерностей для установления подобия, в данной задаче надо вообще считать нецелесообразным и методически неправильным. Выводами анализа размерностей можно уверенно пользоваться, только достаточно глубоко зная все существенно влияющие факторы. Но если явление — достаточно изучено, то можно записать его дифференциальное уравнение, которое в силу нелинейности затруднительно решать, но из которого легко получить критерии подобия, найдя интегральные аналоги³, не прибегая к анализу размерностей.

Для двигателей постоянного тока уравнения имеют вид:

$$U - e = L \frac{di}{dt} + iR \quad (1)$$

$$j_0 \omega \frac{d\omega}{dt} + M\omega = ui - i^2 R. \quad (2)$$

Разделив уравнение (1) на iR , а уравнение (2) на Ui , а затем найдя интегральные аналоги, устанавливаем, что определяющих критериев будет три: $\frac{e}{U} = inv_1$; $\frac{j_0 \omega^2}{P_n t} = inv_2$; $\frac{L}{Rt} = inv_3$ или в относительных единицах:

$$\dot{t} = inv_1; \quad \dot{T} = \frac{T}{t} = inv_2; \quad \dot{B} = \frac{B}{t} = inv_3$$

(последние два критерия и представляют закон электромеханического подобия процессов).

Электродвижущая сила e пропорциональна скорости и некоторой функции магнитного потока и тока: $e \equiv \omega f(\Phi, i)$. Следовательно, условием подобия будет требование одинакового вида функции f , что

³ Более конкретный подход позволяет избежать ошибок, легко допускаемых при „обобщении“ результатов анализа размерностей.

практически сводит критерий (1) к требованию одинаковой относительной характеристики холостого хода и реакции якоря.

Анализ экспериментального материала может показать величину ошибки, вызванную отступлением от критерия (1), и установить, при каких параметрах можно практически пользоваться номограммой (1) и (2) для различных двигателей, строго говоря, не подобных друг другу.

Определяемыми критериями, используемыми для определения масштаба i , t , ω будут $\frac{iR}{U} = inv$; $\frac{\omega}{\omega_n} = inv$; $\frac{T}{t} = inv$. Начальные или эксплуатационные условия должны быть отражены требованиями $M_{max} = f(\omega) = inv$; $\frac{M_{max}}{inv_{3.1}} = inv$; $\frac{U}{U_n} = inv$.

Система возбуждения также должна быть отражена в критериях подобия в виде требования инвариантности ее собственных и взаимных постоянных времени:

$$\left(\frac{L_a}{r_a t} = inv; \quad \frac{L_a}{rt} = inv \right).$$

Следует иметь в виду, что переходные процессы имеют две стадии: в первой, начальной, их протекание определяется, главным образом, индуктивностями рассеяния и токами Фуко⁴; во второй стадии более существенны взаимная индукция, реакция якоря, насыщение.

В соответствии с практическими целями задачи можно говорить о подобии процессов в той или иной стадии, т. е. в определенном интервале времени.

Обработка результатов опытов в критериальной форме, например, в форме $\lg z = f(\lg x)$ может быть иногда полезной, давая связь между переменными в форме, удобной для экстраполяции результатов опыта, но и при такой записи возможности распространения результатов опыта на двигатели различного возбуждения с различным насыщением и т. д. все равно будут ограничены.

Инж. Е. Я. Казовский⁵

Проф. В. И. Полонский вводит безразмерные (параметры) x , y , z , которые, по его мнению, обеспечивают определение скорости ω и тока I во всех переходных режимах, если известен переходный процесс в машине с другими электрическими и механическими параметрами.

Инварианты x , y , z зависят только от параметров машины R , L и J , заданных условий \dot{U} и M и величин I и ω .

$$x = \frac{URI}{LJ\omega^4}; \quad y = \frac{R^4 J I^2}{L^3 M^2 \omega^2}; \quad z = \omega \frac{L}{R}.$$

Выбранные параметры могут быть представлены в виде

$$x = \left(\frac{R}{\omega L} \right) \left(\frac{UI}{J\omega^2} \right); \quad y = \left(\frac{R}{\omega L} \right)^3 \frac{\left(\frac{R I^2}{\omega} \right) \left(J\omega^3 \right)}{M^2}; \quad z = \left(\omega \frac{L}{R} \right)$$

⁴ Следует в этом случае ввести специальный критерий, учитывающий подобие влияния токов Фуко, рассматривая их как протекающие в замкнутом контуре с L_ϕ и R_ϕ и потребовав,

чтобы $T_\phi = \frac{L_\phi}{R_\phi t} = inv$.

⁵ Замечания поступили в редакцию отдельно в письменном виде.

Предлагаемые автором безразмерные параметры представляют собой, как видим, определенные соотношения для электрической и механической энергии. Величина $\frac{R}{\omega L}$ определяет в относительных единицах скорость расходования электромагнитной энергии.

Если машина имеет, помимо контура R, L с током I другие энергетически связанные контуры с параметрами R, L_n и токами I_n , то очевидно, что в безразмерные параметры x и y должны войти: помимо RI^2 еще сумма $\sum R_n I_n^2$, помимо UI еще $\sum U_n I_n$ и помимо $\left(\frac{R}{\omega L}\right)$ соответствующая эквивалентная величина с учетом параметров других контуров.

Автор утверждает, что предлагаемые им зависимости $y=f(x)$ и $z=f(x)$ достаточны для определения переходных процессов с учетом влияния токов Фуко, реакции якоря, насыщения железа и др. Такое утверждение правильно лишь в том случае, если полученные характеристики $y=f(x)$, $z=f(x)$ учитывают все возможные связи между рассматриваемыми величинами т. е., например, зависимость эквивалентного коэффициента самоиндукции L от I, ω , зависимость потерь в железе от тока, скорости и их производных по времени и т. д.

Таким образом, если процесс связан с взаимной зависимостью большого числа параметров (параметры цепи возбуждения, короткозамкнутых контуров, степень неравномерности насыщения и др.), то для описания процесса тремя параметрами x, y и z требуется исключение из уравнений, не вошедших в x, y и z параметров путем наложения дополнительных связей.

Эти связи могут быть различны для разных переходных процессов (пуск, короткое замыкание, пульсации нагрузки, потеря возбуждения и др.), в зависимости от соотношений скорости, тока и их производных, омических и индуктивных сопротивлений во всех энергетически связанных цепях, степени компаундирования машин, сдвига щеток и др.

Может ли быть все это многообразие зависимостей уложено в предлагаемые автором "универсальные характеристики", — является весьма сомнительным, во всяком случае это должно быть доказано на экспериментальном материале.

Автор не указывает, для какой системы дифференциальных уравнений пригодны предлагаемые им характеристики, однако практически указывает метод пользования характеристиками для одного ограниченного случая переходных процессов — разворота машины под нагрузкой заданного вида при постоянном подведенном напряжении.

Рассматриваемый переходный процесс описывается двумя дифференциальными уравнениями.

$$U = C_1 \omega \Phi + L \frac{dI}{dt} + RI,$$

$$M = C_2 \Phi I - J \frac{d\omega}{dt},$$

где M — момент сопротивления и C_1 и C_2 — коэффициенты пропорциональности.

Автор считает, что для данного J, R, L зависимость скорости от времени является заданной и не зависит от напряжения и тока (рис 4). Определив по параметрам J, R, L зависимость скорости от времени, автор затем помощью характеристики

$z=f(x)$ находит изменение тока во времени. Между тем, кривые нарастания скорости во времени независимо от тока, предлагаемые автором, вряд можно назвать универсальными. В ряде машин, например, нарастание скорости сопровождается затухающим колебательным процессом. В общем случае нарастание скорости зависит не только от параметров J, R, L , но и от других параметров, охватываемых величинами J, R и L , а также от величин тока и производных силы тока по времени.

Метод автора, таким образом, являясь полезным пособием для определенного класса машин для определенного вида переходных процессов рассматриваемых с заданной точностью, не может вопреки утверждению автора претендовать в представленном виде на охват общей проблемы переходных режимов машин постоянного тока.

Кандидат техн. наук, доц. П. М. Белаш

Утверждение автора о возможности заниматься вопросами электромеханического подобия, не рассматривая геометрическое устройство, неправильно. Вывод автора является следствием того, что он обозначает, в частности, разными буквами два одинаковых параметра и в результате один из них получается в нулевой степени.

Автор, в сущности, мало использует теорию подобия и не обрабатывает результаты опыта с точки зрения теоремы Букингема. В том случае, когда берется совершенно новое, не изученное явление и известны величины, участвующие в этом явлении, удобно применять этот прием. В задаче же, рассматриваемой автором статьи, этот прием нецелесообразен. В статье вводится ряд новых понятий: ранга подобия, электромеханического и электрокинетического подобия, которые не приносят пользы.

Кандидат техн. наук М. С. Либкинд

Инварианты подобия, которыми пользуется В. И. Полонский, содержат наряду с параметрами также искомые величины, изменяющиеся во времени. Такое построение инвариантов и обусловленная им зависимость инвариантов от времени не являются во всех случаях удобными. Так, например, при моделировании переходных процессов целесообразнее составить инварианты подобия только из параметров и некоторых определенных значений искомых величин (например, $\omega_{ном}$ и $i_{ном}$). В этом случае инварианты подобия, очевидно, не зависят от времени. Аналогичным образом возможно на базе не зависящих от времени инвариантов подобия получить упрощение расчетов, если исследуемый процесс описывается линейным дифференциальным уравнением. Зависимость между переменными величинами (i, ω, t), с одной стороны, и инвариантами подобия — с другой, выражается при этом аналитически.

Затруднения возникают в тех случаях, когда процесс описывается нелинейным дифференциальным уравнением. Однако в работе автора не показано, как отражается и отражается ли вообще в его универсальной диаграмме различие в нелинейных характеристиках (например, разные степени насыщения железа). Вследствие этого не доказана возможность применения подобных диаграмм в тех случаях, когда это было бы важно.

С целым рядом высказанных суждений можно согласиться. Прежде всего является сомнительной целесообразность введения новой терминологии, не требовавшейся до настоящего времени в теории подобия. Введение этой терминологии затрудняет внимание, не приносит пользы.

Отсутствие в статье четкого деления критериев ведущие и ведомые вносит в изложение некоторую неясность, которая легко могла бы быть устранена. Так легко было пояснить, почему из четырех критериев автор в конце концов пользуется лишь тремя.

Необоснованным является также использование второго метода анализа размерностей, в то время как задача сравнительно просто формулируется математически и выводы получились бы значительно более ясными, если бы автор исходил непосредственно из дифференциальных уравнений задачи. Следует, однако, отметить и ряд положительных сторон обсуждаемой статьи.

Прежде всего сама постановка вопроса о применении законов подобия к рассматриваемому в статье вопросу вполне законна и при надлежащем освещении этой задачи может дать значительные результаты. В практической полезности этого дела сомнений, я думаю, нет, потому что диаграммы такого типа, как те, которые строит автор, могли бы быть полезны инженеру для выбора двигателя, предназначенного для работы в определенных эксплуатационных условиях.

По сути дела В. И. Полонский стремится в своей статье обработать в критериальной форме результаты экспериментальных исследований и аналитических расчетов, и в этом единственно и заключается неясно сформулированная автором задача.

Строя свои характеристики, автор получает их в весьма простом виде. Он получил сходство кривых для различного типа двигателей. Его универсальная диаграмма дает семейство непересекающихся кривых. Однако, что является параметром этого семейства? В статье этого не указано. Сомнительна и универсальность диаграммы.

Вместе с тем, если бы действительно удалось на диаграмме такого типа, которая дается в статье, разместить характеристики большинства типов двигателей, то это представило бы значительный интерес.

Профессор, инж.-капитан 1 ранга
В. И. Полонский⁶

Дискуссия дала настолько большой материал, что высказать в краткой форме свои соображения по всем затронутым вопросам столь же трудно, как было трудно изложить в пределах одного печатного листа мою статью. Поэтому я смогу остановиться только на наиболее важных на мой взгляд вопросах.

Прежде всего о целеустановке статьи. Основная цель — дать новую форму (критериального типа) характеристик переходных процессов, базирующихся на методе электромеханического подобия, такую форму, которая повышала бы их стабильность

и открывала бы возможность дальнейшей широкой их геометрической обработки. Можно соглашаться или не соглашаться с тем, насколько удачна предложенная мной форма (об этом исчерпывающе говорить теперь еще трудно), но несомненно, что она значительно повышает стабильность характеристик и способствует их обобщению. Это можно проиллюстрировать наглядно на следующем простейшем примере с использованием той же методики построения характеристик. Возьмем стационарную цепь с переменными R и L и приложенным напряжением U . Переходные процессы в такой цепи в самом общем случае будут описываться уравнением

$$\frac{d(Li)}{dt} + Ri = U(1),$$

которое после деления обеих частей на U примет вид $x + y = 1$, где $x = \frac{d(Li)}{Udt}$ и $y = \frac{Ri}{U}$. Характеристика процесса в критериальной форме в системе (x, y) будет выражаться во всех случаях прямой, отсекающей на осях ox и oy отрезки, равные единице. Бесконечному разнообразию характеристик в системах координат будет отвечать всего лишь одна характеристика в критериальной системе (x, y) . Уравнение $x + y = 1$ является частным случаем уравнения $x + y + z = 1$, соответствующего уравнению переходных процессов стационарных цепей, описываемых дифференциальным уравнением $\frac{d(Li)}{dt} + Ri + \int \frac{idt}{C} = U$. В случае электродвигателей постоянного тока уравнение плоскости $x + y + z = 1$ получает более сложный вид

$$m \lg x + n \lg y + p \lg z + q \lg w = \lg \Pi \quad (2)$$

или в степенной форме:

$$x^m y^n z^p w^q = \Pi = \text{const.} \quad (3)$$

Значения Π для каждого отдельного процесса различны, но показатели m, n, p и q для каждого класса нагрузок имеют одни и те же значения.

Уравнение (2) показывает, что универсальные характеристики в логарифмической системе координат являются плоскими кривыми, лежащими в параллельных гиперплоскостях, расстояние которых от начала координат характеризуется величиной $\lg \Pi$, которую можно поэтому назвать логарифмическим показателем уровня переходных процессов. Очевидно, что путем соответствующего поворота координатных осей можно добиться спрямления одной из проекций и слияния остальных проекций для характеристик, расположенных на одних и тех же цилиндрических поверхностях. Таким образом величина Π может считаться для каждого класса нагрузок параметром, на желательность выявления которого указывал проф. Э. А. Меерович. Можно указать и другие параметры, которые для каждого отдельного процесса должны сохранять постоянные значения и которые легко вычислить по данным установившегося режима; эти параметры могут быть использованы для вычисления значений ϕ и i при переходных процессах, если имеется типовая универсальная диаграмма.

В отношении отдельных замечаний представляется возможным ответить лишь в самом кратком виде.

⁶ Замечания по материалам дискуссии представлены в редакцию в письменном виде.

1. *Ограниченное или неограниченное применение имеют универсальные диаграммы?* (член-корреспондент Академии наук СССР К. А. Круг). Путем подразделения нагрузок на классы и зависимостей $L=f(i)$ на категории возможно весьма небольшим числом диаграмм практически охватить все важнейшие виды переходных процессов электродвигателей постоянного тока. При этом методика построения универсальных диаграмм и их использования в основном одна и та же как для линейных, так и нелинейных процессов.

2. *Пользование анализом размерностей для установления метода подобия в данной задаче надо считать нецелесообразным и методически неправильным* (доц. В. А. Веников). Это высказывание находится в противоречии с его дальнейшим замечанием — „обработка результатов опытов в критериальной форме, например, в форме $lgz=f(lgx)$ может быть иногда полезной“.

3. *Сомнительно, чтобы все разнообразие процессов и параметров могло быть уложено в уни-*

версальные характеристики (инж. Е. Я. Казовский). При более точных расчетах и построениях случая с тремя степенями свободы и выше должны потребовать учета большего числа параметров, чем это принято в статье (т. е. семи). Однако методическая сторона остается той же, что и при принятом числе параметров.

4. *Представляло бы значительный интерес, если бы удалось разместить на диаграмме характеристики большинства типов двигателей* (проф. Э. А. Меерович). Цель статьи — методика построения универсальных диаграмм, а не опубликование готовых уже диаграмм.

Остальные вопросы или менее существенны, по крайней мере на первых этапах, или требуют развернутой дискуссии. Могу лишь добавить, что ценность с теоретической стороны предлагаемой методики, мне кажется, заключается в возможности использования многих выводов, связанных с принципом Гамильтона и свойствами геодезических линий.

Замечания по статье Д. А. Городского „Асинхронный ход синхронной машины в системе“¹

В статье доктора техн. наук Д. А. Городского рассмотрен сравнительно мало разработанный вопрос современной теории синхронных машин, имеющий большое практическое значение.

Синхронная машина, работающая в системе, после выпадения из синхронизма может продолжать работать в системе как асинхронная, если только причина, вызвавшая выпадение из синхронизма (или какая-либо другая причина), не заставит машину перейти за критическое скольжение. В последнем случае машина при работе в режиме генератора разгонится, при работе в режиме двигателя — затормозится².

Автор рассматривает случай установившегося режима машины, т. е. практически работу при скольжениях, меньших критического.

Наличие возбуждения ротора в асинхронном режиме вызывает появление группы частот в сети. Автор анализирует соответствующие гармоники токов и напряжений, пользуясь приближенными значениями реактансов машины в асинхронном режиме.

Автор считает, что в синхронном режиме ($s=0$) эквивалентное реактивное сопротивление машины равно $\frac{2 \cdot X_d \cdot X_q}{X_d + X_q}$, в асинхронном режиме ($s \neq 0$) эквивалентное реактивное сопротивление составит $\frac{2 \cdot X_d'' \cdot X_q''}{X_d'' + X_q''}$.

С последним утверждением автора для рассматриваемых им режимов, на наш взгляд, согласиться нельзя.

Рассмотрим для простоты случай неявнополюсной машины с одной обмоткой по каждой оси; $X_d = X_q$ и $X_d' = X_q'$. В этом случае автор считает эквивалентное реактивное сопротивление равным

$$X_d = X_q \text{ при } s=0, \\ X_d' = X_q' \text{ при } s \neq 0.$$

В действительности эквивалентное реактивное сопротивление при скольжении s равно (при одной обмотке по каждой оси ротора)

$$X_d(js) = X_d \frac{1+jsT_d'}{1+jsT_d},$$

где T_d и T_d' — постоянные времени продольной обмотки ротора при разомкнутой и замкнутой обмотке статора.

¹ Электричество, № 3, 1945.

² За исключение специального случая, когда приложенный вращающий момент нагрузки имеет весьма крутую зависимость от скорости вращения.

При учете наличия по продольной оси двух обмоток (демпферной обмотки и обмотки возбуждения) выражения усложнятся, однако принципиальные соображения, излагаемые ниже, сохраняются.

Величина эквивалентного реактивного сопротивления равна

$$X_s = X_d \sqrt{\frac{1+s^2T_d'^2}{1+s^2T_d^2}}.$$

Величина критического скольжения $s_{kp} \cong \frac{1}{T_d}$.

Таким образом при критическом скольжении

$$X_{skp} = X_d' \sqrt{\frac{2}{1+\sigma^2}},$$

где $\sigma = \frac{X_d'}{X_d} = \frac{T_d'}{T_d}$ — коэффициент рассеяния Блонделя.

Учитывая, что обычно $\sigma < 0,3$, имеем:

$$X_{skp} \cong X_d' \frac{2}{1,09} = 1,35 X_d'.$$

При скольжении $s = \frac{1}{2} s_{kp}$ эквивалентное реактивное сопротивление будет равно

$$X_s = X_d' \sqrt{\frac{1+0,25}{0,25+\sigma^2}} = X_d' \frac{1,25}{0,34} = 1,91 X_d'.$$

Так как автором рассматриваются установившиеся режимы ($s < s_{kp}$), то, очевидно, что принятие автором $X_s = X_d'$ вносит принципиальную ошибку.

В действительности эквивалентное реактивное сопротивление будет в зависимости от величины скольжения принимать значения от $X_d = (3,5 \div 5) X_d'$ до $(1,35 \div 1,4) X_d'$, поэтому применение полученных автором формул в практических случаях (скольжение меньше критического) должно, на наш взгляд, привести к неправильным результатам.

Инж. Е. Я. КАЗОВСКИЙ

Замечание инж. Е. Я. Казовского сводится к тому, что при скольжениях нельзя пренебрегать активными сопротивлениями генераторов. Эти совершенно верно. Что касается учета их, то в предлагаемом мною методе это произойдет таким образом, что вместо реактивных сопротивлений основных и сопровождающих токов должны быть поставлены полные сопротивления \bar{Z}_2 и \bar{Z}_3 , полные выражения которых приведены были мною ранее в статье «Асинхронный ход южной машины» (Электричество, № 1—2, 1944).

В соответствии с этим в основных уравнениях системы (асинхронном ходе машины в системе) в выражениях основных и сопровождающих токов в тех случаях, когда рассматривается частота, по отношению к которой данный генератор синхронно, вместо jX_2 и jX_3 должно быть подставлено:

$$\bar{Z}_2 = \frac{R_{cm}^2 + X_d X_q}{R_{cm} - j \frac{X_d + X_q}{2}}$$

вместо jX_3

$$\bar{Z}_3 = \frac{R_{cm}^2 + X_d X_q}{-j \frac{X_d - X_q}{2}}$$

Для тех же частот, по отношению к которым генератор идет асинхронно, вместо jX'' , должно быть подставлено:

$$\bar{Z}_2 = \frac{2\bar{Z}_d'' \cdot \bar{Z}_q'' + R_{cm} (\bar{Z}_d'' + \bar{Z}_q'') \frac{2s}{1+2s} - \frac{2R_{cm}^2}{1+2s}}{\bar{Z}_d'' + \bar{Z}_q'' - \frac{2R_{cm}}{1+2s}}$$

и вместо jX''_3 .

$$\bar{Z}_3 = \frac{2\bar{Z}_d'' \cdot \bar{Z}_q'' + R_{cm} (\bar{Z}_d'' + \bar{Z}_q'') \frac{2s}{1+2s} - \frac{2R_{cm}^2}{1+2s}}{\bar{Z}_d'' - \bar{Z}_q''}$$

Скольжение s в этих формулах определяется относительно рассматриваемой частоты ω по формуле:

$$s = \frac{\omega - \alpha}{\alpha},$$

где ω — синхронная частота данного генератора, тогда как полные сопротивления \bar{Z}_d'' и \bar{Z}_q'' находятся из соответствующих схем замещения, приведенных в упомянутой выше работе.

Так как сопротивления \bar{Z}_2 и \bar{Z}_3 при увеличивающихся скольжениях все больше и больше приближаются к значениям jX''_2 и jX''_3 , то уже очень скоро активными сопротивлениями можно бывает пренебречь и учитывать их только в центральных и ближайших к ним уравнениях той бесконечной системы уравнений, к решению которой сведена была задача об асинхронном ходе одной из машин в системе. При этом внешние уравнения системы (составленные без учета активных сопротивлений) дадут возможность установить между «старшими» неизвестными такие же точно соотношения, которые были нами получены в рассматриваемой работе. После этого центральные уравнения, составленные с учетом активных сопротивлений, дадут возможность определить остальные неизвестные. Задача таким образом может быть решена с любой степенью точности.

Несколько более простой способ составления центральных уравнений с учетом активных сопротивлений я предлагаю дать в дальнейшем при рассмотрении несимметричных нестационарных процессов в синхронных генераторах. К сожалению, размер журнальной статьи не дал мне возможности остановиться на этом вопросе с достаточной полнотой в надлежащем месте.

Доктор техн. наук Д. А. ГОРОДСКИЙ

О статье А. М. Бамдас „Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов“

В журнале «Электричество», № 4 за 1945 г. была помещена статья доктора техн. наук проф. А. М. Бамдас «Трансформаторно-выпрямительные агрегаты для электрической очистки газов».

Разбирая в указанной статье пригодность для питания электрофильтров разных типов выпрямителей, автор делает вывод, что для электрофильтров следует применять механические выпрямители с вращаемой синхронным двигателем коммутационной системой.

Действительно, этот тип выпрямителей широко применялся за границей до 1934—1935 гг., а в СССР до начала Отечественной войны, причем проф. Бамдас была разработана оригинальная схема выпрямителя СБ для мощных установок. Но, несмотря на кажущуюся простоту, механические выпрямители обладают рядом существенных дефектов, что повело к замене их более совершенными типами.

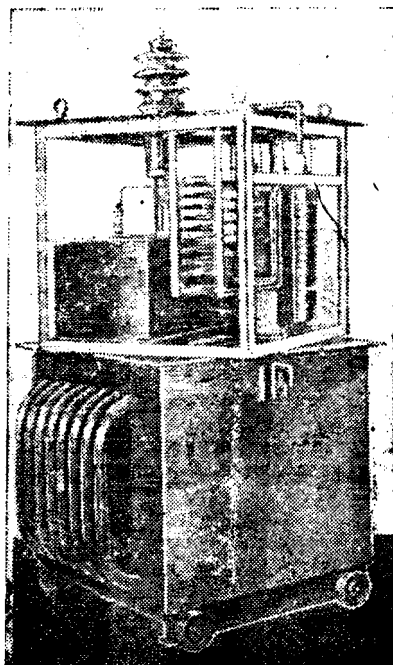
Таковыми дефектами являются:

- наличие вращающихся и подверженных износу частей (двигатель, щетки), требующих квалифицированного ухода, смазки и т. д., причем износ идет особенно быстро в условиях химических производств;
- шум при работе и связанные с наличием сильного искрения радиопомехи;
- необходимость регулировок коммутационной системы при изменении тока нагрузки;
- громоздкость.

Еще до 1941 г. за границей делались опыты применения электронных и твердых (купроксных и селеновых) выпрямителей. Кенотроны по причине ограниченного срока службы не прижились, но селеновые выпрямители в настоящее время широко применяются в Англии и США.

Действительно, селеновые выпрямители не имеют перечисленных выше дефектов механических выпрямителей. Срок службы селеновых выпрямителей по данным иностранных фирм неопределенно велик (выпрямительные селеновые диски отечественного производства после 4000 час. работы не показали заметного ухудшения). Выпрямители не требуют ух-

да, бесшумны, не дают радиопомех. Размещение селеновых выпрямительных столбиков в общем баке с высоковольтным трансформатором защищает их при работе в коррозирующей среде и позволяет выполнить весьма компактную конструк-



Выпрямительный агрегат для электрофильтра на 50 кВ—50 мА. Выемная часть поднята из масляного бака.

цию, причем на крышке бака имеется лишь один вывод выпрямленного высокого напряжения. Погружение селеновых столбиков в масло резко повышает их электрическую прочность и способность переносить значительные перегрузки, так как допускаемые нагрузки селеновых дисков зависят только от их теплового режима.

К достоинствам селеновых выпрямителей относится также сравнительно высокий к. п. д. (до 75% при работе в трехфазной схеме Гретца). Довольно высокое внутреннее сопротивление селеновых столбиков облегчает получение падающей характеристики, необходимой для защиты выпрямителя при замыканиях в камере электрофилтра, делая непугными балластные сопротивления.

В качестве иллюстрации можно привести выпрямитель для электрофилтра Standard Telephone and Cable Co. рисунок ясно видна простота и компактность установки.

Все вышеперечисленное заставляет предполагать, что поскольку производство селеновых выпрямителей успешно осваивается в СССР, — при разработке проектов новых установок для электрической очистки газов необходимо обратить особое внимание на селеновые выпрямители, ставя под сомнение целесообразность дальнейшего использования механических выпрямителей даже усовершенствованных систем.

Инж. Г. Л. ПЕРКОВИЧ

ХРОНИКА

Военный музей связи Красной Армии

На одной из улиц Москвы — Матросская Тишина, 10, — в старейшем здании казарм разместился недавно открывшийся Военный музей связи Красной Армии. Открытие музея состоялось в день 50-летия со дня изобретения радио великим русским изобретателем А. С. Поповым. В стенах музея хранится около 3 000 экспонатов, характеризующих историю развития техники и средств связи в русской армии со времени русско-турецкой войны 1877—78 гг. до настоящих дней.

В просторных залах размещены экспонаты музея. Здесь собраны ценные исторические документы и материалы, образцы боевой техники и оружия связистов русской армии. Специальный раздел посвящен боевой деятельности войск связи в русско-турецкой войне, где впервые русская армия практически применила электрические средства связи — телеграф. О славных подвигах русских связистов в этой войне красноречиво рассказывают боевые реликвии. Среди них — телеграфная аппаратура и средства связи, находившиеся на вооружении в русской армии, образцы трофейной техники. Большой интерес представляет телеграфный аппарат, захваченный русскими войсками при взятии крепости Ардаган.

Следующий раздел посвящен русско-японской войне 1904—1905 гг. Здесь показано дальнейшее развитие отечественной боевой техники и средств связи. На русско-японском театре войны впервые в боевых условиях в русской армии была применена радиосвязь. На одном из стендов подробно освещена история Первого отдельного батальона связи, сформированного в 1904 г. для обслуживания русской армии, героически сражавшейся на полях Маньчжурии.

Экспонаты музея дают наглядное представление о боевых действиях войск связи в первой мировой войне, где наряду с новейшими техническими средствами всё большее значение приобретала радиосвязь.

Много ценных исторических материалов представлено на стендах музея из эпохи гражданской войны. Обращают на себя внимание фотодокументы писем и директивных указаний Ленина и Сталина об организации связи в войсках Красной Армии.

Большое место среди экспонатов занимают материалы Великой Отечественной войны. Богатейший опыт применения техники и средств связи войсками Красной Армии в современной войне получил в музее наиболее полное и всестороннее освещение.

Посетители с живым интересом осматривают славные боевые реликвии. Вот макет узла связи 62-й армии. Он изоб-

ражает место и оборудование командного пункта, откуда генерал Чуйков управлял войсками в дни ожесточенных боев на улицах Сталинграда. О доблести и героизме военных связистов, мужественно сражавшихся под Сталинградом, говорит отзыв генерала Чуйкова: «Когда наступили решающие дни, — пишет генерал, — Военный Совет пять раз менял командный пункт. Немецкие автоматчики стреляли по моему блиндажу. В другой раз командный пункт затопила горящая нефть. Связь рвалась ежеминутно, и только храбрость и отвага связистов выручили нас».

Рядом экспонирован другой документ — благодарное письмо адмирала Ф. Октябрьского военным связистам — участникам героической защиты Севастополя. «Героическая оборона Севастополя имела подлинных героев-связистов, которые, как командующего «севастопольским оборонительным районом» в течение восьми месяцев обороны, полностью обеспечивали надежной связью. Я не терял боевого управления соединениями и частями даже в самые жестокие бои. Связь мужественным связистам севастопольской обороны».

На стенде — небольшая портативная радиостанция «Сверл». Ее подарили музею крымские партизаны. Во время жестокой битвы за освобождение Советского Крыма партизанка Шура Барникова, заброшенная в тыл к немцам, с помощью этой рации передавала сведения о противнике в штаб партизанского движения Крыма.

Отдельный стенд посвящен связистам — героям войны — участникам форсирования Днепра. За образцовое обеспечение связью войск Красной Армии при переправе через Днепр свыше 100 связистов удостоены звания Героя Советского Союза. На других стендах отражена работа военных связистов по обеспечению наступательных операций Красной Армии, увенчавшихся полной победой над врагом.

Музей располагает не только ценными историческими материалами и документами, но также и богатейшей техникой связи. В залах музея собраны образцы всех типов телефонной, телеграфной и радиоаппаратуры. Техника радиосвязи представлена от знаменитого грозоотметчика А. С. Попова до новейших современных мощных радиостанций.

При музее имеются прекрасно оборудованные кабинеты для учебных занятий. Это дает возможность музею вести научно-методическую работу по подготовке высококвалифицированных связистов Красной Армии.

В. ШЕПЕЛЕВ

Электротехника и электрохозяйство за границей

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ САМОЛЕТОВ

Merson, Cragg, Schultz. Современная электроснабжающая система постоянного тока на самолете. *El. Eng., стр. 265—270, № 6, Tr., 1944.*

На военных многолюдных самолетах в настоящее время считается многогенераторная система постоянного тока. Главнейшими задачами при выполнении этой системы являются: распределение нагрузки между генераторами, точность напряжения в системе, вибрация переключающего контактора обратного тока, тяжелые переходные режимы, мощность, отдаваемая генератором и токи короткого замыкания. Успешная параллельная работа генераторов, а также поддержание постоянства напряжения нагрузки достигается использованием регуляторов напряжения. Вибрация переключающего контактора происходит в основном при параллельной работе с малыми нагрузками, при наличии у генераторов возмущающей характеристики и при низкой отключающей уставке контактора.

Электроснабжающая система должна иметь достаточную электрическую устойчивость для того, чтобы поддерживать напряжение при неустановившихся режимах. Устойчивость системы возрастает с увеличением числа батарей, генераторов и с увеличением скорости генератора, развиваемой в момент-переходного процесса нагрузки. Отдаваемая генератором мощность зависит от конструкции генератора и в первую очередь от того, является ли он компенсированным или некомпенсированным, а кроме того от сопротивления цепи возбуждения. Отдаваемая мощность может быть значительно повышена путем применения генераторов компенсированной конструкции и регуляторов, имеющих низкое сопротивление. В четырехгенераторной установке с тремя батареями токи короткого замыкания достигают 5000 А. Поэтому контакторы обратного тока, разрывающие токи до 2400 А, не пригодны для защиты от токов короткого замыкания. Для защиты системы от токов короткого замыкания используются специальные защитные выключатели в цепях батарей и генераторов.

К генераторам постоянного тока, устанавливаемым на самолете, для успешной работы предъявляется ряд требований. В первую очередь устойчивая параллельная работа генераторов при малых нагрузках и предохранение контакторов от вибрации требуют подающей регулировочной характеристики генератора при всех нагрузках, при которой номинальное напряжение машины должно падать с увеличением нагрузки при неизменном токе возбуждения. С другой стороны, генератор с большим падением напряжения не может отдавать большую мощность при тяжелых перегрузках. Для управления величиной падения напряжения в генераторе предусматривается компенсационная обмотка. Применение компенсированных генераторов обеспечивает максимальную выходную мощность при всех рабочих условиях системы и обеспечивает при применении регуляторов напряжения надежную параллельную работу.

Инж. Е. Л. КОВАРСКАЯ

W. K. Voise, L. G. Levo. Основные соображения при выборе электрической системы для больших самолетов. *El. Eng., стр. 279-287, № 6, Tr., 1944.*

Ввиду того что современные самолеты конструируются для выполнения весьма разнообразных функций, один и тот же тип электрической системы не может быть наилучшим для всех видов самолетов. Лучшей электрической системой для самолета является система, эффективно сочетающая максимальную надежность при всех условиях работы, минимальный вес, наименьшую занимаемую поверхность, легкость установки и обслуживания, защищенность от огня в бою, минимальную стоимость.

В настоящее время наиболее часто применяемой системой для средних и больших самолетов является система, генерирующая и распределяющая электроэнергию постоянного тока напряжением 27 В. Системы более высокого напряжения — 120 В постоянного тока и 208 В переменного тока имеют широкие перспективы развития.

Особенно значительные выгоды для больших самолетов с большой высотой полета представляет переменный ток. Легкий вес двигателей и генераторов переменного тока, простота, низкая стоимость, сведение коммутации и использования щеток к минимуму, возможность получения различных напряжений от трансформаторов стимулируют широкое развертывание исследовательской работы по улучшению самолетного электрооборудования на переменном токе. Частота переменного тока для самолетов выбрана равной 400 Hz. Такая система, с одной стороны, дает возможность получить высокие скорости двигателей (порядка 8000—12000 об/мин), чего требуют многие механизмы самолета, без чрезмерного увеличения числа полюсов двигателей, а с другой стороны, частота 400 Hz не слишком увеличивает вес проводов и оборудования, чего можно ожидать ввиду наличия скин-эффекта и вихревых токов.

Для привода генераторов самолетов имеется несколько возможных источников: вспомогательный приводной вал от главного двигателя самолета, вспомогательный газовый двигатель, газовая или паровая турбина, ветряные генераторы. Наиболее распространенным приводом для больших самолетов является привод через вспомогательный вал от главного двигателя. Такой привод надежен, создает малый дополнительный вес, обеспечивает экономию топлива.

Число генераторов на самолете выбирается, исходя из условий уязвимости системы в бою и требуемого запаса мощности. Генераторы должны быть распределены между приводными двигателями так, чтобы потеря одного двигателя не вызвала слишком большой потери энергии. 100% резерв мощности на самолете считается наивысшим пределом. При наличии нескольких генераторов постоянного или переменного тока возможна как раздельная, так и параллельная работа их. Генераторы постоянного тока могут также работать параллельно при наличии соответствующих характеристик и регуляторов напряжения. Параллельная работа генераторов переменного тока требует вращения их через особый привод с переменным отношением, который обеспечивает постоянство скорости генераторов при различных скоростях приводных двигателей. Кроме того системы переменного тока для параллельной работы генераторов требуют оборудования для синхронизации. В настоящее время имеется тенденция к полной автоматизации процесса синхронизации.

Нельзя дать общего правила относительно того, что лучше: применять раздельную работу генераторов или параллельную их работу. Автор указывает, что как та, так и другая успешно применяются на современных больших самолетах.

Инж. Е. Л. КОВАРСКАЯ

РУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

E. F. Christensen, M. M. Morack. Работа выпрямителей в условиях небаланса. *El. Eng., стр. 628—631, № 9, 1944.*

Многофазный выпрямитель и питающий его трансформатор проектируются таким образом, что при нормальных условиях работы ток во всех их элементах сбалансирован и в сердечнике трансформатора поток от постоянной составляющей тока отсутствует. При работе же выпрямителя с числом эдов, меньшим нормального, эта составляющая в сердечнике трансформатора служит причиной появления небалансного тока в обеих ветвях разделяющей катушки. Известно также, что нагрев большинства частей агрегата определяется среднеквадратичными значениями тока и что для всякого аппарата существует предел нагрева, который определяется теплостойкостью изоляции и других материалов, примененных в конструкции.

В нормальных условиях время работы и температура мало влияют на срок службы выпрямительного агрегата, мощность которого ограничивается способностью ионизированных паров проводить ток от анода к катоду и вероятностью обратных

зажиганий, которая возрастает с увеличением пика тока. При работе же выпрямителя с неполным числом анодов для определения тока нагрузки, которую он может нести без чрезмерного нагрева его частей и трансформатора, необходимо знать форму и распределение токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора и в разделяющей катушке.

Для определения нагрева сердечника трансформатора и масла при различных нагрузках был проведен ряд опытов с трансформатором 1190 kVA, 6600/243 V (со схемой соединений вторичной обмотки — двойная звезда), питающим 1 000-kW, 250-V 6-анодный инверсионный выпрямитель. Температура при опытах замерялась при помощи термпар; выпрямитель при этом работал с пятью или тремя анодами при нагрузке от 2 300 до 4 000 А с незарегулированным и на 15% зарегулированным напряжением. Опыты показали, что нагрев сердечника трансформатора, а следовательно, и масла не зависит от числа работающих анодов выпрямителя и не является фактором, лимитирующим нагрузку при данных условиях работы. Температура сердечника при нагрузках, колеблющихся в пределах 57,7—100% от номинальной, и при работе выпрямителя с 3—5—6 анодами не поднималась при опытах выше 45—59°С над окружающей температурой, что менее допустимых 65°С.

Однако мощность выпрямителя должна быть снижена с тем, чтобы ток в обмотках трансформатора не превосходил нормальной величины. Как показали те же опыты при работе с 5 анодами и при нагрузке на стороне выпрямленного тока, равной 83,3% от номинальной, токи в ветвях полной вторичной звезды равнялись 110—139% от номинальных, а в половине разделяющей катушки — 127%. При работе же на 3 анодах и при нагрузке 66,7% токи этой звезды и в ветви разделяющей катушки составляли 133%. Первичные токи соответственно равнялись 105 и 102% от номинальных.

При работе с неполным числом анодов изменяются и растут также и величины и формы кривой тока и напряжения, увеличивая в итоге вероятность образования обратных зажигания. Поэтому снижение мощности выпрямителя снижает и возможное число обратных зажигания. Выводы, к которым приходит автор статьи, сводятся к следующему: 1) температура сердечника трансформатора при работе выпрямителя с неполным числом анодов хотя и вырастает, но не выходит за предел допустимой; 2) из-за небаланса токов необходимо снизить нагрузку выпрямителя до 60% при схеме соединения двойная звезда и до 50% — при двойной двухфазной схеме; 3) при работе на одной лишь звезде обмотки трансформатора наблюдаются большие намагничивающие токи; 4) при уменьшенной нагрузке частота обратных зажигания не увеличивается, если даже выпрямитель работает с уменьшенным числом анодов в схеме двойной звезды.

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

V. Siegfried. Факторы, влияющие на работу двигателей постоянного тока, питаемых выпрямителями. *El. Eng., стр. 530—532, № 7, 1944.*

Управляемые выпрямители за последние годы нашли широкое применение в качестве источников, питающих двигатели постоянного тока. Однако при применении выпрямителей должно быть уделено значительное внимание форме кривой их тока.

В зависимости от схемы выпрямления (однополупериодной, двухполупериодной) этот ток может быть пульсирующим, но не прерывистым или же прерывистым в течение большей части периода. Подобный ток является отличным от обычного постоянного тока и может создать и вызвать ряд неожиданных явлений. Впрочем при большом числе вентилей пульсации тока сглаживаются и результирующий ток близок к току обычного генератора.

При анализе работы двигателей постоянного тока, питаемых от выпрямителей, должны быть учтены следующие факторы: 1) ток, создаваемый выпрямителем, является пульсирующим; 2) пульсирующий ток может иметь пик, значительно превосходящие средние значения тока; 3) нагревательные действия этого пульсирующего тока значительно больше, чем эквивалентного значения обычного постоянного тока (следствие больших потерь I^2R); 4) пик напряжения, прикладываемые к якору и коллектору, опасны для их изоляции и 5) вращающий момент, образуемый машинами, получается пульсирующим.

Анализ влияния этих токов на работу двигателей показывает, что, например, при однополупериодном выпрямлении среднее значение тока I за весь период пропорционально

отношению угла проводимости τ к всему периоду T , где как и эффективное значение, которое является корнем квадратным из суммы квадратов. Для случая, изображенного на рисунке, эффективное значение тока будет $0,5 I_m$, а фактическое значение составит $0,318 I_m$, что даст соотношение ток равно $1,57 : 1$. Нагревающий эффект волны (I^2R) будет в точности соответственно $0,25 I_m^2$ и $0,101 I_m^2$, что даст уже соотношение, равное $2,5 : 1$.

Как следует из приведенного примера, двигатель при прерывистом токе благодаря потерям в меди нагревается весьма значительно. Если ток даже и может быть в значительной степени сглажен, пульсирующий высокочастотный ток создаст потери от токов Фуко.

Другими факторами, совместно действующими на изоляцию двигателей, являются вибрация и перенапряжения.

Заключения, к которым приходит автор статьи при анализе режима работы двигателей постоянного тока, питающихся от управляемых выпрямителей, сводятся в основном к тому, что конструкция машин должна быть изменена, поскольку необходимо учитывать пульсации тока, вращающего момента и потока, наложенные на соответствующие значения постоянного тока.

Инж. М. Д. ТРЕЙВАС

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

G. M. Woods. Эффективность троллейбуса. *El. Eng., стр. 578—580, Т. 8, 1944.*

Начиная с 1928 г., троллейбус зарекомендовал себя как эффективный вид городского транспорта и получил в США в течение короткого времени широкое развитие. В результате этого развития к началу 1944 г. в США и Канаде насчитывалось уже свыше 3 500 троллейбусов против 500 в 1931 г. Пассажироперевозки, освоенные троллейбусом в 1943 г. составили 1 200 млн. пассажиров против 80 млн. в 1934 г.

Распределение подвижного состава троллейбусов по группам городов в зависимости от численности населения представляется в следующем виде:

Население городов	до 50 000	50 000 до 100 000	100 000 до 250 000	250 000 до 500 000	500 000 до 1 000 000	Свыше 1 000 000
Число троллейбусов	250	390	700	1 500	500	1 250

Таким образом 76% всех эксплуатирующихся в США Канаде троллейбусов приходится на города с населением от 100 000 до 1 000 000 жителей, а на города с населением 250 000—500 000 жителей приходится 43%.

Число перевезенных троллейбусом в 1934 г. пассажиров в США составило 0,6% к общим пассажироперевозкам всеми видами городского транспорта, а в 1944 г. оно достигло в среднем 5,3%, а для городов с населением от 500 000 до 1 000 000 составило 8,7%. Интересно отметить, что в отдельных городах западных штатов удельные пассажироперевозки, приходящиеся на троллейбус, достигли в последнее время 20%, а в часы пик для вновь построенных троллейбусных линий достигали даже 47%.

Троллейбус выгодно отличается от трамвая как по первоначальной стоимости сооружения, так и по стоимости подвижного состава. Так, например, если в США сооружение одного км двойного пути обходится для трамвая в 62 500 долларов (100%), то стоимость сооружения двухпутной троллейбусной линии составляет всего 4 400—12 500 долларов (7—20%), в зависимости от степени необходимой реконструкции дорожного покрытия. Стоимость приобретения подвижного состава троллейбуса определяется в 13 000 долларов (100%) для трамвая составляет 18 000 долларов (150%) и для автобуса 12 000 долларов (93%). Стоимость текущего ремонта троллейбуса — 170 долларов на 1 000 троллейбусокilометров, причем на резину падает 90% указанных расходов. Стоимость текущего ремонта современного трамвая составляет 105—120 долларов на 1 000 вагонокilометров, тогда как стоимость текущего ремонта автобуса достигает 250—310 долларов на 1 000 автобусокilометров. Суммарный расход электроэнергии на троллейбус составляет в среднем 2,37 kWh на троллейбусокilометр, что соответствует 180 Wh/tkm, тогда как для трамвая удельный расход электроэнергии определяется в 3,37 kWh на вагонокilометр, что соответствует 185 Wh/tkm.

ная относительная стоимость эксплуатации различных городского транспорта (без учета административных) приводится в таблице.

Наименование	Троллей-бус	Трамвай	Автобус
Стоимость (мест для сиденья)	44	52	29
в перевезенных пассажирах за рейс	32	39	18
стоимость эксплуатации одного пассажира, приходящаяся на экипаж в час	80	80,5	62
стоимость эксплуатации одной транспортной единицы, %	100	141	107
стоимость эксплуатации, приходящаяся на одного пассажира, %	100	140	138

Перечисляя достоинства троллейбуса, автор отмечает, что троллейбус обладает на 10—15% более высокой эксплуатационной скоростью по сравнению с автобусом. Автор констатирует, что за последние годы в США произошли крупные изменения в электрооборудовании троллейбусов. Так, если раньше троллейбус, как правило, оборудовался 2 тяговыми двигателями мощностью по 48 kW каждый, то в последние годы стали применяться троллейбусы, оборудованные одним тяговым двигателем мощностью 92 kW, а в самое последнее время даже мощностью 102 kW. Применение одного тягового двигателя позволило сильно упростить трансмиссию троллейбуса. В современных троллейбусах нашло широкое распространение электрическое торможение, при котором тормозное усилие при служебном торможении составляет 0,9 m/sec², при экстренном 1,34—1,78 m/sec².

Рассматривая вопросы организации движения, автор считает наиболее целесообразным соблюдать интервал между троллейбусами в 4—5 мин, допуская для отдельных малозагруженных линий интервалы, не превышающие 15—20 мин.

В заключение автор указывает на целесообразность применения для троллейбусных двигателей посторонней системы вентиляции, указывая на большую рентабельность вентилятора, работающего с постоянной скоростью, а также на возможность использования тепла, излучаемого тяговыми двигателями, для внутреннего отопления троллейбуса, подобно тому как для той же цели уже используется тепло, излучаемое пусковыми двигателями. Посторонняя вентиляция обеспечит также возможность лучшего использования мощности тягового двигателя.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН

Проект электрификации линии Париж — Дижон — Лион. *Railway Gazette*, стр. 207, № 9, 1945.

Линия Париж — Лион протяжением 511 km намечается для электрификации на постоянном токе 1500 V. Линия будет снабжаться электроэнергией от находящейся в постройке гидроэлектростанции Жениссон на Роше от запроектированной гидроэлектростанции на реке Дордонь вблизи Бар-Лез-Орг, от гидроэлектростанции Марез и некоторых других. Распределение электроэнергии с указанных электростанций будет осуществляться по линиям электропередачи 150 и 220 kV.

Переменный трехфазный ток будет преобразовываться в постоянный на 51 стационарных и 1 передвижной ртутно-выпрямительных подстанциях с 93 установленными агрегатами по 4000 kW. Передвижная подстанция временно устанавливается в конце электрифицированного участка в Шассе в 19 km от Лиона, где кончается электрифицированный участок. Резервная мощность обеспечивается четырьмя передвижными подстанциями с одним ртутным выпрямителем каждая.

Тяговые подстанции оборудуются телеуправлением с диспетчерских пунктов, расположенных в Париже, Дижоне и Лионе. Из 51 подстанций — 21 одноагрегатная, 19 — двухагрегатных и 11 — трехагрегатных. Система распределительных подстанций может потребовать в некоторых случаях ограничения мощности, потребляемой подвижным составом. Для этой цели вдоль линии устанавливаются специальные сигналы, управляемые из диспетчерских пунктов.

Контактная сеть запроектирована по стандартной для французских железных дорог колаундной системе, однако для несущего троса предусмотрено применение сталь-алюминиевого голого кабеля.

Парк подвижного состава должен включать 95 электропоездов для обслуживания скорых поездов с формулой осей 2-D-2 и 152 электропоезда В-В для товарных и пригородных поездов. Электропоезда 2-D-2 несколько модернизируются, причем их длительная мощность повышается до 4000 л. с., а давление на ведущую ось — до 22 t. Маневровая работа на электрифицированной линии также будет обеспечиваться электропоездами типа СС и ВВ. Перевод маневровой работы на электрическую тягу должен обеспечить годовую экономию в 49 000 t угля.

В целом введение электрической тяги на линии Париж — Лион должно дать годовую экономию угля в 600 000 t. Годовой расход электрической энергии оценивается величиной около 440 млн. kWh.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Кремнеорганические диэлектрики. *British Plastics*, стр. 181, № 171, 1943 и т. 14, № 159, стр. 152, 1942; *Chemical Trade Journal*, т. 110, № 2864, стр. 371, 1942; P. L. Alger, GER, т. 45, № 2, стр. 82, 1942; E. G. Rochow a. W. F. Gilliam, *Journal of the American Chemical Society*, т. 63, стр. 798, 1941.

Среди появившихся за последние годы новых электроизоляционных материалов исключительный интерес представляют смолообразные кремнеорганические соединения, состоящие из C, H, O и Si, причем основной скелет молекулы образован атомами Si и O. Эти соединения (наиболее распространенное торговое наименование — Silicone) изготавливаются в промышленном масштабе в Англии фирмой British Thomson-Houston Co (на основе работ известного исследователя V. E. Yarsley; в США для их производства химическим концерном Dow и стекольным заводом Corning Glass Works организовано специальное общество Dow-Corning Corp.

Силиконы принадлежат к термореактивным материалам; в исходном состоянии они растворимы в спиртах и эфирах, но после термообработки становятся нерастворимыми и неплавкими. Они используются в виде пластмасс, пленок, при изготовлении лаков и пр. Они прозрачны и бесцветны. Удельный вес их близок к 1,19. Особо замечательна их выдающаяся нагревостойкость: они длительно выдерживают на воздухе без видимых изменений температуру 200°C, а в вакууме или в водороде могут в течение часов подвергаться нагреву даже до 500°C. Электроизоляционные свойства силикона (типичные значения): $\epsilon \approx 0,008$ при 26°C и 0,0045 при 56°C; диэлектрическая проницаемость при тех же температурах соответственно 3,7 и 3,6.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

Кандидат техн. наук Б. М. ТАРЕЕВ

С. Т. Hatcher. Эксплуатация газонаполненного кабеля низкого давления. *El. Eng., стр. 788—792, в. 63, 1944.*

Газонаполненный кабель низкого давления служит с 1938 г. предметом интенсивного обсуждения в иностранных электротехнических кругах. До сего времени освещались только теоретические предпосылки конструкции и результаты обширных лабораторных исследований. В настоящей статье впервые даны фактические сведения о результатах эксплуатации разных типов газонаполненного кабеля низкого давления в системе Consolidated Edison Co (Нью-Йорк).

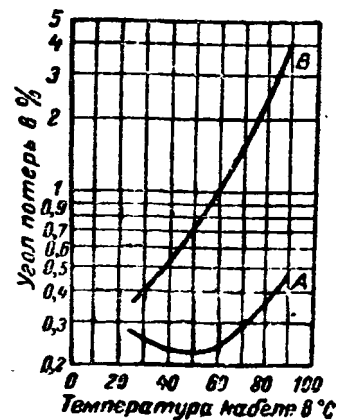
В системе работает уже 21 фидер, в числе которых имеются газонаполненные кабели. Один из фидеров на рабочее напряжение 13,2 kV имеет трехжильный кабель сечением 406 мм², длиной около 10 км. Два фидера имеют трехжильные кабели длиной около 1,7 км, рассчитанные на рабочее напряжение 27 kV; кабели проложены в туннеле под рекой и имеют вертикальные участки длиной около 75 м по обоим концам туннеля. Большая часть остальных фидеров имеет относительно короткие участки газонаполненного кабеля. Во многих случаях применен для ввода в станцию газонаполненный одножильный кабель крупного сечения и осуществлено его соединение с несколькими кабелями более мелкого сечения. На 1 июня 1944 г. в системе было проложено около 42 км газонаполненного кабеля низкого давления на напряжение от 15 до 27 kV сечением от 250 до 1 270 мм².

Конструкция трехжильного кабеля в 1938 г. имела три спиральные трубки в местах заполнения. Вследствие истечения масла из изоляции в этих трубках образовались пробки, вызывающие сопротивление канзлов и препятствующие протеканию азота. Поэтому в последующих конструкциях применен фидер, в котором один из газовых каналов изготовляется из одной трубки.

В одножильном кабеле конструкция оболочек отливается из медной ленточкой или из свинцовой оболочки.

В стандартной конструкции применен фидер, в котором оболочка отливается из свинцовой оболочки.

среднем градиенте 1,73 kV/mm, не работал 17 месяцев, а затем опять работал в течение 27 месяцев при среднем градиенте 2,1 kV/mm. Результаты измерений потерь на этом участке кабеля показаны на рисунке. Измерения угла потерь на главных лентах и их осмотр не обнаружили признаков разгерметизации. Анализ величин диэлектрических потерь показывает, что в 15-kV кабеле имело место большое возрастание потерь тогда как в 27-kV кабеле потери почти не возросли. Кроме более длительного периода эксплуатации единственная причина заключалась в значительно большем количестве азота



Угол потерь 15-kV трехжильного газонаполненного кабеля. Сечение 406 мм²; давление азота 1,12 ат; толщина изоляции 3,8 мм;

A—перед сдачей в эксплуатацию; B—после 15 месяцев работы, 17 месяцев перерыва и 27 месяцев работы.

накачанном в 15-kV кабель после прокладки. Возможно, что изоляция поглотила примеси кислорода в азоте, вследствие чего произошло окисление, которое привело к возрастанию потерь.

Подводя итоги опыта эксплуатации газонаполненного кабеля низкого давления, можно констатировать отсутствие пробоев кабеля по причине электрического разрушения изоляции; возможность немедленного обнаружения дефектов в оболочках кабеля и муфтах и их ликвидации раньше, чем в кабель попадает влага; стабильность работы газонаполненных кабелей; отсутствие серьезных затруднений при эксплуатации газонаполненных кабелей, проложенных на участках с большой разностью уровней.

Кандидат техн. наук И. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН

СВЕТОТЕХНИКА

А. С. Barr. Влияние схем включения на характеристики флуоресцирующих ламп. *El. World., стр. 91—92, № 8, 1944.*

Статья представляет собой краткий анализ различных схем включения флуоресцирующих ламп с холодными и подогревными катодами. Автор указывает, что до сих пор в практике осуществления установки выбирался тип лампы, а принцип той или другой схемы включения носил чисто случайный характер. В связи с дальнейшим развитием ламп и уровнем включения для них выбору схемы необходимо уделять должное внимание, так как это в конечном итоге определяет характеристику осветительной установки.

Парадигма с распространенными схемами параллельного включения флуоресцирующих ламп с подогревными катодами и наличием от стартера и последовательного включения лампы с холодными электродами сравнительной оценке подвергаются. Схемы параллельного и последовательного включения подогревных ламп при зажигании без стартера и параллельная схема эксплуатации высоковольтных трубок от двух приборов включения. Анализ схем затрагивает использование, срок службы ламп, расход металлов, общую стоимость приборов включения, безопасность и другие элементы эксплуатации установок.

В таблице показаны различные схемы сведены в таблицу: схемы имеют свои положительные и отрицательные стороны, некоторые из них применяются в эксплуатации.

№ схем	1	2	3	4	5
Ко включаемых ламп, шт.	2	2	2	12	12
Включение ламп	Параллельное			Последовательное	
Тип ламп	Трубки 40 W с подогревными катодами		Трубки 2,36 м Ø 25 мм с холодными электродами	Трубки 40W с подогревными катодами	Трубки 2,36 м Ø 20 мм с холодными электродами
	Схема со стартером	Схема без стартера			
Балластное сопротивление	Дроссели и конденсатор	Дроссели и конденсатор	Дроссели и конденсатор	Трансформатор с большим магнитным рассеянием	Трансформатор с большим магнитным рассеянием
Напряжение питания V	208	450	750	4 000	12 000
Напряжение на лампах V _л	103	108	450	1 295	6 420
Рабочий ток ламп A	0,41	0,41	0,12	0,41	0,10
Потери в приборе включения в % от общей мощности	18	26	24	15	16
Зажигание при повышенной влажности	Нормально	Затруднено	Затруднено	Нормально	Нормально
Зажигание при пониженной температуре	Затруднено	Затруднено	Затруднено	Нормально	Нормально

равнительно недавно и являются еще экспериментальными, поэтому ни одна из рассматриваемых схем не может быть еще признана универсальной для осветительной техники.

Кандидат техн. наук Р. Г. ИЗВЕКОВ

РАЗНОЕ

E. W. Tipton. Тепловое реле для сухих трансформаторов. Westinghouse Eng., стр. 187—189, № 6, 1944.

За последние годы в США все большее распространение получают сухие распределительные трансформаторы малых и средних мощностей с изоляцией повышенной теплостойкости. До последнего времени не имелось специальных реле для защиты таких трансформаторов. В связи с этим фирмой Westinghouse было разработано температурное реле, предназначенное для защиты трансформаторов с воздушным охлаждением от перегрузок. В качестве рабочих элементов использованы две биметаллические пластины, включенные последовательно во вторичную цепь трансформатора тока. Ввиду малой мощности контактов для замыкания цепи оперативного тока используется промежуточное реле. Один элемент реле действует на сигнал, второй — при достижении несколько более высокой температуры — на выключение.

Как показали исследования, в сухих трансформаторах максимальные перегревы имеют место в средней части наружного слоя обмотки низкого напряжения. В соответствии с этим реле устанавливается непосредственно на обмотки средней фазы таким образом, чтобы в него попадал воздух, подымающийся по охлаждающему каналу между наружной поверхностью обмотки низкого напряжения и изоляционным цилиндром. Таким образом биметаллические пластины принимают температуру, пропорциональную температуре наиболее горячего воздуха. Кроме того через них протекает ток, пропорциональный нагрузочному току трансформатора. Сопротивление и охлаждающая поверхность пластин выбраны с таким расчетом, чтобы перепад температуры между ними и охлаждающим воздухом был пропорционален перегреву наиболее горячего места обмотки над охлаждающим воздухом. Благодаря этому изменение во времени температуры биметаллических пластин воспроизводит таковое наиболее горячей точки обмотки трансформатора.

Реле допускает перегрузки трансформатора такой величины и длительности, при которых температура обмотки в наиболее горячем месте к концу перегрузки достигает установленного допустимого предела. Следует отметить, что при этом нагрузочная способность трансформатора, конечно, полностью не используется, так как за счет предшествующих недогрузок можно было бы допустить и более высокие температуры, не увеличивая в целом относительного износа изоляции. Кроме того реле обеспечивает также защиту от сквозных токов короткого замыкания, так как при этом контакты замыкаются почти мгновенно под действием одного только тока, нагревающего рабочие элементы реле.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

H. F. Storm. Расчет поля в цилиндре применительно к задачам индукционного поверхностного нагрева. El. Eng., стр. 749, № 10, 1944.

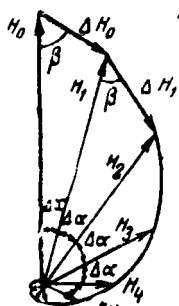
Автор рассматривает квазистационарное поле внутри массивного бесконечно длинного цилиндра из проводящего или ферромагнитного материала, помещенного в бесконечно длинный цилиндрический индуктор. В отличие от известного решения задачи в функциях Бесселя изложенное решение проводится с помощью векторных диаграмм. Магнитная проницаемость цилиндра считается постоянной.

Массивный цилиндр подразделяется на цилиндрические оболочки толщиной Δr . Обозначим вектор напряженности поля в зазоре между индуктором и первой оболочкой через H_0 . Вектор напряженности поля между первой и второй оболочками будет меньше H_0 по величине и сдвинут относительно него по фазе на угол $\Delta\alpha$ вследствие экранирующего действия первой оболочки.

Продолжая рассуждение для других оболочек, получаем для напряженности поля в цилиндре спиральную векторную диаграмму, из которой следует

$$H_m = H_0 e^{-(m \Delta\alpha) \operatorname{ctg} \beta}. \quad (1)$$

Магнитный поток оболочки равен произведению средней напряженности поля на магнитную проницаемость и площадь поперечного сечения оболочки, которую можно счи-



тат одинаковой для всех слоев, ближайших к наружной поверхности цилиндра.

$$\Phi_m = H_{mcp} \cdot \mu \Delta r \cdot 2\pi a, \quad (2)$$

где a — радиус цилиндра.

Из диаграммы магнитных потоков находится суммарный поток в цилиндре, как векторная сумма частичных потоков в оболочках. Вектор полного потока Φ сдвинут по фазе на угол $\beta = 45^\circ$ относительно вектора тока в индукторе.

В статье далее показано, что напряженность поля в цилиндре на расстоянии d_{cm} от поверхности может быть представлена в виде:

$$H_d = H_0 \cdot e^{-\frac{d}{p\sqrt{2}}}, \quad (3)$$

$$\text{где } p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^9}{2\mu f}} \text{ см.} \quad (4)$$

Настил токов на поверхности

$$K_0 = \frac{In}{p} \text{ А/см}^2, \quad (5)$$

где n — число витков на погонный сантиметр индуктора.

Плотность тока на расстоянии d от поверхности

$$K_d = K_0 \cdot e^{-\frac{d}{p\sqrt{2}}} \text{ А/см}^2. \quad (6)$$

Количество тепла, выделяющееся в 1 см длины цилиндра,

$$P = 4\pi^2 a (In)^2 \sqrt{\mu f \rho} \cdot 10^9 \cdot 10^{-9} \text{ В/см.} \quad (7)$$

В заключение автор определяет эквивалентное полное сопротивление вторичной цепи индуктора с металлическим цилиндром:

$$\bar{Z}_a = R_a (1 + j) \Omega/\text{см}, \quad (8)$$

где

$$R_a = \frac{P}{I^2} \Omega/\text{см}. \quad (9)$$

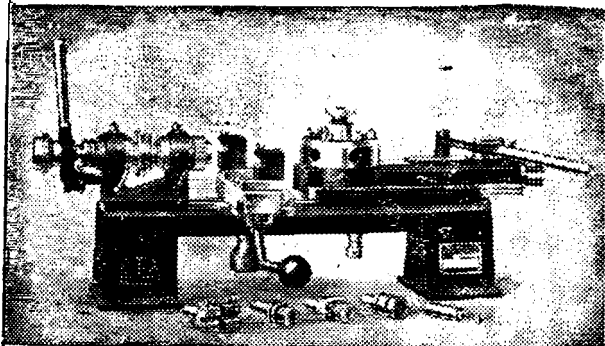
Полное сопротивление получится, если добавить к выражению (8) активное и реактивное сопротивление обмотки индуктора.

Кандидат техн. наук М. С. ЛИБКИН

МИНИАТЮРНЫЕ СТАНКИ **PULTRA**

для ПРЕЦИЗИОННЫХ РАБОТ

В ЧАСОВЫХ МАСТЕРСКИХ, МАСТЕРСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ, МАСТЕРСКИХ ДЛЯ
ИСПЫТАНИЯ И РЕМОНТА СЧЕТЧИКОВ и т.п.



На иллюстрации изображен станок типа MU 42, одна из многих моделей О-ва Пультра.
Высота центров: 50 мм. Диаметр шпинделя в свету: 10 мм.
Пределы скоростей: для моделей с моторным приводом от 400 до 6000 об. в мин.

ИМЕЮТСЯ МНОГОЧИСЛЕННЫЕ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

PULTRA LTD

24, GRAVEL LANE, SALFORD
MANCHESTER — АНГЛИЯ

Поставщики Великобритании Правительства

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ОТКРЫТА ПОДПИСКА НА 1946 год
на журнал

«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

орган Академии наук СССР, Народного комиссариата электростанций СССР и Народного комиссариата электропромышленности СССР

Основан в 1880 г.

12 номеров в год.

Теоретический научно-технический печатный орган, посвященный проблемам электрофизики и электротехники в связи задачами развития электрификации СССР. Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области научного исследования и практического применения электричества

Подписная цена на год 96 руб.

Подписка принимается отделениями Союзпечати и всюду на почте.

СЛЮДА И МИКАНИТ

ВСЕХ ВИДОВ И КАЧЕСТВ

**Промасленная хлопковая материя
и ленты**

**Хлопковые изоляционные ленты
для динамомашии**

Асбестовые обшивочные полосы

**Листы, трубки и стержни из
вулканизированной фибры**

Прессшпан и гладкий спрессованный картон

**Листы, трубки и стержни из
эбонита**

ЛИСТОВОЙ БАКЕЛИТ

МАРКИ „BAKELAQUE“

Трубки, стержни и отливки

**Синтетические смолы (фенол и
крезол)**

Пластмасса в порошке для отливки

ATTWATER & SONS LTD.

HOPWOOD STREET MILLS
PRESTON, АНГЛИЯ

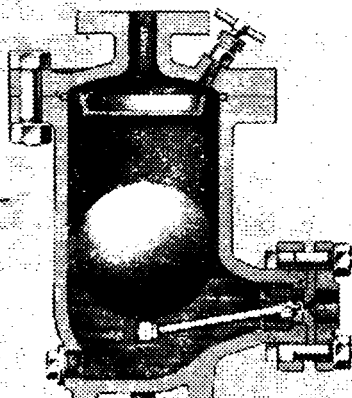
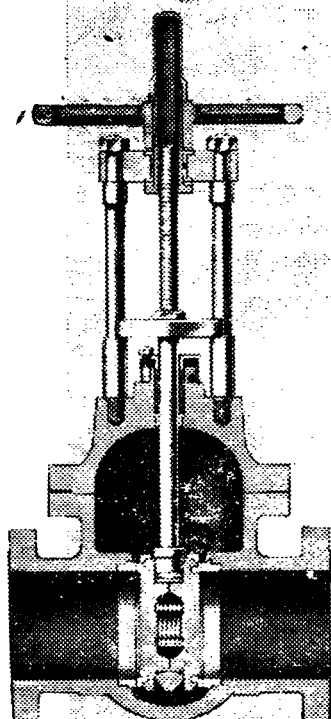
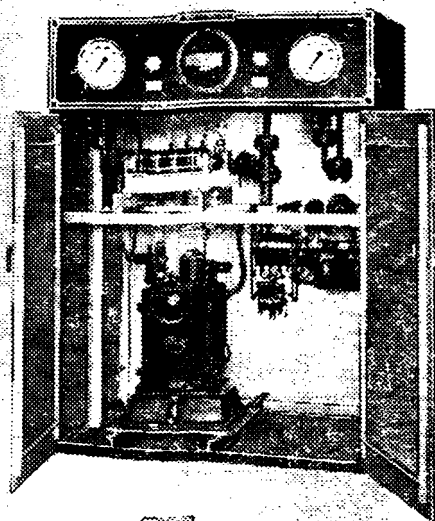
Фирма существует с 1868 года.

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли.

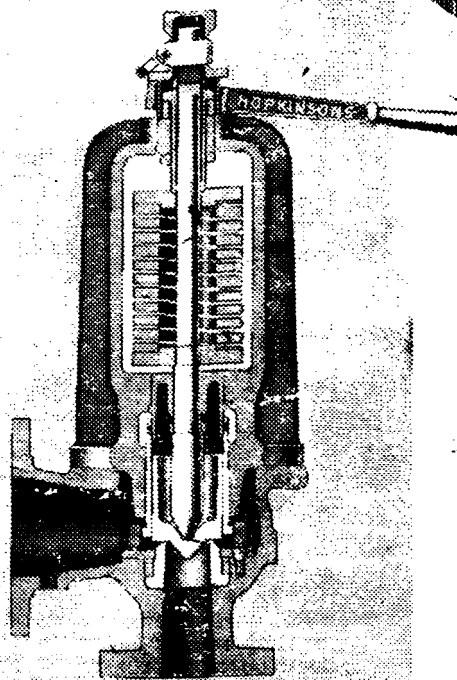
СОДЕЙСТВИЕ ПОБЕДЕ

Большое количество котельной арматуры, клапанов и специального оборудования ГОПКИНСОН доставлено для существенно необходимых назначений в новых силовых станциях и на заводах С.С.С.Р. во время великой и победоносной борьбы с захватчиками.

В военное, как и в мирное время, марка ГОПКИНСОН является гарантией самой продолжительной, надежной и бесперебойной работы в тяжелых условиях.



Котельная арматура
и клапаны для всех
давлений и температур.



HOPKINSONS LIMITED

HUDDERSFIELD - ENGLAND

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ НКЭС СССР

Москва, Шлюзовая набережная, 10

**Открыта подписка на 1946 год
на энергетические журналы**

„Электрические станции“

Орган НКЭС СССР

Год издания 17. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал электростанций и сетей, проектирующих и производственных организаций, заводов, изготовляющих электрооборудование, работников НИИ и студентов вузов.

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Орган Академии наук СССР,
НКЭС СССР и НКЭП СССР

Основан в 1880 г. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области научного исследования и практического применения электричества.

„ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО“

Производственно-технический и экономический
журнал НКЭС СССР

Год издания 15. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал строительства и эксплуатации гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений, проектно-исследовательских организаций, научно-исследовательских институтов и на студентов вузов.

„Торфяная промышленность“

Орган НКЭС СССР

Год издания 23. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на руководящих работников, инженеров, техников и передовых рабочих торфяной промышленности.

„ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА“

Орган Госинспекции по промэнергетике
и энергонадзору при НКЭС СССР

Год издания 3. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на инженеров и техников, работающих в области промэнергетики, энергетиков, технологов цехов, заводов, главков наркоматов.

„ВЕСТИНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ“

Орган НКЭП СССР

Год издания 17. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 54 руб.

Журнал рассчитан на инженерно-технический персонал цехов проектно-конструкторских бюро, лабораторий заводов и научно-исследовательских институтов.

„За экономию топлива“

Орган Главснабугля при СНК СССР

Год издания 3. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 96 руб.

Журнал рассчитан на руководящих работников, инженерно-технических работников предприятий промышленности и транспорта и квалифицированных рабочих.

Известия Всесоюзного ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО института им. Ф. Дзержинского

Год издания 15. № 12 номеров в год
Подписная цена на год 48 руб.

Журнал рассчитан на работников электрических станций, энергомашиностроительных заводов, проектных и научно-исследовательских организаций, лабораторий, а также работников и учащихся вузов.

ПОДПИСКА ПРИНИМАЕТСЯ СОЮЗПЕЧАТЬЮ И ВСЮДУ НА ПОЧТЕ.