

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ем Маркса — Энгельса — Ленина — Сталина, под руководством коммунистической партии — вперед, к победе коммунизма! всех стран! Мир будет сохранен и упрочен, если народы сохранения мира в свои руки и будут отстаивать его до единства народов в борьбе за мир!
чет прочный мир между народами!

(Из призывов ЦК КПСС к 1 мая 1955 года)

Анализ системы управления реверсивным прокатным станом

Кандидат техн. наук **О. В. СЛЕЖАНОВСКИЙ**

Государственный союзный трест «Электропривод»

Многим системам электромашинного управления реверсивными прокатными станами присущ ряд недостатков [Л. 1]. С целью устранения основных из них была создана система, показанная на рис. 1.

При рассмотрении она может быть разделена условно на две системы: 1) управления возбуждением генератора и 2) управления возбуждением прокатного двигателя.

Первая система включает усилитель генератора УГ, возбудитель генератора ВГ, генератор Г, эталонный генератор ЭГ, стабилизирующие трансформаторы Т1, Т2 и Т3¹. Вторая включает возбудитель двигателя ВД, усилитель регулятора мощности УТ и прокатный двигатель Д.

УГ имеет четыре обмотки: задающую з0; управляющую (дифференциальную) у0, которая шунтирована нелинейными сопротивлениями; стабилизирующую со и обмотку ограничения тока рекуперации ор, действующую только при торможении двигателя со скорости выше основной. Шунтирование управляющей обмотки УГ нелинейными сопротивлениями (селеновыми выпрямителями) позволяет ограничить в обмотке ток в режимах торможения по ступеням скорости, когда вследствие уменьшения эталонного напряжения к обмотке прикладывается повышенная разность напряжений.

ЭГ, напряжение которого определяет напряжение генератора Г, имеет две обмотки: задающую зэ и дифференциальную дэ. Применение

дифференциальной обмотки у эталонного генератора исключает влияние поля остаточного магнетизма в машине и обеспечивает устойчивое поддержание заданного напряжения, существенно сказывающегося на величине напряжения генератора.

ВД имеет три обмотки: задающую зд; шунтовую (токовую) што и сравнения ос, действующую навстречу двум первым.

УТ по исполнению аналогичен усилителю УГ. Его обмотки носят названия: токовая то; запрета перемагничивания зп; основная и вспомогательная обмотки сравнения ос1 и ос2, служащие в качестве эталона.

Управление двигателем до основной скорости производится путем изменения подводимого напряжения, а выше основной — путем изменения его потока возбуждения. При этом режимы управления возбуждением генератора и прокатного двигателя при разгоне на повышенную скорость разделены. Запрет ослаблению потока возбуждения двигателя снимается только при напряжении генератора, близком к номинальному после включения реле РН.

В системе использованы следующие основные аппараты: 1В, 1Н — реверсивные контакторы направления; 2В, 2Н — реверсивные контакторы направления, которые в отличие от 1В и 1Н при реверсировании не могут быть включены до момента отпадания контакторов БН и БВ; БВ, БН — блокировочные контакторы направления, включаются одновременно с 2В, 2Н и отпадают при напряжении генератора, близком к нулю; 1РН — реле напряжения, отпадает при напряжении генератора около 10% номинального; РС — реле напряжения, включается и отпадает при скорости двигателя близкой к номинальной; ВН — реле напряжения, включается при напря-

¹ Если для питания прокатного двигателя применяется маховичный преобразовательный агрегат, то контроль возбуждения генератора осуществляется по его току возбуждения. При этом эталонный генератор и трансформатор Т3 из схемы исключаются, а потенциометр эталонного напряжения включается непосредственно на напряжение цепи управления.

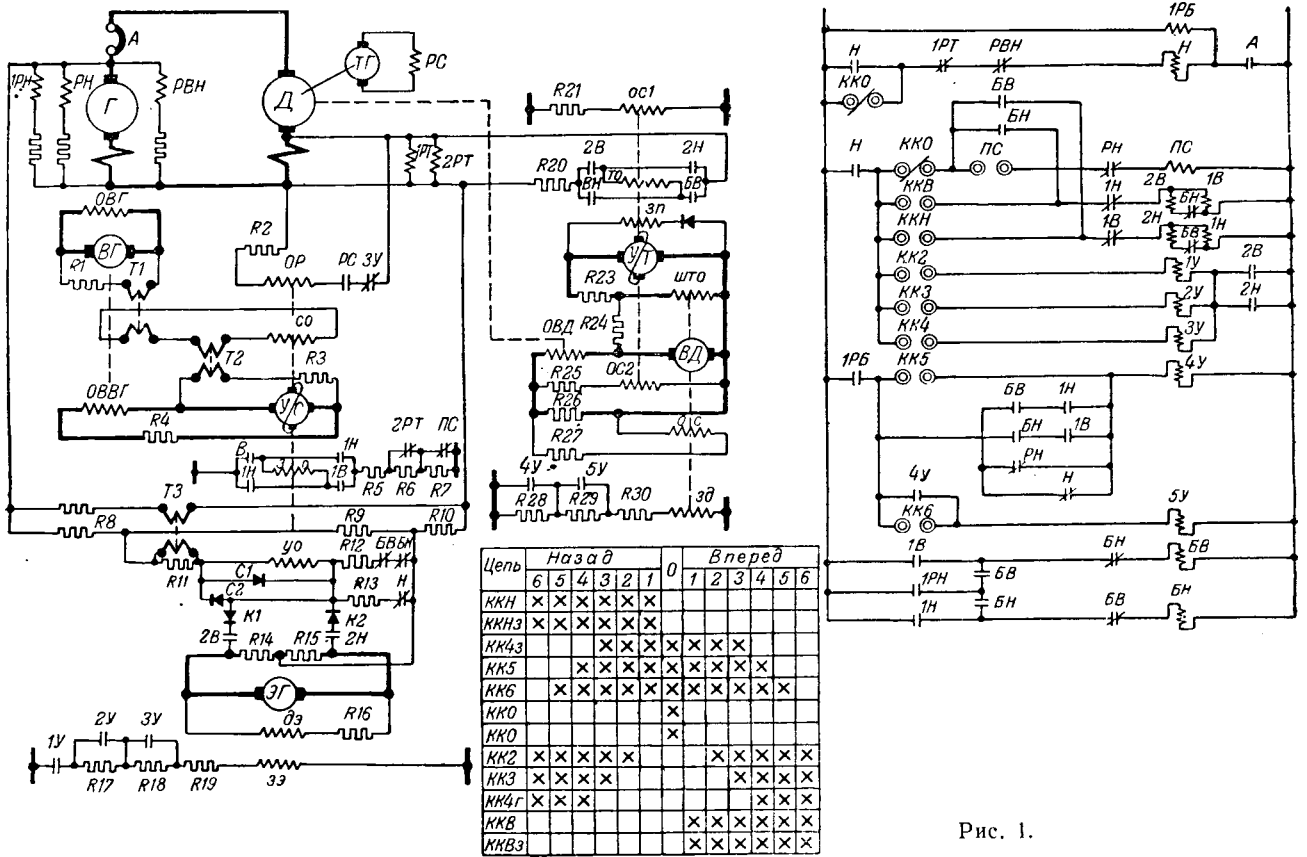


Рис. 1.

жени генератора, близком к номинальному; 1PT, 2PT — реле токовые, включаютсЯ при перегрузках; PBH — реле защиты от перенапряжения генератора; PB — реле блокировочное, служит для снижения тока возбуждения прокатного двигателя при отключении автомата; PC — реле «ползучей» скорости; H — контактор защиты.

Построение статических характеристик. Статические характеристики системы управления возбуждением генератора (рис. 2) строятся аналогично изложенному в [Л. 1]. Однако процесс определения напряжения генератора U_2 ,

соответствующего произвольно принятым значениям н. с. F_y управляющей обмотки УГ, усложняется, так как необходим учет всех нелинейных элементов. Для этого следует задаться н. с. F_y и определить падение напряжения в управляющей обмотке УГ $\Delta U = R_y i_y$. По характеристике $r_{c1} = f(\Delta U)$ выпрямителя С1 находится его сопротивление и затем рассчитывается ток i_c . Сопротивление выпрямителя К1 находится по его характеристике $r_k = f(i)$, исходя из величины общего тока, состоящего из суммы: $i_y + i_c$.

Полученные значения сопротивлений нелинейных элементов схемы позволяют перейти к определению напряжения генератора U_2 при заданной н. с. F_y :

$$U_2 = \frac{R_{n2}}{R_9} \left[\frac{R_{14}}{R_{nc}} U_{a2} + \left(R_{s1} + R_{s2} + r_{k1} + R_9 + R_{14} - \frac{R_{14}^2}{R_{nc}} - \frac{R_9^2}{R_{n2}} \right) i_{обш} \right] = \frac{R_2}{R_9} \left(\frac{R_{14}}{R_{nc}} U_{a2} + R_{np} \cdot i_{обш} \right),$$

где $R_{nc} = R_{14} + R_{15}$ — сопротивление эталонного потенциометра;

$R_{s1} = \frac{R_{11} R_{T3}}{R_{11} + R_{T3}}$ — сопротивление параллельно включенных стабилизирующего трансформатора ТЗ и сопротивления R_{11} ;

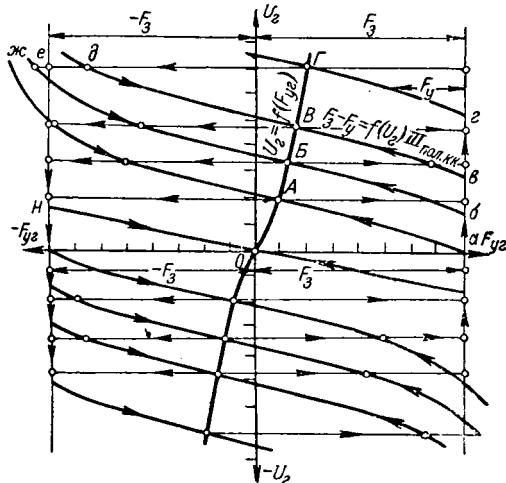


Рис. 2. Статические характеристики управления возбуждением генератора.

Точки А, Б, В и Г соответствуют установившимся значениям напряжения генератора.

$R_{n2} = R_8 + R_9 + R_{10}$ — сопротивление потенциометра генератора;

$R_{\partial 2} = \frac{R_c R_y}{R_c + R_y}$ — сопротивление параллельно включенных выпрямителя и обмотки y_0 ;

$r_{\kappa 1}$ — сопротивление выпрямителя KI ;

$i_{05\mu} = i_c + i_y$ — сумма токов, протекающих в обмотке y_0 и выпрямителе CI ;

$U_{\partial 2}$ — напряжение эталонного генератора.

Таким образом, задаваясь рядом значений н. с. F_y , можно найти напряжение генератора U_2 при определенной для данной ступени напряжения величине $U_{\partial 2}$. Изменяя $U_{\partial 2}$, можно получить новые значения напряжения генератора и построить семейство кривых $F_{y2} = f(U_2)$ зависимости суммарной н. с. $УГ$ от напряжения генератора для различных положений командоконтроллера.

Угол наклона характеристики $F_{y2} = f(U_2)$ к оси абсцисс определяет статизм системы и качество переходного процесса при подходе напряжения генератора к установившемуся значению. Крутизна характеристики μ определяется отношением

$$\mu = \frac{\Delta F_{y2}}{\Delta U_2} \approx \omega_y \frac{R_0}{R_{n2} R_{np}}$$

Отсюда следует, что для увеличения крутизны целесообразно в качестве управляющей обмотки выбирать ту обмотку $УГ$, которая имеет наибольшее число витков.

Построенные для рассматриваемой системы статические характеристики управления возбуждением генератора имеют благоприятный характер, так как предельные значения результирующей намагничивающей силы F_{y2} , определяющей интенсивность протекания переходных процессов, ограничены во всех режимах управления.

Статические характеристики системы управления возбуждением двигателя (рис. 3)² представляют зависимость э. д. с. возбудителя от тока возбуждения двигателя в процессе усиления и ослабления его потока возбуждения.

Во II и IV квадрантах построена кривая намагничивания возбудителя двигателя $E_{\partial \partial} = f(F)$; в I и IV квадрантах — характеристики зависимости н. с. его задающей обмотки от тока возбуждения двигателя (прямые, параллельные оси абсцисс) $F_3 = f(i_{\partial \partial})$ и характеристики зави-

симости разности н. с. задающей обмотки и обмотки сравнения от тока возбуждения двигателя $F_3 - F_{oc} = f(i_{\partial \partial})$ для различных положений командоконтроллера.

Усиление потока возбуждения. Задавшись некоторым значением тока $i_{\partial \partial}$ (например, точка a на оси абсцисс), необходимо к оси абсцисс восстановить перпендикуляр до пересечения с характеристикой $F_3 - F_{oc} = f(i_{\partial \partial})$ (точка b). Полученное значение н. с. переносится на ось ординат (точка θ), откуда под углом характеристики шунта шунтовой обмотки возбудителя проводится линия до пересечения с кривой намагничивания $ВД$ (точка z). Полученная э. д. с. возбудителя, отвечающая заданному значению тока возбуждения двигателя, переносится в I квадрант по пути $гдеж$, указанному стрелками. Точка $ж$ является одной из точек искомой характеристики $E_{\partial \partial} = f(i_{\partial \partial})$, расположенной в I квадранте.

Ослабление потока возбуждения. Ход определения напряжения возбудителя, соответствующего произвольно выбранному значению тока возбуждения двигателя, аналогичен описанному выше. Если задаться током возбуждения двигателя, значение которого будет определяться, например, точкой z на оси абсцисс, то характерными точками построения будут $z, u, \kappa, л, м, н, о$, связанные между собой вспомогательными линиями.

Как видно из построения, основная часть искомой характеристики $E_{\partial \partial} = f(i_{\partial \partial})$ расположена в IV квадранте в зоне отрицательных значений э. д. с. возбудителя. Точки A и B являются точками установившихся значений э. д. с. возбудителя, отвечающих токам возбуждения при максимальной и основной скоростях двигателя. Точки B и Γ характеризуют возможность форсирования потока возбуждения двигателя при переходе с максимальной скорости на основную и обратно.

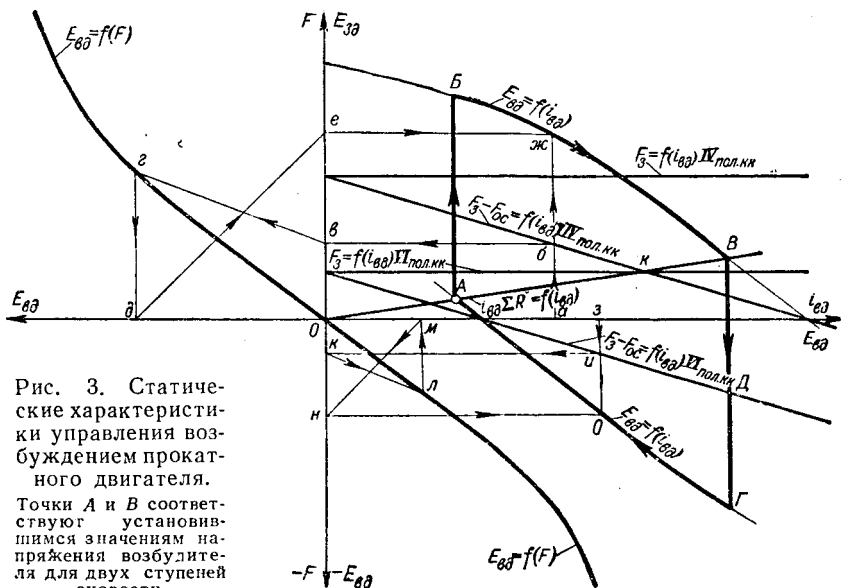


Рис. 3. Статические характеристики управления возбуждением прокатного двигателя. Точки A и B соответствуют установившимся значениям напряжения возбудителя для двух ступеней скорости.

² Методика построения разработана автором совместно с Н. А. Тищенко.

Следует отметить, что изменение сопротивления в цепи шунтовой обмотки (изменение угла наклона характеристики шунта) вызывает необходимость в корректировке н. с. F_3 с тем, чтобы сохранились неизменными установившиеся значения э. д. с. возбудителя. Последнее приводит к изменению степени форсирования его возбуждения в начале переходных процессов.

Из рассмотрения статических характеристик также следует, что сопротивление цепи шунтовой обмотки должно быть всегда больше критического, так как в противном случае может наступить самовозбуждение возбудителя и нарушится возможность управления возбуждением двигателя путем воздействия на н. с. задающей обмотки $зд$.

Скоростная характеристика прокатного двигателя (рис. 4)³. Для построения характеристики необходимо задаться рядом скоростей двигателя и по регулировочной характеристике $n = f(i_{зд})$ найти соответствующие значения тока возбуждения $i_{зд}$.

Зная ток $i_{зд}$, можно определить н. с. $F_{ос}$ обмотки сравнения возбудителя двигателя, н. с. $F_{ос2}$ вспомогательной обмотки $УТ$ и напряжение $U_{зд}$ возбудителя двигателя.

Полученное значение $U_{зд}$ позволяет вычислить н. с. $F_{ш}$ шунтовой обмотки $ВД$, пропорциональную $U_{зд}$, и по кривой намагничивания $ВД$ найти значение суммарной н. с. $F_{сд}$, необходимой для определения токовой составляющей F_T н. с. шунтовой обмотки $ВД$:

$$F_T = F_{сд} + F_{ос} - F_{ш} - F_3.$$

Намагничивающая сила F_T определяет напряжение усилителя $U_{ут}$, а следовательно, и его н. с. $F_{ут}$, которая может быть найдена по кривой намагничивания $УТ$. В свою очередь полученная н. с. $F_{ут}$ позволяет найти н. с. $F_{тут}$ токовой обмотки $УТ$:

$$F_{тут} = F_{ут} + F_{ос1} + F_{ос2}.$$

Зная н. с. $F_{тут}$, сопротивление цепи токовой обмотки $УТ$ и сопротивление дополнительных полюсов и компенсационной обмотки двигателя, можно найти искомое значение тока двигателя I , соответствующее заданной в начале расчета скорости двигателя n . Аналогичным образом находят и другие точки характеристики.

Если известен ток прокатки на основной скорости, то по скоростной характеристике двигателя легко определить ту максимальную скорость, которую может развить двигатель при ослаблении потока возбуждения. Для этого следует построить семейство характеристик

$$I = f(n) = I_{н.осн} \frac{n_{осн}}{n} \text{ для различных значений мо-}$$

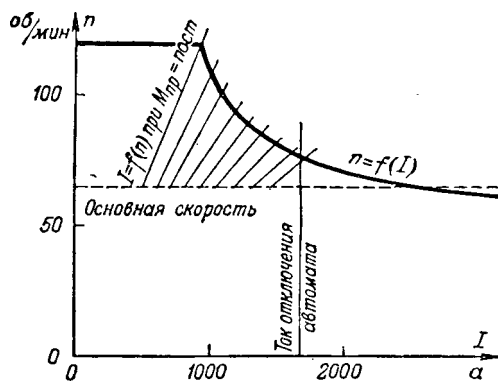


Рис. 4. Скоростная характеристика прокатного двигателя.

мента прокатки, неизменных в каждом пропуске.

Пересечение каждой характеристики $I = f(n)$ для выбранного момента прокатки со скоростной $n = f(I)$ определяет величину максимальной установившейся скорости прокатки.

Выбор вспомогательных машин и расчет основных параметров системы. 1. Выбор возбудителя генератора. Возбудитель генератора выбирается, исходя из величины номинального тока возбуждения генератора и напряжения $U_{вг} = (1 + \alpha) U_{вн}$, необходимого для форсирования возбуждения генератора и компенсации омического падения напряжения в цепи его возбуждения.

Здесь $U_{вн}$ — номинальное напряжение возбуждения генератора; α — коэффициент форсировки.

С применением машин, имеющих двухходовые обмотки якорей, условия управления возбуждением усложнились, так как в несколько раз увеличилось электромагнитные постоянные времени, а отсюда и требуемые коэффициенты форсировки возбуждения.

Постоянная времени обмотки возбуждения машины равна:

$$T = \frac{L}{r} \approx 2p\gamma \frac{\omega^2 \Phi}{rF} = \frac{BS}{\delta \nu l_{ср}} \gamma,$$

где $\Phi = BS$ — поток одного полюса;

$l_{ср}; r = 2p\omega \frac{l_{ср}}{s}$ — средняя длина витка и сопротивление обмотки возбуждения;

δ — плотность тока в обмотке возбуждения;

$\gamma = 1 + 0,5 \dots 0,7(\sigma - 1)$ — коэффициент сцепления обмотки возбуждения с магнитным потоком полюсов.

Машины с двухходовыми обмотками якорей характеризуются уменьшенным числом полюсов. При изменении числа пар полюсов машины p_1 на p_2 поток на полюс изменяется обратно пропорционально числу полюсов: $\Phi_2 = \Phi_1 \frac{p_1}{p_2}$. Поэтому постоянная времени при оди-

³ Построение предложено Харьковским отделением ГПИ «Тяжпромэлектропроект».

наковых плотностях тока в обмотках возбуждения может быть найдена из выражения $T_2 = T_1 \frac{p_1}{p_2} \frac{l_{cp1}}{l_{cp2}}$ или после некоторых преобразований $T_2 = T_1 \frac{1 + \theta}{1 + \frac{p_2}{p_1}}$, где θ — отношение длины

к ширине полюсного сердечника первой машины.

Из рассмотрения полученных выражений можно убедиться, что с уменьшением числа полюсов постоянная времени существенно возрастает. Потери на возбуждение машины при уменьшении числа полюсов уменьшаются:

$$P_{\sigma 2} = P_{\sigma 1} \frac{p_2 l_{cp2}}{p_1 l_{cp1}} = P_{\sigma 1} \cdot \frac{T_2}{T_1}.$$

Коэффициенты самоиндукции обмоток возбуждения при изменении числа полюсов машины и сохранении неизменного количества витков на полюс практически не изменяются. Поэтому при использовании машин с двухходовыми обмотками якорей максимальные форсировочные напряжения возбуждателей не превышают напряжений, необходимых для форсирования возбуждения машин с обычной петлевой обмоткой якоря. Однако при этом коэффициенты форсировки должны быть увеличены. Для того чтобы в этих условиях исключить перерегулирование напряжения генератора, требуется большое быстроедействие системы. Это приводит к необходимости выполнять обмотку возбуждения возбуждателя на низкое напряжение и в ее цепь включать добавочное сопротивление.

2. Выбор величины сопротивления R_2 в цепи обмотки ограничения тока рекуперации УГ. Сопротивление R_2 выбирается из условия, что в начале торможения двигателя с максимальной скоростью на ступени скорости ниже основной напряжение генератора должно оставаться неизменным за счет подмагничивающего действия обмотки op усилителя генератора.

Если задан ток торможения двигателя I_r , то намагничивающая сила обмотки ограничения тока рекуперации $F_{op} = \frac{I_r R_{\partial k} \omega_{op}}{R_2 + r_{op}}$ должна быть равна или больше суммы $F_3 + F_n$ — н. с., стремящейся перемагнитить усилитель УГ и снизить напряжение генератора в процессе усиления потока возбуждения двигателя.

Отсюда

$$R_2 = \frac{I_r R_{\partial k} \omega_{op}}{F_3 + F_n} - r_{op},$$

где F_n — н. с. усилителя генератора, соответствующая номинальному напряжению генератора;

ω_{op} , r_{op} — число витков и сопротивление обмотки op ;

$R_{\partial k}$ — сопротивление дополнительных полюсов и компенсационной обмотки двигателя.

3. Выбор возбуждателя двигателя. Возбудитель двигателя и его параметры выбираются из условия обеспечения заданной интенсивности протекания переходных процессов и создания условий для удовлетворительного действия регулятора мощности.

При работе прокатных двигателей на скоростях выше основной их перегрузочная способность по току уменьшается, в то время как статическая составляющая тока (ток прокатки) возрастает. Поэтому с нарастанием скорости двигателя при ослаблении его потока возбуждения динамическая составляющая тока якоря должна уменьшаться.

Если принять, что между изменением допустимой рабочей перегрузки двигателя по току и скоростью существует линейная зависимость, то допустимая динамическая составляющая тока при различных значениях потока возбуждения двигателя не должна превышать величины, определяющей зависимостью

$$I_{\partial ин} = I_{рм} - \Delta I \frac{\Phi_n - \Phi}{\Phi_n - \Phi_{мин}} \left(\frac{\Phi_{мин}}{\Phi} \right) - \frac{M_{np}}{k_m \Phi} =$$

$$= I_n \left[\lambda_1 - \left(\beta \frac{\Phi_n - \Phi}{\Phi_n - \Phi_{мин}} \cdot \frac{\Phi_{мин}}{\Phi} + \psi \frac{\Phi_n}{\Phi} \right) \right],$$

где $I_{рм}$ — максимально допустимый рабочий ток;

I_n — номинальный ток;

ΔI — изменение величины максимально допустимого тока за диапазон изменения потока от Φ_n до $\Phi_{мин}$;

Φ_n , $\Phi_{мин}$ — потоки, соответствующие основной и максимальной скоростям двигателя;

M_{np} — момент прокатки;

k_m — коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя;

λ_1 — коэффициент кратности допустимой рабочей перегрузки;

β — коэффициент уменьшения рабочей перегрузки за диапазон изменения потока от Φ_n до $\Phi_{мин}$;

ψ — коэффициент кратности момента прокатки к номинальному моменту двигателя.

С другой стороны, динамическая составляющая тока равна:

$$I_{\partial ин} = (I_k T_m \Phi_n^2) \frac{1}{\Phi^3} \frac{d\Phi}{dt},$$

где I_k — ток короткого замыкания;

T_m — электромеханическая постоянная времени.

Отсюда, если задана максимальная величина динамического тока, то может быть найдена производная $\frac{d\Phi}{dt}$, определяющая перепад

напряжения возбуждателя двигателя $\Delta U_{\phi} \leq 2p\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}$ и мощность возбуждателя $P_{\sigma \partial} \geq i_{\sigma \partial n} \Delta U_{\phi}$.

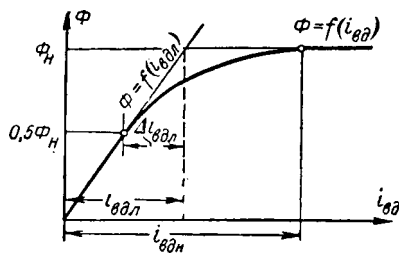


Рис. 5. Кривая намагничивания прокатного двигателя.

В качестве возбудителя целесообразно использовать усилитель с самовозбуждением. В случае использования обычной машины необходимо, чтобы ее обмотки возбуждения были выполнены на низкое напряжение с тем, чтобы за счет включения в их цепи добавочных сопротивлений можно было уменьшить постоянные времени. Инерционность возбудителя существенно искажает намеченный статическим расчетом процесс усиления или ослабления потока и поэтому должна учитываться при расчете переходных режимов.

На рис. 5 изображена кривая намагничивания, позволяющая за счет перехода от реальных значений тока возбуждения к значениям тока $i_{\delta\delta\lambda}$ линеаризованной характеристики пользоваться неизменным значением коэффициента пропорциональности k_δ между током возбуждения и потоком.

Приведенная постоянная времени возбудителя двигателя равна:

$$T_{\text{внр}} = 2pf\gamma \left(\frac{\omega_{\text{ш}}^2}{R_{\text{ш}}} + \frac{\omega_{\text{ос}}^2}{R_{\text{ос}}} + \frac{\omega_{\text{з}}^2}{R_{\text{з}}} \right),$$

$$\text{где } f = \frac{\Delta\Phi_{\delta\delta}}{\Delta F_{\delta\delta}};$$

$\omega_{\text{ш}}$, $\omega_{\text{ос}}$, $\omega_{\text{з}}$ и $R_{\text{ш}}$, $R_{\text{ос}}$, $R_{\text{з}}$ — число витков и сопротивления цепей обмоток возбудителя што, ос и зδ.

В случае применения возбудителя с нешхтованной станиной, необходимо учесть демпфирующее действие вихревых токов [Л. 2]. В этом случае величина расчетной постоянной времени определится:

$$T_{\delta\delta} = T_{\text{внр}} k_\varphi,$$

где $k_\varphi \approx 1 + \frac{T_{\text{св}}}{T_{\text{внр}}}$ — коэффициент демпфирования;

$T_{\text{св}}$ — постоянная времени станины [Л. 2].

Производя расчет для приращения потока возбуждения двигателя и считая, что $\Phi = k_\delta \frac{i_{\delta\delta\lambda}}{1 + pT_\delta}$, можно получить:

$$\Phi = k_\delta k_{\delta\delta} \frac{U_{\delta\delta}}{1 + p(T_{\text{св}} + T_\delta)}; \quad (1)$$

$$U_{\delta\delta\lambda} = k_\delta F_{\delta\delta} \frac{1}{1 + pT_{\delta\delta}}; \quad (2)$$

$$F_{\delta\delta} = \Delta F_{\text{з}} + k_{\text{ш}} U_{\delta\delta} - \frac{k_{\text{ос}}}{k_\delta} \Phi (1 + pT_{\text{св}}^2), \quad (3)$$

где $T_{\text{св}}$, T_δ — постоянная времени станины и цепи возбуждения двигателя;

$\Delta F_{\text{з}}$ — изменение н. с. задающей обмотки ВД при переходе с одной ступени скорости на другую;

$$k_\delta = \frac{\Delta\Phi}{i_{\delta\delta\lambda}}; \quad k_{\delta\delta} = \frac{1}{\Sigma R}; \quad k_\delta = \frac{\Delta E_{\delta\delta}}{\Delta F_{\delta\delta}}; \quad k_{\text{ш}} = \frac{\Delta F_{\text{ш}}}{\Delta U_{\delta\delta}},$$

$U_{\delta\delta}$, $F_{\delta\delta}$ — напряжение и н. с. ВД;

$k_{\text{ос}} = \frac{\Delta F_{\text{ос}}}{\Delta i_{\delta\delta\lambda}}$ — действительное изменение н. с. обмотки сравнения ВД, отнесенное к изменению тока возбуждения на линеаризованной характеристике, эквивалентному действительному его изменению;

ΣR — суммарное сопротивление цепи возбуждения двигателя.

Совместное решение (1), (2) и (3) дает:

$$\Phi = \Delta F_{\text{з}} k_\delta k_{\delta\delta} k_\delta \frac{1}{A} \frac{1}{p^2 + Bp + C};$$

$$U_{\delta\delta\lambda} = \Delta F_{\text{з}} k_\delta \frac{1}{A} \frac{1 + p(T_{\text{св}} + T_\delta)}{p^2 + Bp + C},$$

где

$$A = T_{\delta\delta} (T_{\text{св}} + T_\delta);$$

$$B = \frac{T_{\delta\delta} + T_{\text{св}} \cdot k_\delta \cdot k_{\text{ос}} \cdot k_{\delta\delta} + (1 - k_\delta k_{\text{ш}}) (T_{\text{св}} + T_\delta)}{A};$$

$$C = \frac{k_\delta k_{\text{ос}} k_{\delta\delta} + (1 - k_\delta k_{\text{ш}})}{A}.$$

Обычно корни полученных характеристических уравнений комплексные сопряженные:

$$\Phi = \Delta F_{\text{з}} k_\delta k_{\delta\delta} k_\delta \frac{1}{AC} \left\{ 1 - e^{-mt} \left(\cos \omega t + \frac{m}{\omega} \sin \omega t \right) \right\};$$

$$U_{\delta\delta\lambda} = \Delta F_{\text{з}} k_\delta \frac{1}{AC} \left\{ 1 - e^{-mt} \left[\cos \omega t + \frac{m - (T_{\text{св}} + T_\delta) C}{\omega} \sin \omega t \right] \right\}.$$

В последних выражениях

$$m = \frac{B}{2} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{1}{2} \sqrt{4C - B^2}.$$

Максимальное приращение напряжения возбудителя двигателя

$$\Delta U_{\delta\delta\lambda \text{ макс}} = k_\delta \Delta F_{\text{з}} \frac{1}{AC} \left[1 - e^{-mt_{\text{макс}}} \left(\cos \omega t_{\text{макс}} + \frac{m - (T_{\text{св}} + T_\delta) C}{\omega} \sin \omega t_{\text{макс}} \right) \right],$$

где

$$t_{\text{макс}} = \frac{1}{\omega} \arctg \frac{m - (T_{\text{св}} + T_\delta) C - m\omega}{[m - (T_{\text{св}} + T_\delta) C]m + \omega}.$$

В случае вещественных корней характеристических уравнений

$$\Phi = \Delta F_s k_{\delta} k_{\sigma} k_{\epsilon} \frac{1}{AC} \left[1 - \frac{1}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \right];$$

$$U_{\delta\delta} = \Delta F_s k_{\epsilon} \frac{1}{AC} \left\{ 1 - \frac{1}{p_1 - p_2} \{ [p_1 + C(T_{c\delta} + T_{\delta})] e^{p_1 t} - [p_2 + C(T_{c\delta} + T_{\delta})] e^{p_2 t} \} \right\},$$

где

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} (B \mp \sqrt{B^2 - 4C}).$$

Путем подбора параметров системы управления возбуждением двигателя необходимо добиться, чтобы полученное значение $\Delta U_{\delta \text{ макс}}$ было близким к найденному из условия оптимального протекания переходного процесса при сохранении баланса н. с. в статических режимах.

4. Расчет параметров регулятора мощности. Регулятор мощности имеет переменную уставку. При номинальном потоке возбуждения двигателя регулятор вступает в работу при токе в главной цепи двигателя $\lambda_1 I_n$, а при минимальном потоке — при токе $\epsilon \lambda_1 I_n$.

Воздействуя на поток возбуждения двигателя, регулятор ограничивает нарастание тока двигателя. В противном случае при перегрузке двигателя $\lambda_2 I_n$ вступает в действие реле IPT, отключающее цепь возбуждения генератора. Таким образом, диапазон изменения тока в главной цепи, в течение которого работает регулятор при номинальном потоке двигателя, равен $\Delta I = (\lambda_2 - \lambda_1) I_n$ и при минимальном потоке — $\Delta I = (\lambda_2 - \epsilon \lambda_1) I_n$.

Величина добавочного сопротивления R_{23} в цепи шунтовой обмотки ВД выбирается из условия обеспечения максимальной токовой составляющей н. с. $F_{T \text{ макс}}$ этой обмотки при номинальном значении э. д. с. усилителя УТ, причем величина $F_{T \text{ макс}}$ определяется из рис. 3:

$$F_{T \text{ макс}} = \overline{B \overline{D}}.$$

Сопротивление R_{20} и н. с. токовой обмотки УТ $F_{T \text{ ут отс}}$, равная сумме н. с. его обмоток сравнения, находится из условия, что уставка регулятора определяется суммарным действием н. с. обмоток сравнения УТ и что усилитель УТ должен создать номинальную э. д. с. $E_{утн}$ при

превышении током двигателя уставки регулятора на величину $\Delta I = (\lambda_2 - \lambda_1) I_n$:

$$R_{20} = \frac{1}{N} (\lambda_2 - \lambda_1) I_n R_{\delta k} \omega_{\text{тут}} - r_{\text{тут}}.$$

Здесь $r_{\text{тут}}$, $\omega_{\text{тут}}$ — сопротивление и число витков токовой обмотки УТ; N — н. с., необходимая для создания $E_{утн}$.

Зная $F_{T \text{ ут}}$, можно перейти к определению н. с. обмоток сравнения УТ.

Суммарная н. с. обмоток сравнения состоит из двух компонент:

$$\Sigma F_{oc} = F_{oc1} + F_{oc2} = F_{T \text{ ут отс}}.$$

Если принять, что при номинальном потоке двигателя $F_{oc1} + F_{oc2} = B_1$, а при минимальном — $F_{oc1} + \beta F_{oc2} = \epsilon B_1$, где ϵ — коэффициент уменьшения уставки регулятора с повышением скорости двигателя, то

$$F_{oc1} = B_1 \frac{\epsilon - \beta}{1 - \beta} = N \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{\epsilon - \beta}{1 - \beta}$$

и

$$F_{oc2} = B_1 \frac{1 - \epsilon}{1 - \beta} = N \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{1 - \epsilon}{1 - \beta}.$$

Зная н. с. обмоток сравнения УТ, можно определить сопротивления R_{21} и R_{25} .

Экспериментальное исследование системы управления. Исследование системы было прове-

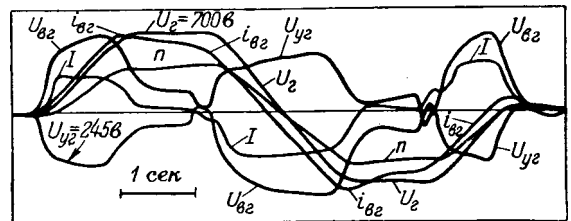


Рис. 6. Осциллограмма режимов управления двигателем до основной скорости. Разгон (0...65) об/мин; реверс (65...65) об/мин; торможение (65...0) об/мин.

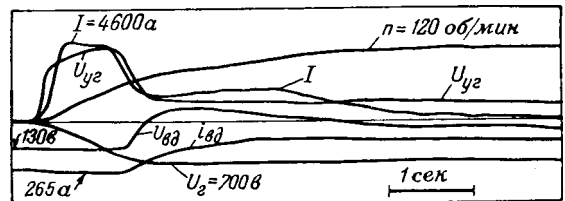


Рис. 7. Осциллограмма разгона двигателя до скорости 120 об/мин.

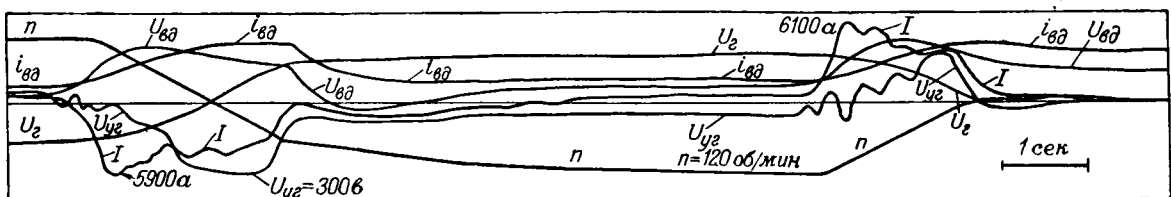


Рис. 8. Осциллограмма разгона двигателя до скорости 120 об/мин, реверса (120...120) об/мин и торможения (120...0) об/мин.

дено на стане с приводным двигателем мощностью 3680 квт, 5670 а, 65/120 об/мин. Постоянная времени обмотки возбуждения двигателя равна 11 сек и постоянная времени обмотки возбуждения генератора — около 4 сек. Двигатель имел двухходовую обмотку якоря.

Осциллограммы переходных процессов представлены на рис. 6, 7 и 8.

При реверсировании и торможении с максимальной скорости хорошо видно действие обмотки ограничения тока рекуперации УГ, задерживающей спадание напряжения генератора.

Значения токов главной цепи, времена протекания режимов управления и средние ускорения сведены в таблицу.

Высокое значение средних ускорений и замедлений двигателя при относительно низких пиках тока двигателя характеризуют добротность системы управления.

Несколько замедленный процесс управления

ПРИЛОЖЕНИЕ. Расчет параметров стабилизации. Системы управления главным приводом, как правило, обладают большим запасом устойчивости. Поэтому расчет устойчивости системы не производится, а параметры стабилизации выбираются лишь из условия обеспечения благоприятного протекания переходных процессов.

В системе имеется два стабилизирующих трансформатора Т1 и Т2, включенных соответственно на напряжение ВГ и УГ и действующих на одну обмотку со усилителя генератора (рис. 1 и 9).

Известно, что напряжение возбудителя генератора должно изменяться таким образом, чтобы в начале разгона значение его было равно $U_{\text{вз}} = \alpha U_{\text{вн}}$, а в конце процесса — $U_{\text{вз}} = (1 + \alpha) U_{\text{вн}}$. Поэтому необходимо

найти такие параметры стабилизации, которые обеспечили бы требуемый закон изменения напряжения возбудителя. Для решения этой задачи следует определить зависимость напряжения на выходе трансформаторов (на стабилизирующей обмотке УГ) от напряжения возбудителя $U_{\text{вз}}$:

$$U_{y2} = i_{11} R_{11} (1 + pT_{11}) - M_1 p i_2;$$

$$U_{\text{вз}} = i_{12} R_{12} (1 + pT_{12}) - M_2 p i_2;$$

$$M_1 p i_{11} + M_2 p i_{12} = i_2 [R_{21} (1 + pT_{21}) + R_{22} (1 + pT_{22}) + r_{co}].$$

Так как

$$\frac{M_1^2}{R_{11} R_{21}} \approx T_{11} T_{21} \quad \text{и} \quad \frac{M_2^2}{R_{12} R_{22}} \approx T_{12} T_{22},$$

то

$$i_2 = \frac{\frac{M_1}{R_{11}} (1 + pT_{12}) p U_{y2} + \frac{M_2}{R_{12}} (1 + pT_{11}) p U_{\text{вз}}}{R_{21} (1 + pT_{12}) [1 + p(T_{11} + T_{21})] + R_{22} (1 + pT_{11}) [1 + p(T_{12} + T_{22})] + r_{co} [(1 + pT_{11}) (1 + pT_{12})]}.$$

В рассматриваемом случае $U_{\text{вз}} = k_2 \frac{U_{y2}}{1 + pT_{\text{в}}}$ и $i_2 r_{co} = U_{\text{вн}}$, где $T_{\text{в}}$ — постоянная времени цепи обмотки возбуждения ВГ. Следовательно,

$$\frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{вз}}} = \frac{p \left[\frac{M_1}{k_2 R_{11}} (1 + pT_{12}) (1 + pT_{\text{в}}) + \frac{M_2}{R_{12}} (1 + pT_{11}) \right]}{\frac{R_{21}}{r_{co}} (1 + pT_{12}) [1 + p(T_{11} + T_{21})] + \frac{R_{22}}{r_{co}} (1 + pT_{11}) [1 + p(T_{12} + T_{22})] + (1 + pT_{11}) (1 + pT_{12})}.$$

Наименование режима	Время разгона, сек	Максимальное значение тока главной цепи в долях от номинального	Среднее ускорение, об/мин·сек
Разгон 0—65 об/мин	1	0,8	65
Реверс 65...65 об/мин	1,6	0,88	80
Торможение 65...0 об/мин	0,85	0,88	76
Разгон 0...120 об/мин	3,3	0,81	36
Реверс 120...120 об/мин	4,5	1,04	53
Торможение 120...0 об/мин	1,6	1,08	75

потоком возбуждения двигателя объясняется сильно выраженным влиянием вихревых токов, что характерно для машин с двухходовыми обмотками якорей в случае применения нешихтованной станины.

Обычно в системах управления главными приводами трансформаторы Т1 и Т2 выбираются одинаковыми. Если в цепи первичных обмоток трансформаторов также включены

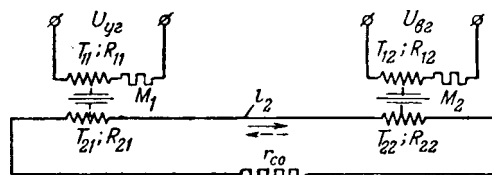


Рис. 9. Расчетная схема включения стабилизирующих трансформаторов.

одинаковые сопротивления, то последнее выражение примет следующий вид:

$$\frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{вз}}} = k_c \left[1 + \frac{1}{k_2} (1 + pT_{\text{в}}) \frac{pT_{\text{ст}}}{1 + pT_{\text{ст}}} \right].$$

Здесь

$$T_{\text{ст}} = T_1 + \frac{2R_2'}{2R_2' + r_{co}} T_2; \quad k_{\text{ст}} = \frac{M}{R_1 (2R_2' + r_{co}) T_{\text{ст}}};$$

$$k_c = k_{\text{ст}} r_{co}; \quad M = M_1 = M_2; \quad R_2' = R_{21} = R_{22}; \quad T_1 = T_{11} = T_{12};$$

$$T_2 = T_{21} = T_{22}.$$

Для изменения напряжения возбуждателя от нуля до напряжения, соответствующего отсечке форсирования, справедливо выражение

$$U_{\theta z} \approx F_3 k_1 k_2 \times \frac{1 + pT_{CT}}{(1 + pT_{\kappa})(1 + pT_{\theta})(1 + pT_{CT}) + k_c k_{c1} k_1 p T_{CT} (1 + k_2 + pT_{\theta})} = F_3 k_1 k_2 \frac{1 + pT_{CT}}{ap^3 + bp^2 + cp + 1} = F_3 k_1 k_2 \frac{\varphi(p)}{z(p)},$$

где T_{κ} — постоянная времени поперечной цепи УГ;
 F_3 — н. с. задающей обмотки УГ.

Корни характеристического уравнения $z(p) = 0$ равны:

$$p_1 \approx \frac{1}{c}; \quad p_{2,3} \approx -\frac{b}{2a} \pm j \sqrt{\frac{c}{a} - \left(\frac{b}{2a}\right)^2}.$$

Обычно параметры системы таковы, что вещественная часть комплексных сопряженных корней во много раз превышает значение первого вещественного корня p_1 . Это дает право напряжение $U_{\theta z}$ определять по формуле

$$U_{\theta z} \approx F_3 k_1 k_2 \left[\frac{\varphi(p_0)}{z(p_0)} + \frac{\varphi(p_1)}{p_1 z'(p_1)} e^{p_1 t} \right],$$

где

$$z'(p) \approx c = T_{\kappa} + T_{\theta} + T_{CT} [1 + k_1 k_c k_{c1} (1 + k_2)],$$

или

$$U_{\theta z} \approx F_3 k_1 k_2 \left[1 - \left(1 - \frac{T_{CT}}{c} \right) e^{-\frac{t}{c}} \right].$$

При

$$t \geq 0, \quad U_{\theta z} = F_3 k_1 k_2 \frac{T_{CT}}{c};$$

при

$$t \leq t_p, \quad U_{\theta z} = F_3 k_1 k_2 \left[1 - \left(1 - \frac{T_{CT}}{c} \right) e^{-\frac{t}{c}} \right],$$

но так как $U_{\theta z} t > 0 = \alpha U_{\theta n}$ и $U_{\theta z} t < t_p = (1 + \alpha) U_{\theta n}$, то:

$$c = -\frac{1}{1 - (1 + \alpha) \frac{U_{\theta n}}{k_1 k_2 F_3}} \ln \frac{U_{\theta n}}{1 - \alpha \frac{U_{\theta n}}{k_1 k_2 F_3}};$$

$$T_{CT} = \frac{\alpha U_{\theta n}}{k_1 k_2 F_3} c;$$

$$k_c = \frac{c - (T_{\kappa} + T_{\theta} + T_{CT})}{k_1 k_{c1} T_{CT} (1 + k_2)}.$$

Учитывая, что

$$k_c = k_{CT} r_{CO} = \frac{Mr_{CO}}{R_1 (2R_2 + r_{CO}) T_{CT}},$$

можно найти:

$$R_1 = \frac{Mr_{CO} k_1 k_{c1} (1 + k_2)}{(2R_2 + r_{CO}) [c - (T_{\kappa} + T_{\theta} + T_{CT})]}.$$

Литература

1. О. В. Слежановский. Анализ системы управления блумингом при помощи статических характеристик. Электричество, № 3, 1953.
2. В. Т. Касьянов. О расчетном определении скорости нарастания возбуждения. Сборник „Электросила“, № 9, 1951.

[10. 1. 1955]



Электропривод тяжелых токарных и карусельных станков и его дальнейшее развитие

Инж. И. Л. ШАПИРО

Харьков

За последние несколько лет в Советском Союзе разработан и изготовлен ряд новых моделей тяжелых металлорежущих станков. Среди них имеются уникальные токарные, карусельные, фрезерные и другие станки, предназначенные для обработки изделий весом до 200...500 т, необходимых для создания тяжелых машин металлургической промышленности, агрегатов крупных гидроэлектростанций и т. п. Рассмотрение электропривода подобных станков представляет собой значительный интерес. Оно позволяет определить общую линию развития электрификации современных тяжелых станков и помогает наметить очередные технические задачи в этой области.

При ознакомлении с техническими характеристиками новых тяжелых станков обращает на себя внимание все более глубокое влияние, которое оказывает на их конструкцию и кинематику система электрического привода и электрического управления. Одной из весьма существенных черт современных тяжелых станков является применение электроприводов с глубоким и точным регу-

лированием скорости, электрических регуляторов скорости резания, величины подачи, момента вращения электродвигателей и т. п. В этом отношении особенно показательны последние модели тяжелых карусельных и токарных станков. На карусельных станках для вращения планшайбы в ряде случаев применен электропривод по системе генератор—двигатель мощностью 150...300 кВт с регулированием скорости вверх от основной в диапазоне 1:4 и вниз — в диапазоне 40:1, т. е. с общим диапазоном электрического регулирования 1:160. Применение такого электропривода обусловлено необходимостью получения широкого диапазона плавно регулируемых скоростей планшайбы, в том числе и очень низких. Получение их наиболее просто достигается электрическим путем, благодаря чему значительно упрощается кинематика станка. Необходимость осуществления глубокого и точного электрического регулирования скорости планшайбы и ограничения величины ускорения планшайбы при разгоне и торможении (которые желательны осуществ-

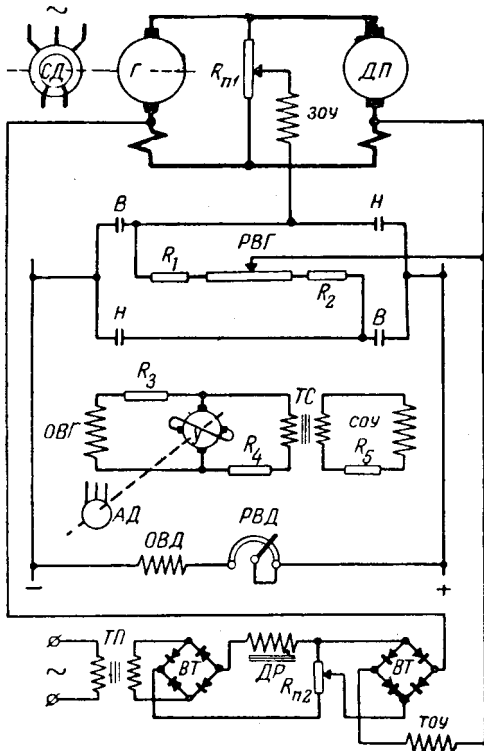


Рис. 1. Принципиальная схема главного электропривода тяжелого карусельного станка.

Г — генератор; ДП — двигатель планшайбы; СД, АД — синхронный и асинхронный двигатели; У — электромашинный усилитель; ТС, ТП — трансформаторы стабилизирующий и понижающий; ДР — дроссель; ВТ — выпрямитель.

лять с максимальной плавностью) потребовала применения для главного привода станка системы автоматического регулирования. Принципиальная схема главного электропривода представлена на рис. 1. Основным элементом схемы является электромашинный усилитель поперечного поля У, который корректирует возбуждение генератора Г с целью поддержания постоянства скорости и ограничения величины тока в главной цепи двигателя планшайбы ДП. На обмотку соу усилителя подается разность задающего напряжения, снимаемого с потенциметрического регулятора скорости планшайбы РВГ и напряжения, пропорционального скорости вращения двигателя. Такое включение обмотки управления усилителя обеспечивает поддержание постоянства заданной величины скорости вращения планшайбы. Величина тока в главной цепи двигателя ограничивается посредством обмотки тоу усилителя. На эту обмотку подается разность эталонного напряжения, снимаемого с потенциметра R₂ узла токоограничения и напряжения, пропорционального току в главной цепи двигателя. Величина эталонного напряжения автоматически изменяется при изменении механической ступени скорости планшайбы. Этим обеспечивается необходимое ограничение величины предельных моментов вращения двигателя и тем самым величины ускорения планшайбы. Аналогичные системы электропривода применяются и для вращения планшайб некоторых современных токарных станков.

Развитие станочного электропривода позволило по-новому решить некоторые вопросы конструирования и эксплуатации тяжелых станков. При этом в их конструкцию были внесены новые принципы, позволяющие, с одной стороны, уменьшить вес и упростить изготовление станков, а с другой, — повысить их эксплуатационные характеристики. Это положение в полной мере относится и к способам осуществления подачи суппортов тяжелых токарных и карусельных станков. До последнего времени для выполнения этой операции применяются сложные механизмы, включающие длинные ходовые валы и винты, зубчатые рейки, коробки подач и т. п. На тяжелых станках, у которых вес только одного суппорта достигает 10...20 т, а усилие на резце — 10...15 т, размеры кинематических звеньев очень велики и изготовление их вызывает серьезные затруднения. Сборка станка при наличии ходовых валов существенно усложняется, так как требуется выполнение строго соосных и точных отверстий в узлах станка, отстоящих друг от друга иногда на десятки метров. Кроме того, при наличии длинных валов малые подачи в результате возникновения «разрывных» колебаний, часто осуществляются неудовлетворительно. Все эти обстоятельства вызвали стремление заменить механические связи электрическими.

На рис. 2 показана принципиальная схема электрической системы подачи, применяемой в настоящее время на некоторых тяжелых карусельных и токарных станках. Двигатель подачи суппорта ДС питается от электромашинного усилителя У, приводимого во вращение асинхронным двигателем АД. Ведущий тахогенератор ВТ сочленен с валом двигателя планшайбы ДП; измерительный тахогенератор Т сочленен с валом двигателя подачи ДС. При неизменной скорости ведущего тахогенератора скорость вращения двигателя подачи ДС и, следовательно, величина подачи суппорта на один оборот планшайбы станка задается положением щетки потенциметра R_n.

При регулировании скорости резания путем изменения числа оборотов двигателя планшайбы ДП изменяется величина задающего напряжения, снимаемого с потенциметра R_n. В результате этого автоматически изменяется ско-

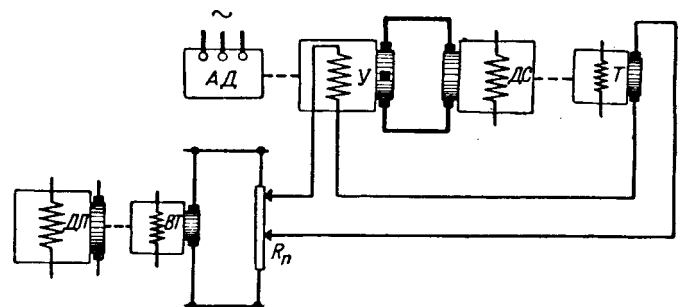


Рис. 2. Принципиальная схема электропривода суппорта токарного станка.

АД — асинхронный двигатель; У — электромашинный усилитель; ДС, ДП — двигатели суппорта и планшайбы; ВТ, Т — ведущий и измерительный тахогенераторы.

рость вращения двигателя подачи суппорта, оставаясь пропорциональной скорости вращения двигателя планшайбы. Таким образом при неизменной передаче от главного двигателя к планшайбе сохраняется заданная величина подачи суппорта на один оборот изделия.

Диапазон электрического регулирования скорости вращения двигателя подачи суппорта составляет 1:20...1:30. При наличии одного механического переключения в кинематике суппорта общий диапазон регулирования достигает 1:400...1:900, что можно считать достаточным для нормальной эксплуатации станка. В случае необходимости диапазон электрического регулирования может быть значительно расширен путем применения дополнительного промежуточного усилителя в системе регулирования. Однако с целью повышения надежности системы подачи часто предпочтительнее иметь комбинированное, электромеханическое регулирование подачи суппортов, так как применение промежуточных усилителей усложняет электрическую систему регулирования.

Преимущества рассмотренной системы перед системами подачи, применяемыми на токарных станках с ходовым валом, состоят в следующем:

1. Обеспечивается возможность плавного, практически бесступенчатого, регулирования величины подачи.
2. Допускается регулирование подачи в процессе обработки изделия.
3. Значительно упрощается механизм подачи суппортов, так как исключаются длинные ходовые валы и большое число шестерен коробок подач.
4. Обеспечивается посредством электропривода точная установка резца перед началом точения.
5. Уменьшается опасность возникновения «разрывных» колебаний.

Основными недостатками системы являются:

- 1) существенное усложнение электрооборудования станка за счет применения нескольких дополнительных электроприводов подачи суппортов;
- 2) невозможность выполнения винторезных работ.

В тех случаях, когда на токарных станках без ходового вала необходимо выполнять винторезные работы, приближенное соответствие скорости вращения шпинделя и величины подачи, обеспечиваемое системой управления, приведенной на рис. 2, является уже недостаточным. В этом случае требуется наличие строгого и непрерывного постоянства соотношения скоростей подачи и вращения изделия. Для выполнения этого требования в последние годы на тяжелых токарных станках стали применять электрические силовые синхронно-следящие системы. Принципиальная схема подобной системы, осуществленной на одном из тяжелых токарных станков, представлена на рис. 3¹. Двигатель подачи винторезного суппорта ДС питается от электромашинного усилителя У.

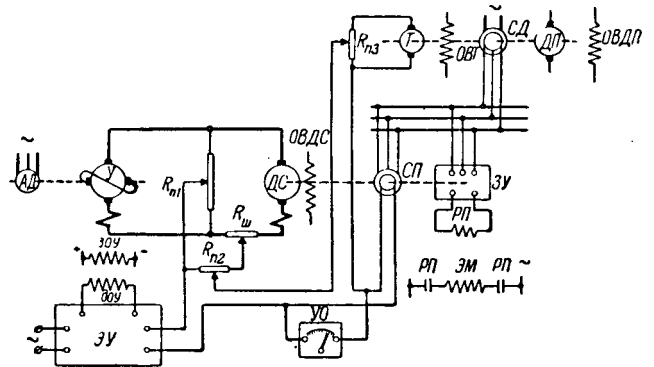


Рис. 3. Принципиальная схема синхронно-следящей системы привода винторезного суппорта.

АД — асинхронный двигатель; У — электромашинный усилитель; $\dot{c}ou, \dot{d}ou$ — обмотки управления усилителя У; ДС, ДП — двигатели суппорта и планшайбы; Т — тахогенератор; СД, СП — сельсины; ЭУ — электронный усилитель; УО — указатель ошибки; ЗУ — защитное устройство; РП — реле промежуточное; ЭМ — электромагнит защелки механизма отвода резца.

лителера У. Угол рассогласования между валом двигателя ДС и валом двигателя планшайбы станка ДП измеряется посредством сельсинов СД и СП. В зависимости от знака и величины рассогласования между сельсинами электронный усилитель ЭУ корректирует возбуждение усилителя У таким образом, чтобы свести это рассогласование к минимуму. Система управления обеспечивает синхронное и синфазное вращение двигателей планшайбы и суппорта. Угол рассогласования между этими двигателями в процессе нарезания резьбы можно наблюдать посредством специального указателя ошибки УО.

Во избежание возможного нарушения резьбы, которое может произойти в случае выхода из строя электрического управления приводом винторезного суппорта, предусмотрено электромеханическое защитное устройство ЗУ, непрерывно измеряющее угол рассогласования между двигателями планшайбы и суппорта. Если во время нарезания резьбы угол рассогласования между валами синхронизируемых двигателей почему-либо превзойдет допустимую величину, то это вызовет автоматическое отключение промежуточного реле РП, которое отключит электромагнит ЭМ защелки механизма отвода резца и мощная пружина вытолкнет резец из нитки резьбы. Процесс отвода резца в подобных случаях должен осуществляться настолько быстро, чтобы исключалась нарушение резьбы, возникающее при недопустимом рассогласовании синхронизируемых двигателей. Благодаря применению защитного устройства надежность электропривода подачи винторезного суппорта значительно повышается.

На современных тяжелых станках — карусельных, токарных, фрезерных и др. — имеются десятки механизмов, обслуживаемых индивидуальными электроприводами различной сложности. В связи с большими габаритами станков управление механизмами часто должно осуществляться с нескольких пультов, расположенных на рабочих местах обслуживающего персонала. На этих же пультах сосредоточивают сигнальные лампы, указывающие режим работы отдельных

¹ Электрическая часть системы на рис. 3 разработана Отделением ЦКБ треста «Электропривод».

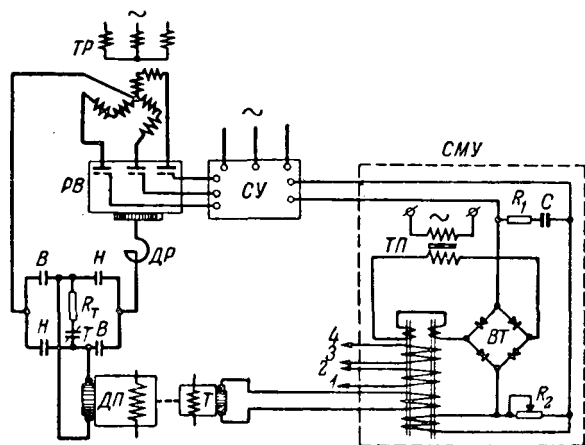


Рис. 4. Принципиальная схема опытного ионного электропривода планшайбы тяжелого токарного станка. ДП — двигатель планшайбы; Т — тахогенератор; РВ — управляемый ртутный выпрямитель; СУ — устройство сеточного управления; СМУ — суммирующий электромагнитный усилитель; ТР, ТП — трансформаторы; ДР — дроссель; С — конденсатор; ВТ — выпрямитель.

механизмов станка, действие маслосмазки, температуру направляющих, подшипников и т. п. Из-за сложности и многообразия функций систем электрического управления тяжелых станков их схемы включают большое число аппаратов. Например, схема тяжелого карусельного станка с диаметром планшайбы $D \approx 9000$ мм включает около 125 контакторов и реле, 80 кнопок управления, 5 режимных переключателей и 50 механических блок-контактов и путевых электроаппаратов.

Большое число аппаратов, применяемых в схеме управления станком, требует тщательной разработки схемы с тем, чтобы выход из строя отдельных ее элементов не вызывал аварию станка или порчу обрабатываемого изделия.

Современный электропривод станков быстро развивается в сторону все более полного удовлетворения требований, предъявляемых станочными механизмами. В этом отношении характерно освоение и внедрение новых типов электромашин и электроаппаратов, предназначенных для удовлетворения специфических требований станкостроения, а также разработка и внедрение новых станочных систем электропривода. Большие перспективы в области тяжелых токарных и карусельных станков имеет применение ионного электропривода. Серьезный толчок его развитию дает создание регулируемых, отпаянных ртутных выпрямителей. На рис. 4 приведена принципиальная схема опытного ионного управляемого электропривода для планшайбы тяжелого токарного станка². Регулирование фазы сеточного напряжения ртутного выпрямителя РВ осуществляется посредством статического индуктивного моста. Обмотки подмагничивания моста питаются от суммирующего электромагнитного усилителя СМУ, на вход которого подаются все задающие и корректирующие сигналы системы управления.

При пуске в ход двигателя планшайбы ДП задающее напряжение на обмотку СМУ подается

² Система управления ртутным выпрямителем на рис. 4 разработана Центральной научно-исследовательской лабораторией треста «Электропривод».

через специальное «формирующее» устройство. Последнее обеспечивает постепенное нарастание напряжения на зажимах обмотки СМУ и соответственно такое же нарастание напряжения выпрямителя и скорости вращения двигателя. Схема предусматривает ограничение тока в главной цепи и автоматическое регулирование скорости вращения двигателя планшайбы.

Применение ионных управляемых преобразовательных агрегатов вместо электромашинных для главных приводов токарных, карусельных и некоторых других станков мощностью 50...200 кВт имеет следующие преимущества.

1. Габариты и вес ионного агрегата меньше, чем у электромашинного; стоимость его при промышленном освоении производства выпрямителей должна быть также значительно меньше.

2. Коэффициент полезного действия ионного агрегата существенно выше, чем у электромашинного, особенно при неполной его нагрузке.

3. Не требуется специальный фундамент для агрегата.

4. Ионный агрегат допускает осуществление автоматического регулирования тока, скорости и ускорения исполнительного двигателя. При электромашинном преобразовательном агрегате такое регулирование требует применения дополнительного электромашинного усилителя. Но и в этом случае оно осуществляется менее качественно из-за большой электромагнитной постоянной времени обмотки возбуждения генератора, в то время как ртутный выпрямитель практически безинерционен.

5. Эксплуатация отпаянного безнасосного ртутного выпрямителя проще, чем эксплуатация двух- или трехмашинного агрегата с дополнительным электромашинным усилителем.

Для внедрения в тяжёлое станкостроение ионного электропривода необходимо скорейшее промышленное освоение отпаянных ртутных выпрямителей, а также разработка надежных схем управления выпрямительных и инверторных установок.

Широкое применение в станкостроении должны найти также электромагнитные усилители. Имея высокую надежность и срок службы, они позволят осуществить совершенные и чувствительные системы автоматического регулирования. Принципиальная схема глубокорегулируемого электропривода токарного суппорта мощностью 3...5 кВт с применением промежуточного электромагнитного усилителя представлена на рис. 5. Двигатель подачи суппорта ДС питается от электромашинного усилителя У. Электромагнитный усилитель использован в схеме для суммирования и усиления задающих и корректирующих сигналов.

Разработка и освоение надежных и чувствительных электромагнитных усилителей и применение их в схемах электропривода позволят создать глубокорегулируемые и точные системы с малогабаритными управляющими устройствами, имеющими большой срок службы. Такие системы должны получить особенно широкое применение для электроприводов подачи суппортов.

Рудничный электровоз с механическим инерционным аккумулятором

Кандидат техн. наук, доц. Н. А. СТАРОСКОЛЬСКИЙ

Донецкий научно-исследовательский угольный институт

В 1860 г. русским инженером Шуберским был предложен новый вид автономной тяги при помощи маховоза, представляющего собой локомотив, использующий кинетическую энергию установленных на нем маховиков. Идею Шуберского использовала швейцарская фирма Эрликон, которой в 1946 г. была построена небольшая самоходная тележка, оборудованная механическим инерционным аккумулятором [Л. 1]. Позднее механический инерционный аккумулятор был применен в виде опыта для городского, внутризаводского и рудничного электротранспорта [Л. 2 и 3].

Особый интерес представляет возможность использования изобретения Шуберского для рудничной откатки, так как рудничный локомотив с механическим инерционным аккумулятором может быть создан во взрывобезопасном исполнении.

Конструкция и принцип действия. Механический инерционный аккумулятор представляет собой маховик из высокопрочной стали, разгоняемый до большой скорости на остановках локомотива. Передача вращающего момента от маховика к колесам локомотива может быть осуществлена при помощи механического редуктора, как это было предложено Шуберским, гидравлического редуктора или при помощи электрического при-

вода. В дальнейшем рассматривается только последний способ.

Маховик вращается на общем валу с трехфазной короткозамкнутой асинхронной машиной (рис. 1). Вертикальный вал агрегата имеет два шарикоподшипника, укрепленных в прочном стальном корпусе, наполненном водородом. Водород уменьшает потери на трение маховика и охлаждает асинхронную машину. Вместо водорода может быть применен гелий. Должна быть обеспечена полная герметичность корпуса в местах его соединений, а также в выводах статорной обмотки. При расчете агрегата должны быть приняты высокие запасы механической прочности с тем, чтобы при сходах электровоза с рельсов или ударах на маневрах не появились остаточные деформации деталей.

При зарядке инерционного аккумулятора асинхронная машина работает в режиме двигателя и при питании от сети промышленной частоты разгоняет маховик до скорости около 3 000 об/мин. Период разгона неподвижного маховика длится около 3 мин. В условиях эксплуатации зарядка требует меньшего времени, так как в большинстве случаев разгон производится с какой-то промежуточной скорости.

При движении электровоза маховик отдает

Следует полагать, что по мере дальнейшего усовершенствования (упрощения, повышения надежности и т. п.) систем силовой синхронно-следящей связи будет значительно расширена их область применения, что позволит осуществить дальнейшее упрощение конструкции тяжелых станков путем замены механических связей электрическими. В этом отношении хорошие перспективы имеет применение систем электрического вала из машин переменного тока в сочетании с надежным защитным устройством.

Большой интерес для тяжелого станкостроения представляет также разработка глубокорегулируемых электроприводов с асинхронными двигателями. Такой электропривод должен иметь существенные конструктивные, энергетические и эксплуатационные преимущества. Однако разработанные до настоящего времени системы пока еще недостаточно технически совершенны, часто сложны и мало надежны. Решение этой задачи в дальнейшем должно позволить заменить, например, электроприводы подачи тяжелых станков, выполняемые в настоящее время по системе

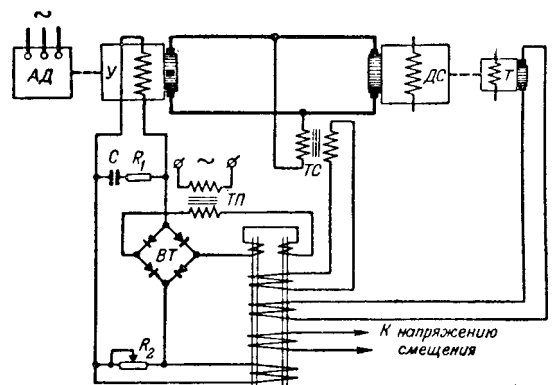


Рис. 5. Принципиальная схема электропривода суппорта с применением электромагнитного усилителя.

АД — асинхронный двигатель; У — электромашинный усилитель; ДС — двигатель суппорта; Т — тахогенератор; ТС, ТП — трансформаторы; ВТ — выпрямитель; С — конденсатор.

генератор — двигатель управляемыми асинхронными двигателями, питаемыми от заводской сети переменного тока.



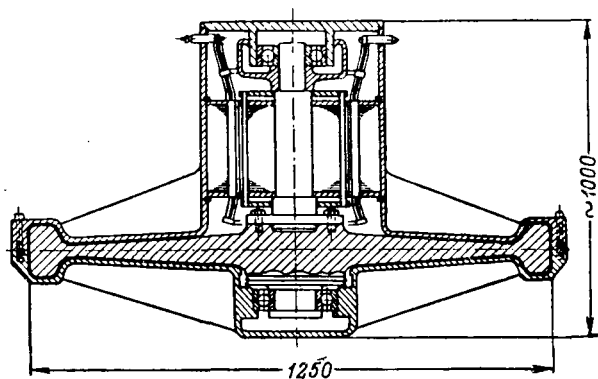


Рис. 1. Поперечный разрез через электродвигатель (генератор) и маховик.

накопленную кинетическую энергию асинхронной машине, работающей в режиме генератора с возбуждением от конденсаторной батареи. Генератор питает тяговый двигатель электровоза. С точки зрения надежности и простоты конструкции для тяги целесообразно принять трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Двигатель должен быть полюсопереключаемым для регулирования скорости электровоза. За счет установки на зарядной подстанции преобразователя частоты можно обеспечить разгон маховика до скорости больше 3 000 об/мин. В этом случае будет снижен вес маховика и сокращена емкость конденсаторов возбуждения.

Кинетическая энергия и потери маховика.

От маховика к асинхронному генератору должна быть передана энергия

$$A = \frac{A_0}{\eta_0} + \Delta P_2,$$

где A_0 — работа, совершаемая тяговым двигателем;

η_0 — средний к. п. д. электровоза;

ΔP_2 — потери в генераторе.

При определении A_0 следует учесть расход энергии на движение по горной выработке и на маневровую работу. Пуск электровоза происходит без потерь в реостатах путем регулирования напряжения генератора изменением величины емкости возбуждения. Потери в механическом тормозе имеют место только на остановках, так как на вредных спусках тяговый двигатель автоматически переходит в генераторный режим.

Выбор размеров маховика, определяющих его кинетическую энергию, осложняется тем, что от этих размеров зависят потери на трение о водород и в шарикоподшипниках.

Для определения потерь мощности на трение маховика о водород воспользуемся формулой [Л. 4]

$$\Delta P_s = K \gamma \left(\frac{n_p}{1000} \right)^3 D^4 (D + 5e) [\text{вт}],$$

где K — коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и качества обработки поверхности маховика;

γ — объемный вес водорода, кг/м³;

n_p — расчетная скорость маховика, об/мин;

D — диаметр маховика, м;

e — толщина маховика, м.

По мере расходования кинетической энергии маховика асинхронный генератор снижает напряжение и частоту. Поддержание напряжения в нужных пределах требует постепенного увеличения емкости конденсаторов возбуждения. Чтобы избежать громоздкой конденсаторной батареи, следует ограничить снижение рабочей скорости маховика. Зададимся минимальной рабочей скоростью маховика в 1 500 об/мин, что соответствует использованию 74,5% запасенной им энергии. Примем для расчета, что маховик отдает постоянную мощность. В этом случае скорость вращения маховика через t час после начала работы электровоза

$$n_t = 2970 \sqrt{1 - 0,745 \frac{t}{T}},$$

где 2970 — начальная скорость вращения, об/мин;

T — продолжительность работы электровоза между зарядками, час.

Необходимая для расчета потерь маховика величина его расчетной скорости вращения за период T час

$$n_p = \sqrt[3]{\frac{1}{T} \int_0^T n_t^3 dt}.$$

Подставляя значение n_t , получим:

$$n_p = 2390 \text{ об/мин.}$$

Удовлетворительное охлаждение асинхронной машины достигается при очень малом давлении водорода внутри корпуса (до 0,1 ат). Примем с запасом это давление равным 0,2 ат. В этом случае коэффициент K в формуле для ΔP_s может быть принят равным:

$$K = \frac{147}{D} + 8,2D^2.$$

Подставляя значения K , n_p и γ , получим:

$$\Delta P_s = 13,7 \cdot D^3 (2,45 + 0,14D^3)(D + 5e).$$

Исходя из формы сечения маховика, величину e можно принять в 3 раза больше толщины сплошного диска, равного весу маховика. В таком случае

$$\Delta P_s = (33,6 + 1,9D^3)(D^4 + 2,45G \cdot D).$$

Подсчет потерь на трение в подшипниках производится по формуле

$$\Delta P_n = \frac{1000(G + G_1)\mu \cdot d \cdot n_{cp}}{2 \cdot 0,975} [\text{вт}],$$

где G — вес маховика, т;

G_1 — вес ротора и вала, т;

μ — приведенный к валу коэффициент трения шариковых опор;

d — диаметр цапфы вала маховика, м;

n_{cp} — средняя скорость вращения маховика, об/мин.

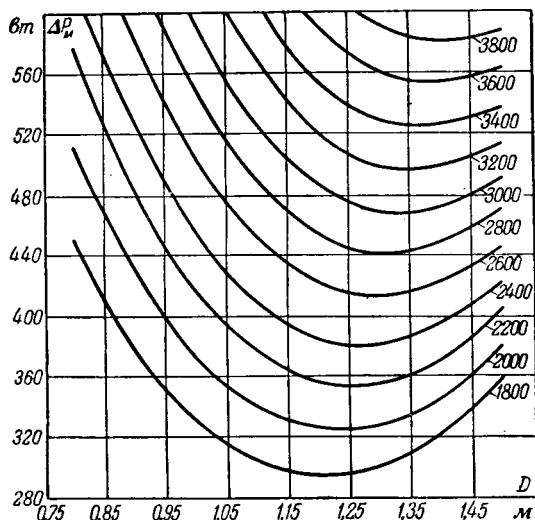


Рис. 2. Кривые зависимости суммарных потерь маховика от диаметра для маховиков с кинетической энергией 1800 . . . 3800 вт-ч.

Величину G_1 можно принять равной $0,1 \cdot G$.

Средняя скорость вращения маховика для принятого закона изменения скорости во времени

$$n_{ср} = 2310 \text{ об/мин.}$$

Подставляя числовые значения в последнюю формулу, получим:

$$\Delta P_m = 1,31 \cdot 10^6 \cdot G \nu d.$$

Суммарные потери маховика

$$\Delta P_m = (33,6 + 1,9D^3)(D^4 + 2,45GD) + 1,31 \cdot 10^6 \cdot G \nu d.$$

Принимая радиус инерции маховика равным 0,77 его радиуса, получим:

$$G = \frac{A_m}{2600 D^2},$$

где A_m — кинетическая энергия маховика, вт-ч.

Для предварительного расчета прочности вала можно принять:

$$d = 5 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{A_m}.$$

Подставляя значения G и d в выражение для ΔP_m , получим:

$$\Delta P_m = (33,6 + 1,9D^3) \left(D^4 + \frac{1,23 \cdot 10^{-3} A_m}{D} \right) + 3,3 \frac{\mu A_m \sqrt[3]{A_m}}{D^2}.$$

Трение в подшипниках весьма существенно влияет на работу механического инерционного аккумулятора. В данном случае должны быть применены шарикоподшипники высокого класса точности при тщательно подобранной жидкой смазке. Для этих условий величину коэффициента трения можно принять равной 0,003. Этому значению μ соответствуют кривые рис. 2 для маховиков с кинетической энергией 1800 . . . 3800 вт-ч.

Диаметр маховика ограничивается его допустимой окружной скоростью, которая даже при использовании высококачественной стали не превышает 250 м/сек, что при 3000 об/мин соответствует маховику диаметром 1,6 м. В шахтных условиях диаметр маховика ограничивается шириной электровоза. У существующих рудничных аккумуляторных электровозов откаточного типа ширина не превышает 1,34 м, а у электровозов-карликов — 0,9 м. Поэтому диаметр маховика для рудничного электровоза может быть выбран в пределах 0,9 . . . 1,3 м в зависимости от типа электровоза. Эти значения оказываются меньше оптимальных, определяемых по кривым рис. 2.

Электрическое оборудование и схема. Статор асинхронного двигателя (генератора) можно было бы выполнить с одной или двумя полюсопереключаемыми обмотками, например: $2p_2 = 2$ и 4 и $2p_2 = 6$ и 12 . В этом случае снизились бы потери при зарядке неподвижного аккумулятора, улучшилось регулирование скорости электровоза, уменьшилась емкость конденсаторной батареи. Однако наряду с этим вариант с полюсопереключаемой обмоткой имеет недостатки: усложняется труднодоступная обмотка и увеличивается количество выводов, что весьма нежелательно, учитывая необходимость обеспечения герметичности корпуса. Возникают также трудности при конструировании машины в связи с изменением насыщения ее магнитопровода при работе с различным количеством полюсов. Генератор не может работать на прямолинейной части характеристики намагничивания (рис. 3), так как при этом не обеспечивается постоянство напряжения при колебаниях нагрузки. С другой стороны, магнитопровод генератора не должен быть сильно насыщен, так как в противном случае возрастут

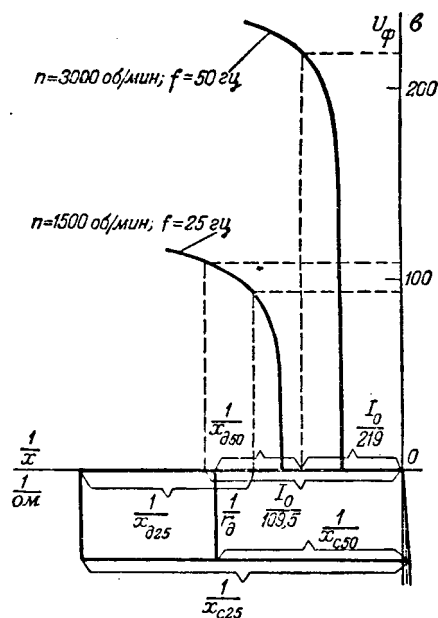


Рис. 3. Характеристики намагничивания генератора ($2p_2 = 2$) и диаграмма проводимостей.

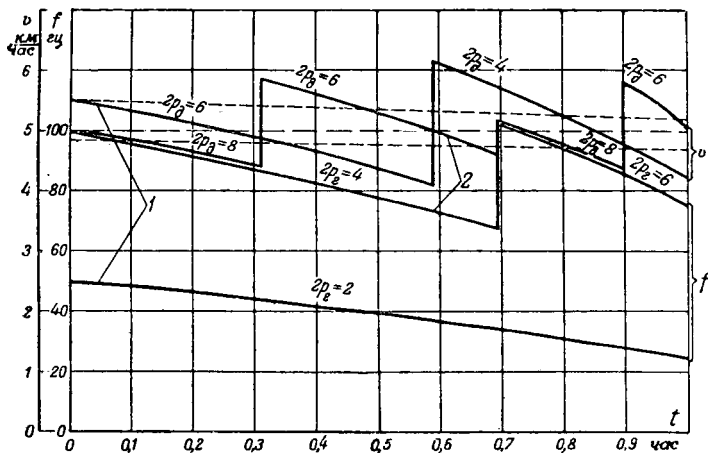


Рис. 4. Изменение скорости электровоза и частоты тока во времени.

потери в машине и увеличится емкость конденсаторной батареи.

Возможно иное решение, наиболее надежное с точки зрения эксплуатации, — применение обычной статорной обмотки ($2p_2 = 2$). В этом случае придется согласиться с меньшими возможностями регулирования скорости электровоза и с несколько большей конденсаторной батареей. При нижнем пределе рабочей скорости маховика 1500 об/мин в нормальных эксплуатационных условиях оба варианта с точки зрения потерь при зарядке маховика равноценны. Повышение пусковых потерь при односкоростной обмотке может иметь место лишь в редких случаях, после длительного простоя электровоза.

В качестве регулируемого тягового двигателя для рудничного электровоза применим трех- или четырехскоростной трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель.

На рис. 4 кривые 1 показывают характер изменения скорости электровоза и частоты тока во времени для следующего варианта:

$$2p_2 = 2; 2p_0 = 4; 6 \text{ и } 8.$$

Кривые 2 построены для варианта

$$2p_2 = 2; 4 \text{ и } 6; 2p_0 = 6; 8 \text{ и } 12.$$

Обмотки низших скоростей двигателей используются при пуске и маневрах. Продолжительность рабочего цикла электровоза принята равной 1 часу. Для сравнения пунктиром вычерчена зависимость $v = f(t)$ рудничного аккумуляторного электровоза (первый и последний рейс в промежутке между двумя зарядками).

Во время движения электровоза между напряжением и частотой генератора поддерживается соотношение

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2}.$$

В этом случае при снижении частоты от f до $0,5f$ тяговый двигатель будет работать при практически неизменных $\cos \varphi$, к. п. д., максимальном моменте, абсолютном скольжении и пусковом токе. Снижение частоты сопровождается заметным увеличением пускового момента двигателя. Поэтому по мере снижения частоты следует уменьшать напряжение генератора, поддерживаемое во время пуска электровоза.

Средняя величина намагничивающего тока генератора поддерживается постоянной. Необходимая емкость конденсаторной батареи определяется, исходя из равенства нулю реактивных токов в режиме пуска электровоза при скорости вращения маховика 1500 об/мин (рис. 3). Для рудничного электровоза целесообразно применить полистирольные конденсаторы.

Схема электровоза и зарядной подстанции представлена на рис. 5.

На электровозе установлены: короткозамкнутый двигатель (генератор) Д (Г); трехскоростной короткозамкнутый тяговый двигатель ТД; главный контроллер; контроллер возбуждения, вал которого вращается серводвигателем СД; педаль форсировки возбуждения и конденсаторная батарея С.

Для зарядки маховика электровоз при помощи штепселей Ш соединяется с пускателем П трансформатора Т зарядной подстанции. При повороте машинистом рукоятки главного контроллера из

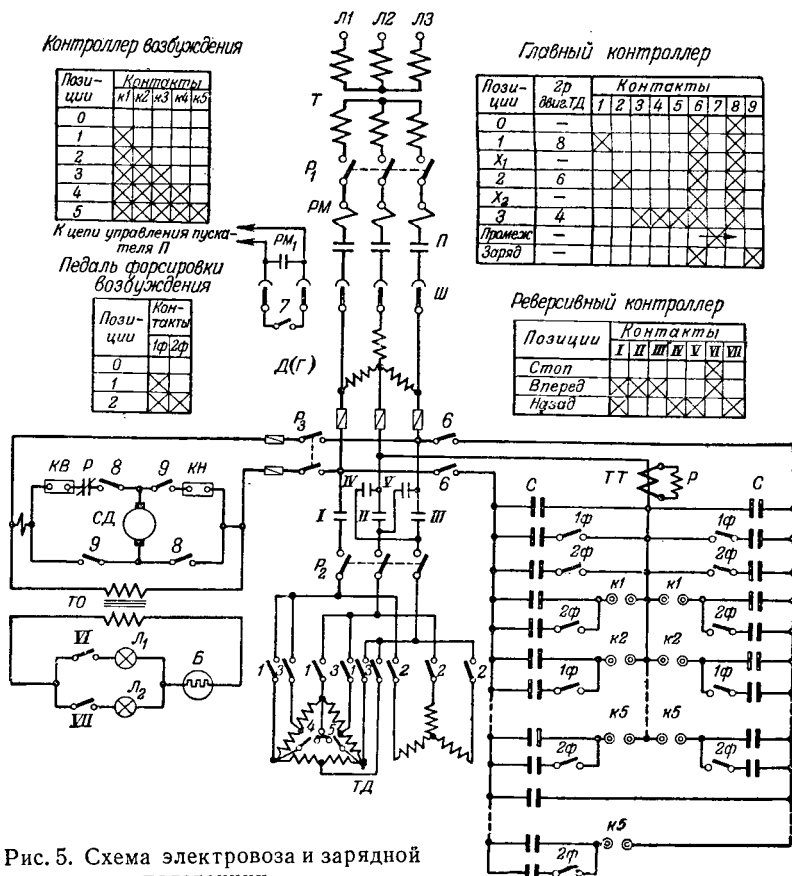


Рис. 5. Схема электровоза и зарядной подстанции.

положения 0 в положение «промежуточное» замыкается контакт 7, устанавливающий цепь питания катушки пускателя П. Зарядка производится при повороте главного контроллера в положение «заряд», при котором контакты 6 подключают к зарядной подстанции конденсаторную батарею, благодаря чему уменьшается падение напряжения в сети. Серводвигатель СД поворачивает вал контроллера возбуждения в исходное положение (минимум емкости). В положении «заряд» контакт 7 блокируется контактом реле РМ. После окончания зарядки реле РМ, размыкая свой контакт, отключает пускатель. Рукоятка главного контроллера ставится в положение 0, причем контакт 7 вторично не срабатывает и машинист отключает штепсели.

Для регулирования силы тяги при пуске электровоза используется первая или вторая ступень педали форсировки возбуждения, при помощи которой изменяется емкость конденсаторной батареи.

Регулирование скорости электровоза производится главным контроллером, который переключает число пар полюсов тягового двигателя. Реверс электровоза производится при помощи реверсивного контроллера. По мере снижения частоты генератора емкость конденсаторной батареи увеличивается автоматически. Контакт реле Р замыкается при уменьшении тока возбуждения (частоты) и включает серводвигатель, который, поворачивая вал контроллера возбуждения, увеличивает емкость конденсаторной батареи. Когда ток возбуждения возрастет, реле, срабатывая, отключает серводвигатель.

Электровоз снабжен двумя фарами, подключенными к трансформатору ТО с большим рассеянием для поддержания накала ламп при снижении напряжения и частоты генератора. С этой же целью в схеме предусмотрен бареттер Б.

Технические показатели электровоза. Прием следующие исходные данные:

Длина откатки	1 км
Грузоподъемность вагонетки	1 т
Количество вагонеток в составе	8
Средняя скорость движения	4 км/час
Полное время рейса	1 час
Количество рейсов на одну зарядку	1

В результате приближенного расчета получены следующие технические показатели электровоза:

Полный вес	3,5 т
Вес маховика	1,2 т
Диаметр маховика	1,25 м
Номинальное напряжение генератора и тягового двигателя	380 в
Количество полюсов генератора	2 $p_2 = 2$
Количество полюсов тягового двигателя	2 $p_d = 8; 6$ и 4
Часовой режим электровоза (средние величины):	

сила тяги	220 кг
скорость	4,8 км/час
мощность	2,9 квт

Емкость конденсаторной батареи	3 000 мкф
Средняя полезная мощность электровоза (на ободах колес)	0,6 квт
Потери мощности	4,0 квт

В том числе:

в тяговом двигателе и передаче	0,3 квт
на освещение, возбуждение и управление	0,15 квт
в генераторе	1,1 квт
на трение маховика	0,6 квт
в двигателе при зарядке	1,85 квт

Коэффициент полезного действия на ободах колес, отнесенный к шинам 380 в зарядной подстанции	13%
--	-----

Для снижения потерь и большей стабильности генерируемого напряжения для двигателя (генератора) предусмотрена сталь Э4-АА. При подсчете к. п. д. принято, что на 50 зарядок маховика со скорости 1 500 об/мин производится одна зарядка неподвижного маховика.

Выводы. 1. При помощи механического инерционного аккумулятора может быть запасена энергия для работы рудничного электровоза. Коэффициент полезного действия его будет примерно в 2 раза ниже к. п. д. электровоза с щелочным аккумулятором.

2. Конструкция инерционного аккумулятора весьма сложна и ответственна, поскольку на движущемся электровозе должен вращаться с большой скоростью тяжелый маховик. Особые требования должны быть предъявлены к качеству шарикоподшипников, их смазке, точности обработки и балансировке маховика, к герметичности и прочности корпуса.

3. На электровозе приходится устанавливать довольно громоздкую конденсаторную батарею. Аппаратура и схема электровоза усложняются из-за меняющейся частоты генератора.

4. Сложность конструкции электровоза не позволит ему конкурировать с применяющимися у нас для откатки в газовых и пыльных угольных шахтах аккумуляторными электровозами. Новый электровоз целесообразно испытать для откатки в тех горных выработках, где аккумуляторные электровозы не допускаются по условиям безопасности.

Литература

1. Bull. ASE, № 12, 1947 (реферат, Электричество, № 4, 1948).
2. Iron and Coal Trades Review, № 4398, т. CLXV, июль 1952.
3. Ch. Carrard. Le Girobus et le gyrotracteur a volant accumulateur d'energie cinetique. Le Genie civil, т. CXXXIX — № 1, № 3316, январь 1952.
4. C. Pfeleiderer. Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase, Springer, 1949.

[10. 2. 1955]



Автоматизация и телемеханизация гидроэлектростанций

Инж. С. П. КРАСИВСКИЙ

Москва

Материальной основой социализма является крупная промышленность, решающее место в которой занимает тяжелая индустрия с ее сердцевиной — машиностроением, являющимся источником технического перевооружения всех отраслей народного хозяйства, источником технического прогресса.

Наряду с механизацией и электрификацией важное место в техническом прогрессе занимает автоматизация. Все повышающиеся требования к точности и надежности ведения производственных процессов, а также внедрение мощных и сложных агрегатов и систем с централизованным контролем и управлением настоятельно требуют автоматизации и телемеханизации производства. Этим и объясняется все более расширяющееся применение автоматики и телемеханики во многих отраслях народного хозяйства, в том числе в энергетике и, в частности, на гидроэлектрических станциях.

Высокая технико-экономическая эффективность автоматизации гидроэлектростанций неопровержимо доказана многолетней практикой. В настоящее время все действующие гидроэлектростанции средней и большой мощности, находящиеся в системе Министерства электростанций, переведены на автоматическое управление, а новые гидроэлектростанции проектируются и строятся только как автоматизированные. Таким образом, автоматика стала неотъемлемой частью оборудования гидроэлектростанций. В связи с этим в новое издание (1953 г.) «Правил, технической эксплуатации электрических станций и сетей» [Л. 1, § 524, 539, 540, 553, 555, 559, 560, 562, 563, 566, 567 и 589] включен ряд обязательных требований к автоматизации гЭС. Кроме того, Гидроэнергопроектом разработаны и Техническим управлением Министерства электростанций утверждены типовые схемы автоматизации гидроагрегатов.

Однако в упомянутых документах речь идет лишь о некоторых признаках, которые являются общими для всех автоматизированных гидроэлектростанций и относятся главным образом к гидроагрегатам. В них ничего не сказано о различиях в объеме и степени автоматизации отдельных типов гидроэлектростанций. Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы внести в этот вопрос необходимые уточнения и сформулировать дальнейшие задачи в области автоматизации гидроэлектростанций.

На гидроэлектростанциях автоматизацией должны быть охвачены два вида оборудования: 1) энергетическое (турбины, генераторы и их вспомогательное оборудование, разное электрооборудование); 2) механическое (оборудование гидротехнических сооружений: щиты и затворы, сороудерживающие решетки, подъемные устройства). Под автоматической в общем смысле следует понимать, на наш взгляд, такую гидроэлектростанцию, на которой автоматизировано энергетическое и механическое оборудование и управ-

ление им осуществляется из одного пункта.

В зависимости от количества автоматизированных технологических процессов и степени их автоматизации, наличия дежурного персонала и принятого способа управления оборудованием автоматические гидроэлектростанции можно разделить на четыре основные группы: 1) автоматические с дистанционным управлением; 2) автоматические телеуправляемые или автоматические с телеуправлением; 3) полностью автоматизированные; 4) полуавтоматические. Установим характерные особенности каждой группы автоматических гидроэлектростанций.

Автоматические гидроэлектростанции с дистанционным управлением. Основным признаком такой станции надо считать сосредоточение управления ее основным энергетическим и механическим оборудованием на центральном пункте управления, который обычно находится в здании самой станции или на небольшом расстоянии от него. Только на этом пункте и имеется дежурный персонал.

Пуск и остановка агрегатов производятся посредством командного импульса, подаваемого дежурным с центрального пункта управления. С центрального же пункта осуществляется дистанционное управление затворами перед турбинами в речных (приплотинных) установках и затворами перед напорными трубопроводами в деривационных установках. Кроме того, эти затворы должны быть оборудованы устройствами для автоматического закрытия (быстрого сброса) при авариях, требующих немедленного прекращения доступа воды в турбины, например при разгоне агрегата.

В приплотинных гидроэлектростанциях управление оперативными затворами плотины должно осуществляться, как правило, дистанционно с центрального пункта управления. Однако в некоторых случаях может оказаться целесообразным применение на плотинах автоматических затворов, например при сравнительно небольшой емкости водохранилища, когда требуется достаточно точно поддерживать постоянный горизонт верхнего бьефа. На центральный пункт управления должны передаваться: положение оперативных затворов как дистанционно управляемых, так и автоматических; уровни воды в верхнем и нижнем бьефах приплотинных и в напорном бассейне деривационных гидроэлектростанций.

На крупных речных гидроэлектростанциях с большими водохранилищами затворы обычно служат не для регулирования верхнего бьефа, а в основном для сброса паводковых вод и льда. В этом случае затворы не автоматизируются.

Головной узел деривационных гидроэлектростанций бывает удален от здания станции на километры и десятки километров. Оставить такой узел без обслуживания и надзора, как правило, нельзя, на нем надо иметь местный пункт управления с постоянными дежурными или дежурными на дому. Управление механизмами гидротехниче-

ских сооружений головного узла должно осуществляться с этого пункта.

Автоматические телеуправляемые гидроэлектростанции. Основным признаком такой гидроэлектростанции является наличие телеуправления агрегатами или с базисной гидроэлектростанции каскада, или с районного диспетчерского пункта, или, наконец, с диспетчерского пункта энергосистемы. Кроме телеуправления, должен иметься соответствующий объем телесигнализации и телеизмерения [Л. 1, п. 771].

Говоря о телеуправлении агрегатом, мы имеем в виду его пуск, остановку, перевод из режима синхронного компенсатора в режим генератора и обратно. Все эти операции должны осуществляться путем воздействия на автоматику каждого агрегата (индивидуальное управление) или путем изменения уставок устройств автоматического регулирования частоты, активной и реактивной мощности с возможностью телемеханического включения и отключения этих устройств (групповое управление). Кроме телеуправления агрегатом, имеется в виду также телеуправление выключателями основных линий и трансформаторов, междушинными и секционными выключателями. В ряде случаев применяется телеуправление оперативными затворами гидротехнических сооружений.

В объем телесигнализации рекомендуется включать: сигнализацию положения агрегатов и прохождения автоматических операций их пуска и остановки; сигнал «компенсаторный режим» для агрегатов, работающих в этом режиме; сигнализацию положения основных выключателей и автоматических устройств группового управления, а также сигнализацию присоединения агрегата к этим устройствам; сигнал «диспетчерское управление» для отдельно управляемых агрегатов, включая сигнализацию готовности агрегата к пуску; аварийную и предупредительную сигнализацию.

В аварийную и предупредительную сигнализацию включается общий сигнал об аварийном состоянии телеконтролируемого оборудования на станции при отключении этого оборудования от автоматических защит. Если выключатели будут отключены в результате действия электрической и гидромеханической защит от внутренних повреждений, то включение этих выключателей от кнопок и ключей телемеханики должно быть исключено. В нее также входят: общий сигнал неисправности на станции; сигнализация предельных положений телеуправляемых оперативных затворов гидротехнических сооружений; сигнализация предельных отметок уровней верхнего и нижнего бьефов, если эта сигнализация требуется по условиям водопользования; сигнализация исчезновения напряжения оперативного тока на станции; сигнализация перегрузки генераторов по току статора и перегрузки силовых трансформаторов; сигнализация замыкания на землю в сети генераторного напряжения; сигнализация работы устройств автоматического повторного включения линий электропередачи, устройств автоматическо-

го включения резерва и автоматической разгрузки по частоте.

В объем телеизмерения рекомендуется включать непрерывное измерение суммарной активной мощности гидроэлектростанции, а также измерение реактивной мощности по вызову или непрерывно. Измерение реактивной мощности необходимо лишь в том случае, если станция принимает участие в регулировании напряжения. В него также рекомендуется включать измерение положения уставок группового регулирования активной мощности (по вызову); измерение отметок верхнего бьефа гидроэлектростанции, если имеют место значительные суточные колебания уровня; измерение (по вызову) отметок нижнего бьефа, если это требуется по условиям водопользования (судоходство, орошение, промышленное водоснабжение); измерение положения телеуправляемых оперативных затворов гидротехнических сооружений.

На крупных и многоагрегатных телеуправляемых гидроэлектростанциях в некоторых случаях может быть сохранен дежурный главным образом с наблюдательными функциями. В этих случаях объем телемеханизации может быть несколько уменьшен, например, в отношении количества управляемых выключателей, затворов гидротехнических сооружений, телесигнализации. Это особенно относится к станциям, которые телеуправляются с центрального диспетчерского пункта энергосистемы и осуществляют регулирование частоты и мощности в энергосистеме. Дежурный, сохраняемый на этих станциях, получает и некоторые оперативные функции, а телеуправление применяется только к тем выключателям высших напряжений, операции которыми могут способствовать предупреждению или быстрой ликвидации аварийных режимов. Телеуправление затворами гидротехнических сооружений и в ряде случаев телеизмерение уровней воды на этих станциях исключаются.

Объем аварийной и предупредительной телесигнализации можно ограничить общим сигналом об аварийном состоянии телеконтролируемого оборудования. Если телеуправляемая гидроэлектростанция не имеет постоянного дежурства и обслуживается только дежурным на дому, который периодически посещает и осматривает станцию, то звуковая и световая сигнализация о возникновении аварий и неисправностей на гидроэлектростанции должна быть у дежурного на дому. При переходе с телеуправления на местное или при повреждении телесвязи дежурный на дому должен принять на себя управление станцией и устранять мелкие неполадки. Ввиду этого он должен обладать необходимой квалификацией. На телеуправляемых деривационных гидроэлектростанциях дежурный должен также руководить персоналом местного поста управления головного узла.

Все телеуправляемые гидроэлектростанции должны иметь на пульте режимный ключ, позволяющий переводить гидроэлектростанцию с разрешения диспетчера на местное управление.

Полностью автоматизированные гидроэлектростанции. На этих гидроэлектростанциях автоматизированы не только защита и регулирование, но также пуск и остановка агрегатов. На них все необходимые изменения в процессе эксплуатации производятся автоматически, без участия персонала.

Можно указать на два вида этих гидроэлектростанций: 1) гидростанции малой мощности, обычно одноагрегатные; 2) многоагрегатные гидроэлектростанции, обычно средней или большой мощности.

Для автоматического пуска и остановки полностью автоматизированных гидроэлектростанций малой мощности используются: горизонт воды в верхнем бьефе, нагрузка сети и время суток. В первом случае работа станции определяется наличием воды в водохранилище, ее пуск и остановка осуществляются от поплавковых устройств. В последнем случае станция включается и отключается в определенные часы суток от контактных часов и других устройств. Возможна комбинация различных устройств, например, в том случае, когда станция работает в зависимости от нагрузки сети, но уровень воды в верхнем бьефе не должен срабатываться ниже определенной заданной отметки.

На полностью автоматизированных гидроэлектростанциях малой мощности персонал необходим для периодического осмотра их и ликвидации аварий.

Полностью автоматизированные многоагрегатные гидроэлектростанции работают от автооператора и могут не иметь постоянного дежурного персонала.

Полуавтоматические гидроэлектростанции.

К полуавтоматическим будем относить гидроэлектростанции, на которых пуск и нормальная остановка отдельных агрегатов производятся вручную на самой станции обслуживающим персоналом. Регулирование же агрегатов и их защита от аварий осуществляются автоматически. Постоянное дежурство на станции отсутствует. Аппаратура автоматического управления на этих станциях отличается простотой.

Делать полуавтоматическими целесообразно малые гидроэлектростанции, расположенные вблизи какого-либо предприятия, крупной электростанции или другого пункта, где имеется технический персонал, который может прийти на станцию, производить пуск и остановку агрегатов и вести за ней систематическое наблюдение. На этот пункт должно сигнализироваться аварийное отключение агрегатов. Если станция не находится поблизости от такого пункта, то управление ею можно поручить одному или двум лицам, которые могли бы обслуживать и электрическую сеть.

Наиболее широко полуавтоматический способ управления должен внедряться на сельских гидроэлектростанциях, число которых исчисляется у нас тысячами и непрерывно растет.

Делать полуавтоматическими возможно станции, работа которых протекает равномерно, без частых пусков и остановок агрегатов. В против-

ном случае придется вводить постоянное дежурство или делать станцию полностью автоматизированной, или автоматической с дистанционным управлением.

Нами составлен перечень автоматизируемых производственных процессов для трех групп гидроэлектростанций: автоматических с дистанционным управлением, автоматических с телеуправлением и полностью автоматизированных (табл. 1).

Как видно из табл. 1, большой разницы между станциями, имеющими различную степень автоматизации, нет. Если взять гидротехнические сооружения, то разница заключается только в том, какое применено управление оперативными затворами (дистанционное или автоматическое) и измерение уровней воды (дистанционное или телемеханическое). Что касается энергетического оборудования, то разница состоит в том, какое применено управление агрегатами (дистанционное, автоматическое или телемеханическое). Это свидетельствует о возможности легко перейти от одного вида автоматической гидроэлектростанции к другому. Более сложной является, конечно, автоматизация деривационных гидроэлектростанций, поскольку в этом случае появляется отдельный, значительно удаленный головной узел сооружений.

Из табл. 1 видно также, что наибольшее количество объектов автоматизации приходится на управление (50%) и сигнализацию (31%) и только 19% приходится на долю измерений и регулирования.

Автоматическое управление гидроагрегатами и их вспомогательным оборудованием позволило значительно сократить объем непосредственного обслуживания и наблюдения за оборудованием со стороны людей. Необходимость в связи с этим предохранить оборудование от работы в ненормальных и тем более аварийных режимах заставила оснастить его дополнительными автоматическими устройствами контроля и защиты, особенно в механической части.

Необходимость применения отдельных видов гидромеханической защиты и контроля оговорена в «Правилах технической эксплуатации» [Л. 1, § 553, 555, 559, 563, 566 и др.]. Однако там не охватывается весь комплекс гидромеханических контрольно-защитных устройств, применяемых на автоматических гидроэлектростанциях. Поэтому нами составлен детальный перечень этих устройств (табл. 2).

Как видно из табл. 2, агрегат останавливается только при недопустимом перегреве подпятника и подшипников, прекращении водяной смазки подшипника турбины, недопустимом снижении давления в маслонапорной установке и разгоне агрегата. Во всех остальных случаях подается предупредительный сигнал.

На первых порах при автоматизации гидроэлектростанций основное внимание обращалось на автоматизацию пуска, остановки и защиты агрегатов и их вспомогательного оборудования, так как это позволяло осуществить управление станцией из одного пункта. Регулирование же актив-

Таблица 1

Перечень автоматизируемых производственных процессов на гидроэлектростанциях с различной степенью автоматизации

Наименование узлов и автоматизируемых процессов	Гидроэлектростанции		
	автоматические с дистанционным управлением	автоматические с телеуправлением	полностью автоматические
Головной узел деривационной гидроэлектростанции			
Управление оперативными затворами плотины с измерением или сигнализацией их положения [Л. 1, § 539]	$\frac{Д}{МПУ}, А$	$\frac{Д}{МПУ}, А$	$\frac{Д}{МПУ}, А$
Управление затворами отстойников и промывных устройств	$\frac{Д}{МПУ}, М$	$\frac{Д}{МПУ}, М$	$\frac{Д}{МПУ}, М$
Управление затворами водоприемных устройств	$\frac{Д}{МПУ}, М$	$\frac{Д}{МПУ}, М$	$\frac{Д}{МПУ}, М$
Измерение уровня воды в верхнем бьефе	$\frac{Д}{МПУ}, \frac{Д, Т}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{МПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$	$\frac{Д}{МПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$
Сигнализация „опасных“ уровней воды в верхнем бьефе [Л. 1, § 488]	$\frac{Д}{МПУ}, ДД$	$\frac{Д}{МПУ}, ДД$	$\frac{Д}{МПУ}, ДД$
Сигнализация засорения сороудерживающих решеток	$\frac{Д}{МПУ}, ДД$	$\frac{Д}{МПУ}, ДД$	$\frac{Д}{МПУ}, ДД$
Напорный бассейн, трубопровод и здание деривационной гидроэлектростанции			
Управление затворами холостых водосбросов с сигнализацией их положения	$\frac{Д}{ЦПУ}, А$	А	А
Управление затворами перед напорными трубопроводами (или в начале трубопроводов при напорной деривации) с сигнализацией их положения	$\frac{Д}{ЦПУ}, А_3$	А ₃	А ₃
Управление нижними затворами напорных трубопроводов (перед турбинами) [Л. 1, § 560]	Входит в схему управления агрегатами		
Измерение уровней воды в напорном бассейне и бассейне суточного регулирования	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$
Сигнализация „опасных“ уровней воды в бассейнах [Л. 1, § 488]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ДД}$	$\frac{Д}{ДД}$
Сигнализация засорения сороудерживающих решеток перед входом в напорные трубопроводы [Л. 1, § 540]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ДД}$	$\frac{Д}{ДД}$
Сигнализация появления шуги в напорном бассейне и деривации [Л. 1, § 524]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ДД}$	$\frac{Д}{ДД}$
Плотина и здание речной гидроэлектростанции			
Управление затворами плотины с измерением или сигнализацией их положения [Л. 1, § 539]	$\frac{Д}{ЦПУ}, А$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}, А$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}, А$
Управление затворами отверстий в теле здания гидроэлектростанций для холостых водосбросов	$\frac{Д}{ЦПУ}, М$	$\frac{Д}{ЦПУ}, М$	$\frac{Д}{ЦПУ}, М$
Управление затворами перед турбинными камерами (или во всасывающих трубах)	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}$
Измерение уровней воды в верхнем и нижнем бьефах и напора гидроэлектростанции [Л. 1, § 629]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$
Сигнализация „опасных“ уровней воды в верхнем и нижнем бьефах [Л. 1, § 488]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, \frac{Т}{ЦДП}$
Сигнализация засорения сороудерживающих решеток перед турбинными камерами [Л. 1, § 540]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, ДД$	$\frac{Д}{ЦПУ}, ДД$
Сигнализация появления шуги в верхнем бьефе [Л. 1, § 524]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Д}{ЦПУ}, ДД$	$\frac{Д}{ЦПУ}, ДД$
Оборудование в здании гидроэлектростанций (обоих типов)			
Управление пуском и остановкой агрегатов [Л. 1, § 560]	$\frac{Д}{ЦПУ}$	$\frac{Т}{ЦДП}$	А (от автооператора)
Управление маслонапорной установкой, смазкой, охлаждением и торможением агрегата [Л. 1, § 560]	А	А	А

Продолжение

Наименование узлов и автоматизируемых процессов	Гидроэлектростанции		
	автоматические с дистанционным управлением	автоматические с телеуправлением	полностью автоматические
Управление пневматическим хозяйством станции [Л. 1, § 562]	А	А	А
Управление установками технического водоснабжения станции [Л. 1, § 566]	А	А	А
Управление насосами откачки и сигнализация уровня воды в дренажных колодцах [Л. 1, § 567]	А	А	А
Регулирование к. п. д. поворотных лопастных турбин по напору (угла поворота рабочих лопастей)	А	А	А
Регулирование мощности гидроэлектростанции по водотоку	А	А	А
Гидромеханическая защита и контроль агрегата [Л. 1, § 553, 555, 558, 559 и др.]	(см. табл. 2)	—	—

Принятые в таблице сокращенные обозначения: А — автоматический; Д — дистанционный; М — местный; Т — телемеханический; ЦПУ — центральный пункт управления станции; МПУ — местный пост управления (на сооружениях); ЦДП — центральный диспетчерский пункт энергосистемы или каскада гидроэлектростанций; ДД — дежурство на дому. В числителе указан вид управления, в знаменателе — место управления или контроля. Например, $\frac{Д}{ЦПУ}$ означает дистанционное управление с центрального пункта управления. Индекс з означает закрытие (сброс). Запятая заменяет слово „или“.

Примечание. Таблица составлена в предположении, что на головных узлах деривационных гидроэлектростанций независимо от степени автоматизации их имеется местный пост управления и постоянно проживает эксплуатационный персонал, который дежурит либо на этом посту, либо дома. Персонал систематически осматривает сооружения и оборудование, при всяких ненормальных случаях он сигналом вызывается на местный пост управления. На напорном бассейне деривационных гидроэлектростанций и плотине речной установки постоянного дежурства не предполагается.

ной мощности и частоты, а также распределение нагрузки между работающими агрегатами оставалось ручным и индивидуальным и осуществлялось персоналом путем воздействия с центрального пункта управления на регулятор скорости турбины. При таком положении дежурный персонал не мог обеспечить такого регулирования, которое отвечало бы наивыгоднейшим условиям работы, например с наивыгоднейшими к. п. д. и напорами, что приводило к излишним потерям энергии. Поэтому на гидроэлектростанциях стали применять автоматическое регулирование мощности.

В Узбекской ССР и на канале им. Москвы автоматические регуляторы мощности по водотоку применены на ряде одноагрегатных гидроэлектростанций, использующих естественный расход реки и работающих на общую сеть. Они довольно просты и в то же время эффективны, так как на несколько процентов повышают выработку электроэнергии. Их следует внедрять на всех таких гидроэлектростанциях.

При автоматизации многоагрегатных гидроэлектростанций управление и регулирование всеми агрегатами должны быть увязаны между собой. Это достигается при помощи комплексного прибора — автоматического оператора (автооператора), который соединяет в себе устройства группового регулирования активной мощности гидроэлектростанции (изменение суммарной активной нагрузки и распределение ее поровну или в заданной пропорции между агрегатами) и группового управления (пуск или остановку очередного агрегата). Применение автооператора обеспечивает наивысший к. п. д. гидроэлектростанции при переменном режиме ее работы.

М. Д. Кучкиным и Ю. И. Поповым в Гидроэнергопроекте и В. А. Богомолковым в Институте электротехники Академии наук Украинской ССР

разработаны конструкции автооператоров, которые успешно прошли лабораторные испытания. Надо быстрее внедрять их в эксплуатацию. Предложенные конструкции автооператоров позволяют обеспечить управление агрегатами в зависимости от величины нагрузки и напора, а также пуск резервных агрегатов при аварийном снижении частоты в энергосистеме или при аварийном отключении работающих агрегатов. Надо также шире внедрять автоматический регулятор угла поворота лопастей рабочего колеса турбины в зависимости от напора, разработанный в Институте электротехники Академии наук Украинской ССР.

Если в деле автоматизации энергетического оборудования гидроэлектростанций у нас достигнуты значительные успехи, то значительно хуже дело обстоит с автоматизацией механического оборудования гидротехнических сооружений, особенно затворов. Надо шире внедрять на наших гидроэлектростанциях дистанционно управляемые и автоматические, особенно вододействующие, затворы, а также такой простой и надежный привод, как гидравлический. На автоматизированных гидроэлектростанциях более широко должны применяться сифоны, которые обеспечивают автоматический сброс воды из водохранилища или напорного бассейна, а в некоторых случаях могут использоваться как шугосбросы.

Для измерения горизонтов воды у нас наиболее широкое распространение получили сельсинные устройства завода «Электропульт». Следует также более широко внедрять разработанные Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники и хорошо зарекомендовавшие себя на практике приборы с импульсными двигателями постоянного тока, которые могут работать по телефонной линии.

При внедрении на автоматизированных гидро-

Таблица 2

Перечень гидромеханических устройств контроля и защиты оборудования на автоматических гидроэлектростанциях

Наименование защиты	Защита действует на				Наименование защиты	Защита действует на			
	сигнал	остановку агрегата	включение резерва	сброс щитов		сигнал	остановку агрегата	включение резерва	сброс щитов
Повышение температуры подпятника:					Понижение давления в маслонапорной установке:				
1-я ступень	Да	—	—	—	1-я ступень	Да	—	Да	—
2-я ступень (перегрев)	—	Да	—	—	2-я ступень (недопустимое)	—	Да	—	—
Повышение температуры масла в ванне пяты	Да	—	—	—	Изменение уровня масла в сливном баке маслонапорной установки:				
Понижение уровня масла в ванне пяты	Да	—	—	—	повышение	Да	—	—	—
Повышение температуры верхнего подшипника генератора ¹ :					понижение	Да	—	—	—
1-я ступень	Да	—	—	—	Повышение уровня масла в баке лекажного насоса:				
2-я ступень (перегрев)	—	Да	—	—	1-я ступень	—	—	Да	—
Повышение температуры нижнего подшипника генератора ¹ :					2-я ступень (недопустимое)	Да	—	—	—
1-я ступень	Да	—	—	—	Обрыв разрывных приспособлений направляющего аппарата турбины	Да	—	—	—
2-я ступень (перегрев)	—	Да	—	—	Появление воды на крышке турбины:				
Понижение уровня масла в ванне нижнего подшипника генератора ¹	Да	—	—	—	1-я ступень	Да	—	—	—
Повышение температуры подшипника турбины (при масляной смазке):					2-я ступень	—	—	Да	—
1-я ступень	Да	—	—	—	Засорение фильтров на трубопроводах технической воды	Да	—	—	—
2-я ступень (перегрев)	—	Да	—	—	Прекращение подачи воды на воздухо-и маслоохладители	Да	—	—	—
Понижение уровня масла в верхней ванне подшипника турбины	Да	—	—	—	Повышение температуры охлаждающего воздуха генератора	Да	—	—	—
Прекращение водяной смазки подшипников турбины:					Разгон агрегата	—	Да	—	Да
1-я ступень (кратковременное)	—	—	Да	—	Аварийный (автоматический и от кнопки) сброс щитов перед турбинами	—	Да	—	—
2-я ступень (длительное)	—	Да	—	—	Превышение времени пуска и остановки:				
					невыполнение операций пуска	Да	—	—	—
					невыполнение операций остановки	Да	—	—	Да

¹ Относятся к генераторам подвешенного типа; у генераторов зонтичного типа контролируется температура единственного генераторного подшипника.

электростанциях предложенных до настоящего времени шугосигнализаторов надо иметь в виду, что они не являются достаточно совершенными. Над созданием шугосигнализаторов, более точно и надежно определяющих моменты начала и конца шугообразования и позволяющих, таким образом, максимально экономить расход электроэнергии на обогрев сороудержательных решеток, надо еще основательно поработать.

Необходимо улучшать схемы и конструкции устройств автоматической защиты при разрыве напорных трубопроводов, так как все известные устройства не дают полной гарантии точной и безотказной работы.

Надо помнить, что наиболее полный технико-экономический эффект дает комплексная автоматизация предприятия, потому необходимо расширять степень автоматизации гидроэлектростанций, в частности, за счет внедрения ее на гидротехнических сооружениях, а также внедрения автоматических регуляторов мощности и автооператоров.

Литература

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей, Госэнергоиздат, 1953.

[15.1.1955]



Принцип системы телеуправления на статических элементах

Инж. Р. Л. РАЙНЕС

Москва

1. Обязательным условием действия наиболее распространенных телемеханических систем является выполнение ими двух функций: предварительного избирания объекта на расстоянии и последующего управления им.

Процесс избирания объекта в устройствах распределительного типа, использующих один канал связи между диспетчерским и контролируемым пунктами, осуществляется в результате согласованного переключения единого канала на передающем и приемном его концах; управление же объектом производится импульсом управления, отличающимся определенным импульсным признаком.

Переключение канала производится импульсами движения, передаваемыми в форме импульсной серии по каналу и воздействующими на специальные переключатели (распределители) на концах линии.

Практически можно совместить импульс управления (сигнализации) с импульсом движения. В этом случае импульсная серия, в которую войдут импульсы с различными признаками, будет представлять код устройства, по закону которого осуществляются все телемеханические операции.

Анализ методов построения схем телеуправления показывает, что механизм движения является важнейшим и определяющим фактором телемеханической системы.

Такие показатели телемеханического устройства, как скорость передачи сигнала, надежность действия, аппаратное исполнение основных функциональных узлов и т. п., полностью обусловлены формой движения и характеристикой импульсов кода.

В большинстве практических устройств для импульсной серии характерны формы, показанные на рис. 1. В существующих устройствах, как правило, импульсы движения генерируются и передаются релейно-контактными узлами, почему на входе канала они имеют прямоугольную форму. При прохождении по каналу связи импульсы по известным причинам претерпевают качественные искажения. На приемной же стороне, на выходе, импульс снова приобретает прямоугольную форму, так как электромагнитное реле реагирует на два конечных его значения (рис. 2).

Можно сказать, что возникает несоответствие между формой генерируемых импульсов и условиями прохождения их по каналу. Как известно,

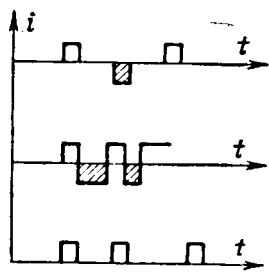


Рис. 1.

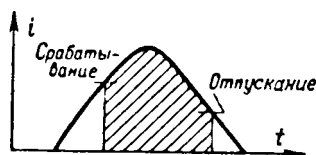


Рис. 2.

соблюдение прямоугольной формы импульсов требует расширения полосы пропускания частот по каналу или понижения скорости передачи. Генерация таких импульсов при помощи релейно-контактных элементов значительно ограничивает верхний предел пульсации.

Вместе с тем работа электромагнитных контактных реле в качестве пульсирующей является наиболее тяжелым режимом для них. Поэтому стабильность и безотказность действия устройства телеуправления непосредственно связаны с поведением пульсирующих контактов. Остальные реле, участвующие в других узлах схемы, как общих, так и индивидуальных, несмотря на большое их количество, в несравненно меньшей степени влияют на работу схемы и условия обслуживания устройства.

Таким образом, отказ от контактных реле в пульсирующих узлах и замена их статическими элементами следует рассматривать как одно из первоочередных технических мероприятий в целях совершенствования аппаратуры телеуправления в целом.

2. Статические элементы в настоящее время образуют большой и многообразный класс аппаратуры, находящий применение в различных областях техники. Однако в приложении к устройствам телеуправления сегодня еще затруднительно указать тот вид аппаратуры, который практически и принципиально соответствовал бы рационально построенной системе телеуправления.

Вместе с тем одно положение следует считать уже бесспорным — полная, без исключений, замена в существующих устройствах телеуправления контактных реле бесконтактными элементами релейного действия оказывается нерациональной и неэкономичной. Результаты опытных разработок в этом направлении некоторых организаций полностью подтвердили это. Объяснение такого положения следует искать в существовании, в принципе, взаимной обусловленности между характеристикой аппаратных элементов и динамикой работы схемы в целом. Поэтому произвольное механическое сочетание этих факторов в одном устройстве не может дать оптимального решения задачи.

В соответствии с изложенным можно наметить как первоочередную задачу применение такого механизма движения, природа которого обусловлена свойствами используемых статических элементов. Этому условию в определенной степени отвечает предложенный автором принцип системы управления, в которой для осуществления движения элементы релейного действия не требуются вовсе.

3. В рассматриваемой системе роль импульсной серии выполняет проходящий по каналу связи синусоидальный (переменный) ток со строго определенным количеством периодов (рис. 3). Роль импульса и паузы движения выполняют полуволны колебаний. Метод избирания (распределительный, комбинационный) предлагаемым принципом не обусловлен и может быть любой.

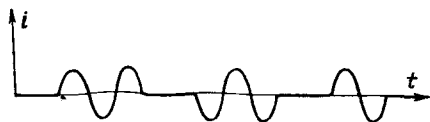


Рис. 3.

В силу принятого принципа генерации импульсов передача в линию и прием их осуществляются статическим путем. Понятно, что последующие (за указанными выше) функции могут выполняться в схеме элементами любого типа.

Импульсный признак — второй по важности фактор для работы устройства. Его характеристика обусловлена принципом данно системы. Действительно, образование импульсного признака путем непосредственного воздействия на генератор переменного тока (с целью изменения его параметров) в данном случае оказывается либо нерациональным, либо вообще невыполнимым. Поэтому в качестве импульсного признака предлагается прекращение посылки колебаний в канал связи на определенной фазе соответствующего периода. Длительность перерыва питания регулируется дополнительным счетчиком, что обеспечивает строго определенный интервал тока в линии.

Такой импульсный признак не следует рассматривать как временной параметр, так как фиксация его на приемной стороне будет осуществляться не замедленным органом, а нормально действующим. Действительно, если на приемной стороне синусоидальные колебания превращать в пульсирующий ток (рис. 4), то импульсный признак, выражаемый отсутствием колебаний, будет отмечаться немедленно же в начале его возникновения (момент t_1).

Если в обычных системах фиксация временного признака происходит в результате замера определенной продолжительности удлиненной паузы $t_{\text{пр}}$, существенно отличной от длительности нормальной, то в данном случае импульсный признак определяется отсутствием колебаний, поступающих из линии связи. С этой целью выпрямленный на приемной стороне переменный ток питает незамедленное реле постоянного тока.

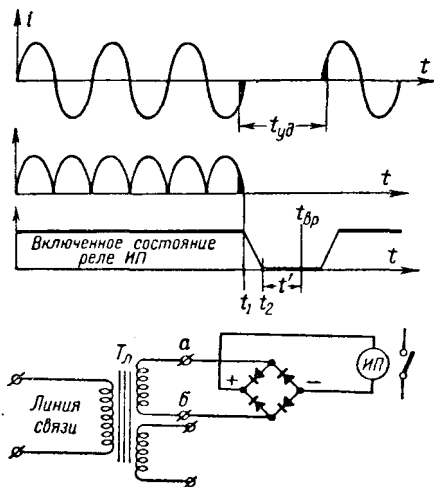


Рис. 4.

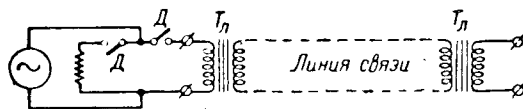


Рис. 5.

При наличии в серии импульсного признака реле ИП отпустит и своими выходными контактами произведет соответствующую операцию. Отсюда следует, что абсолютное значение времени перерыва тока здесь значительно меньше (на величину t') длительности удлиненной паузы в известных системах и определяется, в основном, временем $t_{\text{ср}}$, необходимым для срабатывания индивидуального реле. Понятно, что такую же функцию может выполнить и реле переменного тока, включенное непосредственно к выводам $а б$ дополнительной обмотки линейного трансформатора T_a (рис. 4).

Тип распределителя не обусловлен принципом системы. При применении искателей или релейных переключателей (прямого или обратного хода) управляющим импульсом будет одна из полувольт, другая же — в местных цепях (как на передающей стороне, так и на приемной стороне) запирается вентилем и выполняет роль паузы.

Возможен также режим, когда срабатывание, например, электромагнита шагового искателя будет происходить на максимуме тока, отпускание — вблизи нуля и следующее срабатывание — на максимуме другой полувольты. Таким образом, скорость движения искателя будет равна удвоенной частоте тока. Отметим, что серию синусоидальных импульсов наиболее рационально применять для релейного распределителя двойного хода.

В отличие от существующих систем, где линейные импульсы создаются пульсатором за счет энергии собственного линейного источника, в описываемой системе применена индуктивная форма питания линии связи (рис. 5), а коммутация тока в ней с целью образования импульсного признака¹ осуществляется бесконтактным способом, за счет энергии местного источника на передающей стороне.

Такой способ коммутации в общем случае должен сопровождаться возникновением переходных процессов в линии связи и местных цепях. Вредными последствиями этих процессов удается практически пренебречь в результате правильного выбора значений постоянных всех цепей и фазы разрыва и включения тока, а также схемы коммутации, обеспечивающей плавное спадание тока в цепи.

Итак:

1. Бесконтактный способ генерации и управления током в линии связи позволяет применять переменный ток в широких пределах частоты f .

Практически частоту f можно выбрать 50 гц и выше и, следовательно, в качестве источника тока в частном случае использовать сеть 50 гц.

¹ На рис. 5 Д — контакт реле, образующего импульсный признак.

2. Генератор тока может работать в режиме постоянной нагрузки при неизменных параметрах генерируемых импульсов.

3. Принцип системы позволяет создать структуру устройства с уменьшенным количеством функциональных узлов при резком упрощении схемы в целом.

4. Аппаратно-конструктивное выполнение схемы, характеризующееся заменой контактных реле в важнейших и наиболее напряженных релейных узлах статическими элементами, обеспечивает высокую стабильность и устойчивость работы устройства в условиях эксплуатации. Последнее обстоятельство является существенной гарантией правильности исполнения телемеханических операций.

5. Новый принцип указывает на одно из возможных направлений в построении быстродействующих устройств.

6. Возможность повышения частоты приводит к упрощению устройства за счет сокращения группового выбора или полного отказа от него.

7. Трансформаторная связь линии с приемопередающими цепями обеспечивает возможность высокой изоляции последних от опасных внешних влияний.

8. По изложенному выше принципу в ЦНИЭЛ МЭС было разработано устройство телеуправления и изготовлен промышленный образец, установленный на подстанции в энергосистеме. Каналом связи служила воздушная стальная линия длиной около 30 км.

Важнейшие узлы схемы — линейный и генератор импульсов — выполнены на статических элементах; в качестве распределителей были приняты шаговые искатели прямого хода, работавшие со скоростью 50 шагов в секунду. Вспомогательные узлы в общей части схемы состоят всего из пяти контактных реле. Время передачи одного приказа составляло 0,42 сек. Результаты работы в нормальной эксплуатации опытного комплекта первого быстродействующего устройства телеуправления с циркулярной передачей сигналов характеризуются следующими цифрами.

За 1,5 года устройство произвело: 443 передачи приказов на управление выключателями, 824 известительных передач с сигналами положения при переключении выключателей на подстанции, около 1 400 вызовов, сопровождавшихся

передачей такого же количества циркулярных передач сигналов. В процессе указанных свыше 4 000 телепередач было зарегистрировано 12 случаев повреждений в элементах аппаратуры и монтаже схемы: 7 случаев повреждений одного и того же искателя, 1 — выход из строя электронной лампы, 1 — разрегулировка реле разрешения, остальные случаи — обрыв проводов внешних связей и отсутствие контакта в цепях. Кроме того, имели место 5 случаев самозапуска устройства от действия грозовых разрядов. В двух из этих случаях возникла рассинхронизация, сопровождавшаяся кратковременным воспроизведением на мнемосхеме случайного сигнала (вследствие исключения ради упрощения схемы опытного комплекта некоторых вспомогательных узлов). Посылкой запроса вручную правильность мнемосхемы немедленно восстанавливалась.

Отказов в исполнении приказов зарегистрировано 19, из них 6 — в результате нарушения цепи одного и того же реле, 1 — по вине искателя и остальные — по разным причинам. Имел место один отказ в передаче известительной серии.

За этот же период не было зарегистрировано ни одного неправильного приказа и ложного сигнала в процессе рабочих передач. Поэтому правильность действия схемы как при управлении, так и сигнализации следует оценить весьма высоко.

Практическая работа устройства также подтвердила стабильность его действия при значительных колебаниях напряжения питания постоянного и переменного тока. Несинхронного движения («сбоя») искателей не наблюдалось, что, учитывая высокую скорость этого движения, можно объяснить благоприятными условиями бесконтактного управления электромагнитом искателя.

В заключение необходимо отметить, что анализ случаев повреждений и нарушений в работе опытного образца быстродействующего устройства с учетом имевших место особенностей его обслуживания подтверждает значительные достоинства данного принципа, обеспечивающего практическую возможность построения телемеханического устройства, безотказного в действии и не требующего постоянного обслуживания и ухода.

[24.8.1954]

Работники научно-исследовательских учреждений и высших учебных заведений! Двигайте вперед советскую науку и технику! Смелее развешивайте критику недостатков в научной работе! Повышайте роль советской науки в развитии народного хозяйства и обеспечении технического прогресса нашей страны! Улучшайте подготовку специалистов!

(Из призывов ЦК КПСС к 1 мая 1955 года)

Некоторые возможности повышения устойчивости энергосистем со «слабыми» связями

Кандидат техн. наук В. М. ГОРНШТЕЙН

Москва

Развитие энергетики СССР сопровождается объединением отдельных энергосистем и энергоузлов. Последние связываются линиями электропередачи, основным назначением которых является маневрирование резервами мощности. Предел мощности, передаваемой по таким линиям, обычно невелик по сравнению с мощностью объединяемых энергосистем, поэтому их принято называть «слабыми» связями.

Наличие легко перегружающихся «слабых» связей приводит к серьезным затруднениям в параллельной работе энергосистем. Если пропускная способность связи менее 10...15% мощности наименьшей из соединяемых систем, параллельная работа практически невозможна, так как случайные колебания нагрузки любой из систем, а тем более аварии приводят к перегрузке связи и нарушению устойчивости. Обычные методы повышения устойчивости путем воздействия на возбуждение генераторов, расщепления фаз и т. п. при «слабых» связях не всегда эффективны, так как достигаемое этими методами увеличение пропускной способности передачи, как правило, невелико по сравнению с мощностью соединяемых систем.

В 1951 г. автором было предложено [Л. 1] регулирующее устройство, которое при изменении угла сдвига э. д. с. генератора, скорости и ускорения турбины действует на изменение количества пара (воды), подводимого к турбине. Чтобы регулирование было более быстрым, устройство воздействует непосредственно на золотник регулятора скорости турбины, минуя электродвигатель изменения числа оборотов. Конструктивное выполнение устройства особых трудностей не представляет и в настоящей статье не рассматривается.

В настоящей статье излагаются результаты исследования эффективности работы указанного устройства совместно с предложенным нами в 1954 г. автоматическим повторным включением с проверкой по углу. Исследование проводилось применительно лишь к турбогенераторам, так как исследование применительно к гидрогенераторам ввиду необходимости учета гидравлического удара чрезвычайно сложно и должно явиться темой специальной работы¹.

¹ Попытка анализа регулирования по углу, скорости и ускорению и в случае гидрогенератора сделана в статье Б. И. Доманского и Е. И. Юревича [Л. 5]. Следует заметить, что авторы статьи не ставили перед собой задачи достижения неограниченной устойчивости, которая в случае турбогенератора может быть решена. Судя по значительным отклонениям угла, получающимся при рассматриваемых ими относительно небольших возмущениях, эта задача применительно к гидрогенераторам не может быть решена только путем регулирования по углу и ускорению. Хорошие результаты, полученные при теоретическом анализе предложенного нами применения дополнительно к регулированию по углу автоматического повторного включения с проверкой по углу, позволяют надеяться достигнуть неограниченной устойчивости и в случае гидрогенераторов.

Уравнение движения электростанции (эквивалентного турбогенератора) выведено в приложении. Ему соответствует характеристическое уравнение

$$T_a T_0 T_c p^4 + [T_a(T_0 + T_c) + \beta T_0 T_c] p^3 + [T_a + \Omega K T_0 T_c + \beta(T_0 + T_c) + \varphi] p^2 + \left[\frac{1}{a} + \Omega K(T_0 + T_c) + \beta \right] p + \Omega(K + \lambda) = 0. \quad (1)$$

Подстановка в уравнение (1) $\lambda = 0$ даст уравнение движения электростанции при отсутствии регулирования по углу, а подстановка $\varphi = 0$ — уравнение при отсутствии воздействия по ускорению.

Введем следующие обозначения коэффициентов уравнения (1):

$$\left. \begin{aligned} T_a T_0 T_c &= a_0; \\ T_a(T_0 + T_c) + \beta T_0 T_c &= a_1; \\ T_a + \Omega K T_0 T_c + \beta(T_0 + T_c) + \varphi &= a_2; \\ \frac{1}{a} + \Omega K(T_0 + T_c) + \beta &= a_3; \\ \Omega(K + \lambda) &= a_4. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Применив критерий устойчивости Раута-Гурвица, запишем условия устойчивости системы в следующем виде:

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_2 > 0; \quad a_3 > 0; \quad a_4 > 0; \quad (3)$$

$$(a_1 a_2 - a_0 a_3) > 0; \quad (4)$$

$$(a_1 a_2 - a_0 a_3) a_3 - a_1^2 a_4 > 0. \quad (5)$$

При выводе уравнения (1) некоторые нелинейные функции, например $P = f(\delta)$ и $M_{ac} = f(s)$, пришлось заменить линейными. Если в качестве последних использовать касательные к исходным функциям в точках установившегося режима, то условия (3)...(5) дают возможность судить лишь о статической устойчивости исходной системы (об устойчивости «в малом»). Для суждения об устойчивости системы при реально возможных в эксплуатации конечных возмущениях (колебания нагрузки, короткие замыкания и т. п.) рассмотрим нелинейную зависимость мощности, передаваемой по линии, от угла: $P = P_m \sin \delta$. При выводе формулы (1) эта зависимость была заменена прямой $P = K\delta$.

Проведем через начало координат (рис. 1) прямые $P = K_1 \delta$ и $P = K_2 \delta$ так, чтобы кривая $P = P_m \sin \delta$ находилась между ними и не пересекала их нигде, кроме начала координат. Из рис. 1 графически можно определить, что $K_1 > 0,0175 P_m$, а $K_2 < -0,0038 P_m$. Эти значения K_1 и K_2 можно найти и аналитически. Как показал М. А. Айзерман [Л. 2], если при замене нелинейной функции любой прямой, лежащей между прямыми 2 и 3 (рис. 1), т. е. при подстановке в уравнение (1) любой величины $K_2 < K < K_1$ условия устойчи-

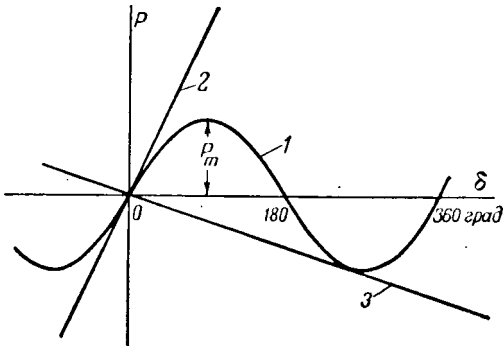


Рис. 1. Графическое нахождение условия неограниченной устойчивости при начальном угле $\delta_0 = 0$.
1 — $P = P_m \sin \delta$; 2 — $P = K_1 \delta = 0,0175 P_m \delta$; 3 — $P = K_2 \delta = -0,0038 P_m \delta$.

ности (3)...(5) выполняются, то реальная нелинейная система неограниченно устойчива, т. е. устойчивость сохраняется при любых начальных отклонениях от положения равновесия.

Построение, представленное на рис. 1, произведено для случая $\delta_0 = 0$. При других начальных углах необходимо произвести аналогичное построение, но начало координат должно быть перенесено в точку кривой $P = P_m \sin \delta$, соответствующую другому значению δ_0 . Такими построениями было установлено, что для обеспечения неограниченной устойчивости при начальных углах $-90^\circ < \delta < 90^\circ$, коэффициент K должен удовлетворять неравенству:

$$-0,0125 P_m < K < +0,0175 P_m. \quad (6)$$

Нелинейная зависимость асинхронного момента генератора от скольжения (рис. 2) также заменена в формуле (1) линейной зависимостью с угловым коэффициентом β . Построение, аналогичное описанному выше, дает значения $\beta_1 > 0$ и $\beta_2 \approx 0$. Можно показать, что если условия (3)...(5) выполняются при $\beta = 0$, то они тем более будут выполняться при $\beta > 0$. Поэтому рассматриваемая нами система будет неограниченно устойчива, если условия (3)...(5) удовлетворяются при подстановке в формулы (2) $\beta = 0$ и любой величины K согласно неравенству (6).

Обращаясь теперь к формулам (2), легко установить, что при $K < 0$ и $\lambda = 0$ коэффициент a_4 становится отрицательным, что нарушает условие устойчивости (3). Между тем из рис. 1 следует, что для обеспечения неограниченной устойчивости необходимо обеспечить устойчивость и при $K < 0$. Поэтому введение регулирования по углу с величиной $\lambda > 0$ обязательно при всех условиях.

При относительно жестких связях между станцией и системой, т. е. при большом пределе передаваемой по линии мощности P_m , абсолютная величина K также велика и при $K < 0$ коэффициенты a_2 и a_3 могут оказаться отрицательными.

Для сохранения положительным коэффициента a_3 необходимо увеличить $\frac{1}{\alpha}$, т. е. умень-

шить коэффициент неравномерности регулятора α против обычных 4...5%. Расчеты показывают, что увеличение $\frac{1}{\alpha}$ бывает необходимо при $P_m > 15\%$ мощности станции. Уменьшить величину α можно или путем реконструкции регулятора скорости, или путем дополнительного воздействия электрического регулятора скорости на золотник. Сохранение положительным коэффициента a_2 достигается введением регулирования по ускорению ($\psi > 0$).

Введение регулирования по углу и уменьшение α увеличивают коэффициенты a_3 и a_4 (особенно при $K > 0$) и этим затрудняют выполнение неравенств (4) и (5), так как в левую часть этих неравенств a_3 и a_4 входят со знаком минус. Однако путем выбора достаточно большой величины ψ и, следовательно, увеличением коэффициента a_2 , входящего в левую часть тех же неравенств со знаком плюс, можно при выполнении указанных выше мер добиться того, что коэффициенты a_2, a_3 и a_4 будут положительными, а неравенства (4) и (5) будут выполнены при любых условиях.

Таким образом, надлежащим выбором параметров регулирования по углу (λ), скорости (α) и ускорению (ψ) всегда можно обеспечить неограниченную устойчивость системы.

Исследование процесса регулирования турбины, снабженной регулятором угла, скорости и ускорения, производилось путем расчетов по методу последовательных интервалов. При этом учитывались: асинхронные моменты по кривым рис. 2, нелинейная зависимость нагрузки линии электропередачи от угла, изменение вращающего момента турбины и нагрузки потребителей при изменении скорости и т. п. Расчеты наряду с выяснением характера процесса регулирования дали возможность определить влияние нелинейных зависимостей, которые не могли быть учтены при математическом анализе условий устойчивости

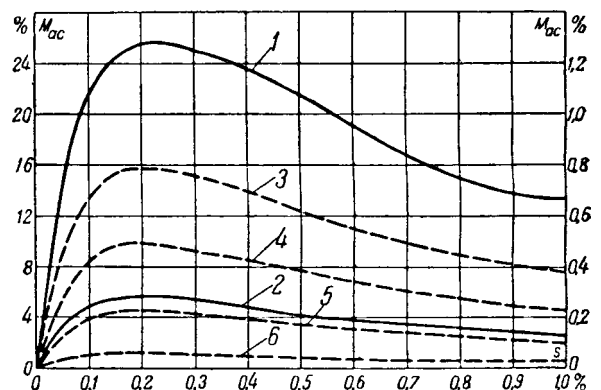


Рис. 2. Зависимость асинхронного момента генератора M_{ac} от скольжения при различных пределах передаваемой по линии электропередачи мощности (масштаб для кривых, изображенных сплошной линией, — слева, а для кривых, изображенных пунктиром, — справа).

$$1 - P_m = 1,0; 2 - P_m = 0,5; 3 - P_m = 0,2; 4 - P_m = 0,15; \\ 5 - P_m = 0,1; 6 - P_m = 0,05.$$

виду трудностей, связанных с наличием большого числа этих зависимостей. В частности, было учтено, что характеристика сервомотора линейна лишь в пределах от нуля до полного открытия, а характеристика золотника — в пределах его отклонений от -1 до $+1$.

Было исследовано несколько методов воздействия на золотник при изменении угла. Наилучшие результаты дала характеристика регулятора, являющаяся линейной при отклонении угла от заданного значения в пределах $\pm 90^\circ$. При большем отклонении угла воздействие постепенно уменьшается и при отклонении на $\pm 180^\circ$ становится равным нулю. Получение такой характеристики конструктивных трудностей не представляет.

В результате расчетов выявлено также, что при действии всех параметров регулирования (угла, скорости и ускорения) в одну и ту же сторону и при достаточно большом их отклонении сумма воздействий на золотник должна сдвигать его относительно нейтрального положения на величину, не меньшую двойного рабочего хода, т. е. двойной величины хода, требующегося для полного открытия окон. В противном случае процесс регулирования чрезмерно замедляется, так как обратная связь блокирует работу регулятора.

Далее расчеты показали, что для улучшения процесса регулирования постоянные регуляторов угла (λ), скорости (α) и ускорения (ψ) должны значительно отличаться от своих предельных величин, необходимых для удовлетворения условий устойчивости (3) ... (5). Наилучшие результаты дали значения: $\lambda \approx 0,04$; $\alpha = 0,5\%$ и $\psi = 125$.

На рис. 3 приведены результаты расчетов процесса регулирования для случая работы электростанции с полной нагрузкой ($P = 1,0$) на систему бесконечной мощности через линию электропередачи, имеющую $P_m = 0,2$. В исходном режиме линия работала с полной нагрузкой $P = 0,2$ и углом 90° . Местная нагрузка электростанции составляла $0,8$. Во всех расчетах э. д. с. за переходной реактивностью генератора E' принималась постоянной. Были проверены случаи внезапного сброса нагрузки местными потребителями до $0,4$ (сброс 40% нагрузки генератора) и до $0,2$ (сброс 60% нагрузки генератора) и трехфазного короткого замыкания длительностью $0,7$ сек.

Как видно из рис. 3, во втором и третьем случаях станция выходит из синхронизма, но после однократного поворота вектора угла на 360° вновь втягивается в синхронизм. Во всех случаях регулирование справляется с задачей поддержания устойчивости, и нестационарный процесс быстро затухает.

Проверялось также влияние нечувствительности, вызываемой наличием сухого трения и люфтов в отдельных элементах системы регулирования. Как и следовало ожидать, проверка показала, что при работе с углом, большим 90° , нечувствительность вызывает незатухающие колебания угла. Однако амплитуда этих колебаний при обычных для старых машин значениях нечувстви-

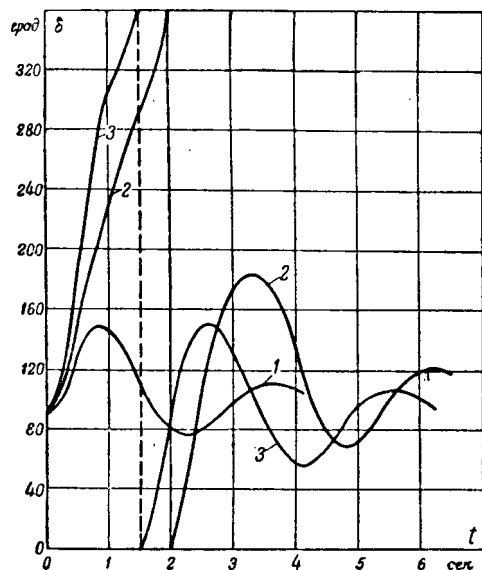


Рис. 3. Процесс регулирования по углу при сбросе нагрузки и коротком замыкании ($P_m = 0,2$).
1 — сброс 40% нагрузки генератора; 2 — сброс 60% нагрузки генератора; 3 — трехфазное короткое замыкание длительностью 0,7 сек.

тельности (порядка $0,5\%$) невелика. Новые машины Ленинградского металлического завода им. Сталина имеют незначительную зону нечувствительности (порядка $0,1\%$). Кроме того, при наличии нескольких машин, зоны нечувствительности которых не совпадают, по крайней мере часть из этих машин всегда принимает участие в регулировании, и общая зона нечувствительности уменьшается. Наконец, имеются способы [Л. 2] искусственного устранения нечувствительности. Таким образом, есть основания ожидать, что наличие зоны нечувствительности не вызовет особых трудностей.

Полученные выше благоприятные результаты имеют место лишь при относительно «слабых» связях.

При более жестких связях и малой местной нагрузке в случае расхождения векторов э. д. с. более чем на 180° меняется направление передачи мощности по линии; генератор не отдает мощность, а получает ее из системы. Связанное с этим ускорение генератора нельзя предотвратить закрытием регулирующих клапанов турбины, так как вращающий момент турбины не может быть отрицательным. В результате регулирование может не справиться с задачей поддержания устойчивости и возникнет длительный асинхронный режим (кривая 1, рис. 4). Процесс восстановления синхронизма может быть существенно ускорен, если применить автоматическое отключение межсистемной связи при угле около 180° и обратное автоматическое повторное включение ее при угле около 360° (0°).

Для примера нами был произведен расчет для случая трехфазного короткого замыкания длительностью $0,4$ сек. До короткого замыкания генератор работал на линию с $P_m = 1,0$ с полной нагрузкой ($P = 1,0$), $\delta_0 = 90^\circ$, местная нагрузка

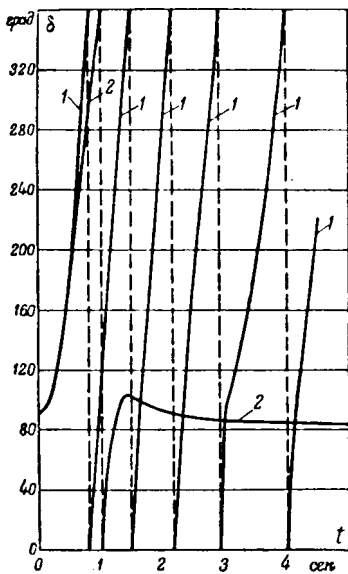


Рис. 4. Процесс регулирования при трехфазном коротком замыкании длительностью 0,4 сек ($P_m = 1,0$).

1 — регулирование по углу; 2 — регулирование по углу с применением автоматического отключения и повторного включения межсистемной связи.

отсутствовала. Результаты расчета приведены на рис. 4.

Как видно из сопоставления кривых 1 и 2 рис. 4, автоматическое повторное включение радикально улучшает положение, и нестационарный процесс заканчивается практически почти без перерегулирования уже через 1,5...2 сек после начала аварии.

Следует заметить, что при «слабых» связях применение автоматического повторного включения почти не дает эффекта, но в этих случаях регулирование по углу и ускорению справляется с задачей и без него. Наоборот, при еще более жестких связях ($P_m > 1,0$) применение автоматического повторного включения может обеспечить быстрое восстановление синхронизма (ресинхронизацию) без применения специальных регуляторов угла и ускорения.

Как указано в [Л. 1], регулирование мощности турбины по углу, скорости и ускорению можно использовать для поддержания частоты и потоков мощности по линиям. С этой целью на станцию, расположенную в районе с недостатком мощности, должно быть возложено регулирование угла между ее э. д. с. (напряжением) и э. д. с. какого-либо источника стабильной частоты, например стабилизированного кварцем лампового генератора. Станции, передающие в систему мощность по относительно «слабым» связям, во избежание перегрузки последних должны регулировать углы между их э. д. с. и э. д. с. станции, регулирующей частоту.

Всякое другое решение и, в частности, решение, предложенное в статье Б. И. Доманского и Е. И. Юревича [Л. 5] и сводящееся к регулированию каждой станцией угла между ее напряжением и напряжением источника стабильной частоты, неприемлемо, так как может привести к пере-

грузке линий, связывающих станции, и нарушению устойчивости в тех случаях, когда станции, расположенные в дефицитном районе, загружены полностью.

Таким образом, из сказанного следует, что регулирование по углу в комбинации с автоматическим повторным включением с проверкой по углу по крайней мере в случае турбогенераторов дает возможность полностью использовать пропускную способность линий, связывающих станции и работающих на пределе передаваемой мощности, и сохранить устойчивость при любых нарушениях нормального режима, включая трехфазное короткое замыкание любой длительности. Такое регулирование легче всего осуществимо и дает наибольший эффект именно при «слабых» связях между энергосистемами, когда обычные методы повышения устойчивости не всегда эффективны.

Малая эффективность предлагавшихся ранее устройств, воздействующих на регулирование турбин, объясняется, повидимому, тем, что при их разработке ставились обычно узкие задачи — только регулирование частоты и обменной мощности или только аварийное регулирование при коротких замыканиях. В результате вопрос не рассматривался полностью и параметры регулирования не соответствовали требованиям, вытекающим из задачи достижения неограниченной устойчивости.

Настоящая работа не претендует на законченность разработки всех вопросов. Необходима экспериментальная проверка полученных теоретических результатов.

Предлагая настоящую работу вниманию читателей, автор надеется, что она положит начало обмену мнениями между специалистами, работающими в этой области, и будет способствовать ускорению разработки поставленных в ней актуальных вопросов.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Вывод уравнения движения турбогенератора, работающего на шины бесконечной мощности через линию электропередачи при наличии регулирования по углу, скорости и ускорению. Уравнение движения турбины можно записать следующим образом:

$$\frac{T_a}{\Omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_{T0} - M_c - M_{ac}, \quad (1,1)$$

где T_a — постоянная инерции агрегата, сек;

δ — отклонение угла между э. д. с. станции и напряжением на шинах бесконечной мощности, град.;

$\Omega = 360f$ (f — частота, гц);

M_{T0} — вращающий момент турбины при номинальной скорости вращения;

M_c — синхронный момент, зависящий от угла между э. д. с. генератора и напряжением шин бесконечной мощности;

M_{ac} — суммарный асинхронный момент, зависящий от скорости вращения турбогенератора.

Если заменить нелинейные функции $M_c = f(\delta)$ и $M_{ac} = f\left(\frac{d\delta}{dt}\right)$ линейными $M_c = K\delta$ и $M_{ac} = \beta \frac{d\delta}{dt}$ (о способах такой замены см. в тексте), то уравнение (1,1) примет вид:

$$\frac{T_a}{\Omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_{T0} - K\delta - \frac{\beta}{\Omega} \frac{d\delta}{dt}. \quad (1,2)$$

Отклонение золотника системы регулирования турбины (в относительных единицах) при регулировании по скорости, углу и ускорению можно выразить формулой

$$\sigma = - \left(\frac{1}{\Omega \alpha} \frac{d\delta}{dt} + \lambda \delta + \frac{\varphi}{\Omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \xi \right), \quad (1,3)$$

где α — коэффициент неравномерности регулятора скорости;

λ — коэффициент, характеризующий воздействие регулятора угла (смещение золотника под действием регулятора угла при отклонении угла на 1°);

φ — коэффициент, характеризующий сдвиг золотника под действием регулятора ускорения (ход золотника на единицу ускорения);

ξ — открытие сервомотора в относительных единицах.

Уравнение парового объема турбины можно получить, предполагая паровые объемы за регулирующими клапанами сосредоточенными. Это хорошо согласуется с результатами многочисленных испытаний, проведенных различными организациями. Указанное уравнение будет иметь следующий вид:

$$T_0 \frac{d\rho}{dt} = \xi - \rho, \quad (1,4)$$

где ρ — давление за регулирующим клапаном в относительных единицах;

T_0 — постоянная времени парового объема. Открытие сервомотора определится формулой

$$T_c \frac{d\xi}{dt} = \sigma. \quad (1,5)$$

Если предположить, что при номинальной скорости давление и вращающий момент турбины (в относительных единицах) равны между собой ($\rho = M_{T0}$), то после несложных преобразований уравнение движения агрегата можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_a T_0 T_c \frac{d^4\delta}{dt^4} + [T_a(T_0 + T_c) + \beta T_0 T_c] \frac{d^3\delta}{dt^3} + \\ + [T_a + \Omega K T_0 T_c + \beta(T_0 + T_c) + \varphi] \frac{d^2\delta}{dt^2} + \\ + \left[\frac{1}{\alpha} + \Omega K(T_0 + T_c) + \beta \right] \frac{d\delta}{dt} + \Omega(K + \lambda)\delta = 0. \quad (1,6) \end{aligned}$$



Определение удельного сопротивления земли переменному току

Доктор техн. наук М. И. МИХАЙЛОВ, инж. Л. Д. РАЗУМОВ

Москва

Удельное сопротивление земли является параметром, знание которого необходимо при рассмотрении целого ряда вопросов геофизики, электротехники, геологоразведки и т. д. От удельного сопротивления земли в значительной степени зависит электромагнитное влияние одних электрических цепей на другие, например влияние линий электропередачи на цепи связи.

Удельное сопротивление земли зависит от многих факторов; диапазон его величин чрезвычайно широк не только для различных пород (от 10^{-3} до 10^9 ом·м и выше), но и для одной и той же породы. Например, удельное сопротивление известняков колеблется от 10 (пористые, пропитанные водой известняки) до $10^6 \dots 10^9$ ом·м (плотные сухие известняки). Поэтому не представляется возможным получить величину удельного сопротивления земли путем одних теорети-

Входящий в формулу (1,1) асинхронный момент, а следовательно, и асинхронная мощность генератора вычислялись по формулам, приведенным в [Л. 3 и 4]. При этом принималось, что генератор типа Т-25-2 с параметрами, приведенными в [Л. 3], работает на систему бесконечной мощности через длинную линию электропередачи. Расчеты производились при различных длинах линии электропередачи, характеризующихся различными значениями отношения предела передаваемой мощности к номинальной активной мощности турбогенератора P_m .

Местная нагрузка, питающаяся непосредственно от шин генератора, во всех случаях принималась такой, чтобы при полной нагрузке генератора линия загружалась на 80% от P_m .

Результаты расчетов зависимости среднего асинхронного момента от скольжения представлены на рис. 2. Фактически асинхронный момент зависит также от угла между э. д. с. генератора и напряжением системы. Однако влияние угла, особенно при «слабых» связях, относительно невелико.

Литература

1. В. М. Горнштейн. Устройство для поддержания статической и динамической устойчивости энергосистем. Авторское свидетельство № 95018 от 5 февраля 1953 г. Приоритет от 16 марта 1951 г.

2. М. А. Айзерман. Теория автоматического регулирования двигателей. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952.

3. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.

4. В. А. Веников и Л. А. Жуков. Влияние демпферного момента и демпферных обмоток на динамическую устойчивость электрических передач. Электричество, № 4, 1951.

5. Б. И. Доманский и Е. И. Юревич. О регулировании мощности и частоты крупных энергообъединений. Электричество, № 2, 1954.

[28.8.1954]

ческих расчетов. Достаточно точно ее можно определить лишь при помощи специальных измерений, проводимых на местности в естественных условиях.

В настоящее время разработано много различных методов измерения как на постоянном, так и на переменном токе.

Как известно, для расчета взаимной индуктивности заземленных на концах параллельных однопроводных линий наибольшее признание получили формулы Поллячека и Карсона. Однако результаты измерений показывают, что эти формулы полностью справедливы только при однородном строении земли. При сложной же структуре последней результаты измерений совпадали с результатами расчета по формулам Поллячека только в том случае, если удельное сопротивление земли считалось величиной переменной, завися-

щей в том или ином виде от частоты тока. Таким образом, при расчете взаимной индуктивности по указанным формулам необходимо учитывать кажущееся изменение удельного сопротивления в зависимости от частоты.

Мы назвали изменение удельного сопротивления земли кажущимся, так как в действительности оно от частоты практически не зависит вплоть до очень высоких частот. Кажущееся же его изменение в зависимости от частоты имеет место только при неоднородном (слоистом) строении земли. Это изменение происходит вследствие того, что токи различных частот, проникая в землю на различную глубину¹, протекают по слоям с различным удельным сопротивлением. В однородной земле удельное сопротивление от частоты практически не зависит.

Законы кажущегося изменения удельного сопротивления земли различны для различных ее геологических строений. В том случае, когда удельное сопротивление верхних слоев больше удельного сопротивления нижних, эквивалентное или, как его называют, кажущееся удельное сопротивление всей толщи земли выражается следующим образом [Л. 1]:

$$\rho_k = C_1 (f^n),$$

где f — частота влияющего тока;

C_1 — некоторая постоянная;

n — положительное число, могущее принимать различные значения, большие или меньшие единицы.

Если же удельное сопротивление верхних слоев земли меньше удельного сопротивления нижних, то кажущееся удельное сопротивление всей толщи земли имеет следующую зависимость от частоты:

$$\rho_k = C_2 \left(\frac{1}{f^n} \right).$$

Наиболее распространенный в настоящее время метод определения кажущегося удельного сопротивления земли основан на измерении взаимной индуктивности двух длинных параллельных однопроводных линий с заземленными концами и на последующем вычислении удельного сопротивления по формулам Поллячека-Карсона. Этот метод получил название метода «двух петель» и рекомендован в «Правилах защиты установок связи от вредного действия установок сильного тока».

Метод двух петель и аналогичный ему метод рамки [Л. 2], основанный на измерении взаимной индуктивности однопроводной линии и рамки, дают вполне удовлетворительные результаты. Измеренные в данной местности величины электромагнитного влияния всегда совпадают с подсчитанными по формуле Поллячека при подстановке в нее значений удельного сопротивления земли, определенных этими методами. Однако оба

указанных метода громоздки и неудобны, так как один из них требует наличия двух однопроводных линий длиной 2... 3 км, расположенных параллельно друг другу, а другой — одной линии. Кроме того, требуются генераторы, специальные приборы и т. п.

Теория Поллячека и Карсона была рассмотрена Джозефом и Радлеем [Л. 3] применительно к земле, состоящей из двух слоев: верхнего слоя толщиной h с удельным сопротивлением ρ_1 и нижнего слоя бесконечной толщины с удельным сопротивлением ρ_2 (рис. 1). Авторы указанной работы построили два семейства кривых (рис. 2): для $\rho_2 < \rho_1$ и для $\rho_2 > \rho_1$. Эти кривые дают зависимость кажущегося удельного сопротивления земли ρ_k , величина которого и должна быть подставлена в формулы Поллячека и Карсона при двухслойном строении земли, от глубины залегания h нижнего слоя, удельных сопротивлений ρ_1 и ρ_2 , частоты влияющего тока f . Зависимость имеет следующий вид:

$$\frac{\rho_1}{\rho_k} = F \left(h \sqrt{\frac{10f}{\rho_1}} \right),$$

где ρ_1 , ρ_2 и ρ_k — в ом·м; h — в м; f — в гц. Таким образом, можно без громоздких измерений расчетным путем определить кажущееся удельное сопротивление земли, имеющей двухслойную структуру, если известен геологический разрез местности.

Порядок определения кажущегося удельного сопротивления следующий: 1) по геологическому разрезу местности определяется толщина верхнего слоя земли, в зависимости от состава пород принимаются те или другие величины их удельных сопротивлений (ρ_1 и ρ_2); 2) вычисляется параметр p для данной частоты влияющего тока; 3) по кривым рис. 2 определяется отношение $\frac{\rho_1}{\rho_k}$, а затем определяется величина ρ_k .

Возможность практического пользования кривыми Радлея Джозефа была доказана М. И. Михайловым и В. М. Чесноковым еще в 1939 г. [Л. 1]. К сожалению, геологический разрез местности очень часто бывает неизвестен. А в тех случаях, когда он известен, нельзя с достоверностью определить удельное сопротивление пород верхнего и нижнего слоев, так как последнее, как уже говорилось выше, изменяется в широких пределах.

Чтобы не производить громоздких измерений, сотрудники Центрального научно-исследовательского института связи М. И. Михайлов, Д. И. Осипов, А. С. Хоров, Н. А. Виноградов и Н. П. Синицын в 1950 г. предложили упрощенный метод определения удельного сопротивления земли переменному току, основанный на использовании свойства переменного тока распространяться

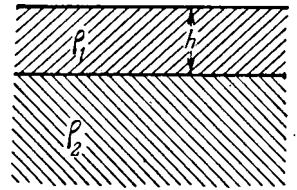


Рис. 1.

¹ Чем выше частота, тем меньше вследствие поверхностного эффекта глубина проникновения тока в землю.

в толще земли на ту или иную глубину в зависимости от частоты тока, а также на использовании свойства постоянного тока распространяться в толще земли на ту или иную глубину в зависимости от расстояния между питающими электродами установки «провод — земля». Авторы указанного метода, используя известный способ измерения удельного сопротивления земли — «метод четырех электродов» с применением постоянного тока и располагая токовые (питающие) электроды на расстояниях друг от друга, равных утроенной глубине проникновения постоянного тока в толщу земли, показали, что можно получить значения кажущегося удельного сопротивления земли в рассматриваемом районе для любой частоты переменного тока.

Однако этот метод при всей своей простоте является весьма приближенным. В случае сложного строения земли погрешность при определении значения ρ_k этим методом может достигать 50...100 и более процентов. При практических расчетах это приводит к ошибке в определении взаимной индуктивности, равной 15...30%. Чтобы получить более точные данные об удельном сопротивлении земли переменному току, мы рекомендуем определять ρ_k из кривых Радлея и Джозефа, а для определения величин h , ρ_1 и ρ_2 воспользоваться методом вертикального электрического зондирования, который применяется в геологической разведке и основан на измерении удельного сопротивления земли постоянным током [Л. 4 и 5].

Согласно этому методу при помощи симметричной четырехэлектродной установки (рис. 3) измеряется удельное сопротивление земли $\rho_{из.м}$ при различных расстояниях (от 10...15 до 1000...2000 м) между токовыми электродами. По данным измерений строится кривая зависимости $\rho_{из.м} = \psi(lg l)$, где l — половина расстояния между токовыми электродами. Эта кривая сравнивается с теоретически рассчитанными кривыми, так называемыми двухслойными палетками, которые дают зависимость измеренного удельного сопротивления земли от расстояния между токовыми электродами для различных соотношений между удельными сопротивлениями нижнего и верхнего слоев и различных толщин верхнего слоя.

Двухслойная палетка изображена на рис. 4, для удобства пользования ее обычно вычерчивают на кальке. Цифры, стоящие около кривых, означают отношения $\rho_1 : \rho_2$. Прямая OO_1 , перпендикулярная оси абсцисс, является указателем глубины верхнего слоя. По оси абсцисс, обозначенной буквами AB , отложены величины $lg l$, а по оси ординат — теоретически рассчитанные величины $\rho_{из.м}$. Масштаб логарифмической единицы по обеим осям одинаков и равен 3,12 см.

Палетку, нанесенную на кальку, накладывают сверху на кривую $lg \rho_{из.м} = \psi(lg l)$, построенную в том же масштабе, в котором построены кривые на палетке, и перемещают ее до тех пор, пока какая-либо палеточная кривая не

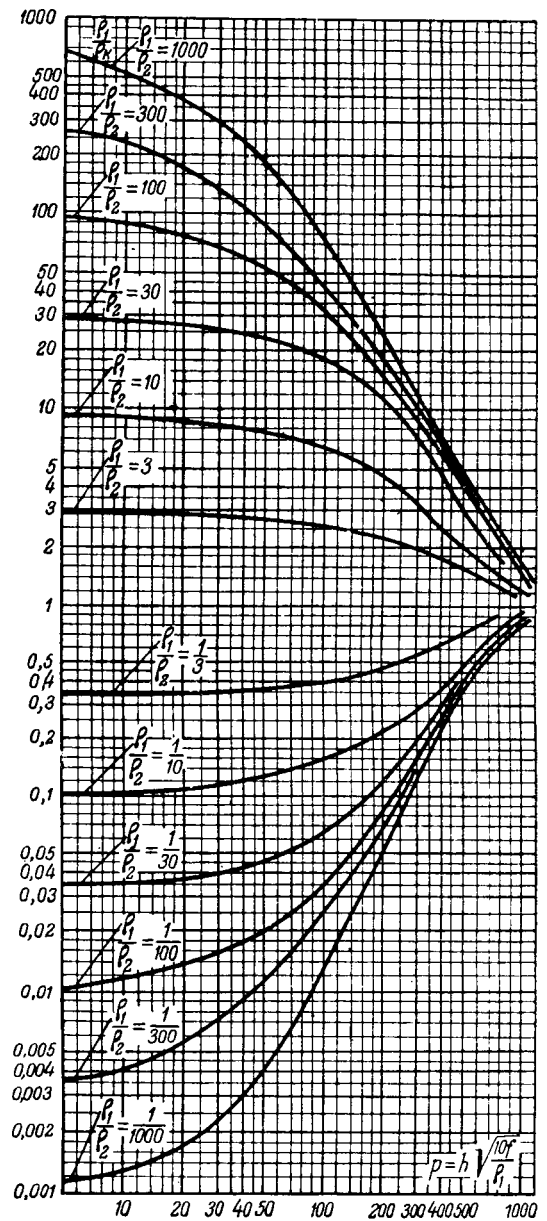


Рис. 2.

совпадает с измеренной в возможно большем числе точек. При этом необходимо следить, чтобы оси координат измеренной кривой и палетки оставались параллельными. Затем отсчитывают отрезок, отсекаемый на оси ординат измеренного графика осью абсцисс палетки. Этот отрезок дает значение удельного сопротивления верхнего слоя ρ_1 . Умножив ρ_1 на отно-

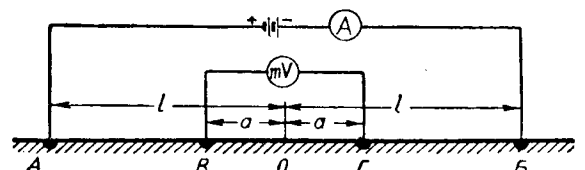


Рис. 3. Симметричная четырехэлектродная установка ($l = 3a$).
A и B — токовые электроды; B и Г — потенциальные электроды.

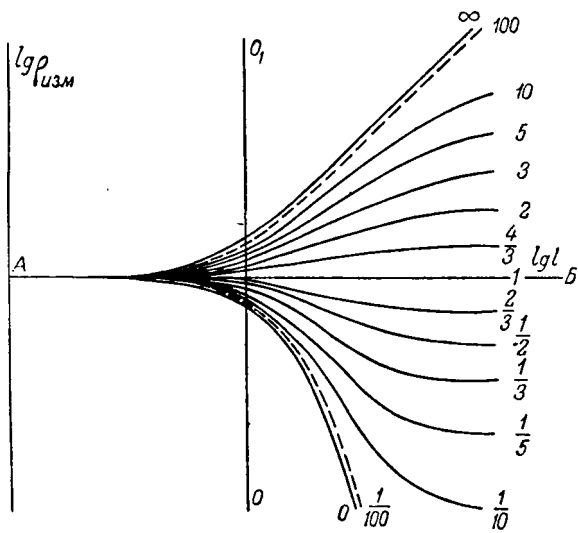


Рис. 4. Двухслойная палетка.

шение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, соответствующее совпавшей палеточной кривой, получим значение удельного сопротивления нижнего слоя. Отрезок, отсекаемый на оси абсцисс графика, полученного путем измерений, прямой OO_1 палетки дает значение глубины h верхнего слоя.

Если измеренная кривая не совпадет ни с одной из палеточных кривых, а окажется между двумя соседними палеточными кривыми, то величины h и ρ_1 определяются так же, как это было показано выше, а величина ρ_2 находится интерполированием между значениями ρ двух соседних палеточных кривых.

Измерения удельного сопротивления на постоянном токе могут производиться при помощи потенциометра, поэтому они значительно проще, чем указанные выше измерения по методу двух петель или рамки. Измерение на постоянном токе не требует однопроводной линии и громоздкого оборудования.

Вместо измерения на постоянном токе можно воспользоваться приборами, при помощи которых измерение производится на переменном токе низкой частоты (25...50 гц). К таким приборам относится выпускаемый промышленностью прибор МС-07. Для измерения этим прибором достаточно иметь к нему две катушки обычного провода с хлорвиниловой изоляцией и четыре заземляющих электрода, в качестве которых могут служить стальные стержни длиной не более 1 м и диаметром 15...20 мм. Четыре человека могут произвести измерение прибором МС-07 в течение не более 3 час. Определение величин ρ_1 , ρ_2 и h при наличии заранее заготовленной палетки также не представляет каких-либо трудностей.

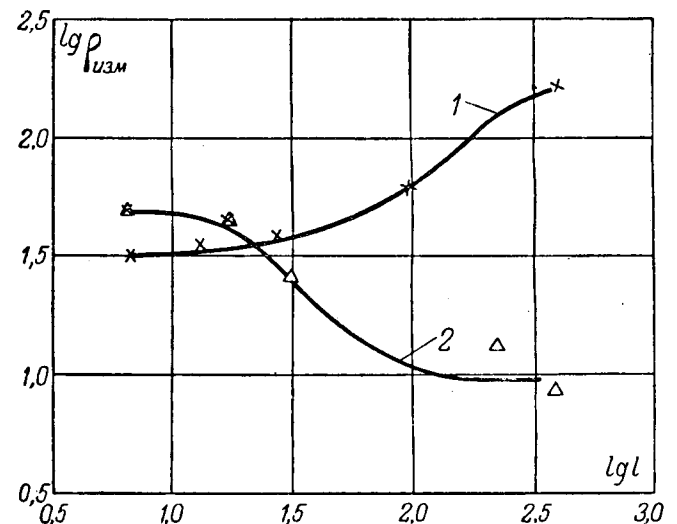
Как показали измерения, средние значения удельного сопротивления земли, измеренные прибором МС-07 и потенциометром, примерно одинаковы и в самом худшем случае отличаются друг от друга не более, чем на 10...15%. В некоторых случаях при малых

значениях измеряемого удельного сопротивления и больших расстояниях между питающими электродами чувствительность прибора МС-07 (0,02 ом) может оказаться недостаточной, тогда приходится измерять при помощи потенциометра.

С целью проверки возможности применения предлагаемого способа нами были проведены измерения удельного сопротивления земли методом двух петель и на постоянном токе в пункте 1 и обработаны результаты аналогичных измерений, проводившихся еще в 1950 г., в пункте 2. Геологическое строение сверху вниз в пункте 1 следующее: суглинок — 5 м, глина с прослойкой песка — 35 м, глубже залегают мощные пласты известняка, нижняя граница которых не установлена. Как видно, мы имеем резко выраженное двухслойное строение. Геологический разрез местности в пункте 2 неизвестен.

Удельное сопротивление глины изменяется [Л.4] в пределах от 1 до 50 ом·м (влажная глина) и от 12 до 8000 ом·м (сухая глина). Удельное сопротивление влажного известняка изменяется от 40 до 30000 ом·м.

Зависимость $\lg \rho_{изм} = \psi(\lg l)$ приведена на рис. 4. Измерения производились прибором МС-07. Как видно из рис. 4, удельное сопротивление, измеренное в пункте 1 при небольших расстояниях между токовыми электродами (20...30 м), составляет примерно 32...40 ом·м ($\lg \rho_{изм} = 1,5...1,6$), а при больших расстояниях (600...800 м) — 150...160 ом·м. Таким образом, результаты измерений удельного сопротивления полностью соответствуют геологическому строению земли: с увеличением расстояния между токовыми электродами токи проникают на большую глубину в слой известняка, имеющего большее удельное сопротивление, что обуславливает увеличение ρ , измеряемого с поверхности земли.

Рис. 5. Зависимость $\lg \rho_{изм}$ от $\lg l$.
1 — в пункте 1; 2 — в пункте 2.

Частота, гц	Пункт 1			Пункт 2		
	Удельное сопротивление ρ'_k , измеренное по методу двух петель, $\text{ом}\cdot\text{м}$	Удельное сопротивление ρ''_k , измеренное на постоянном токе, $\text{ом}\cdot\text{м}$	$\frac{\rho''_k - \rho'_k}{\rho'_k} 100\%$	Удельное сопротивление ρ'_k , измеренное по методу двух петель, $\text{ом}\cdot\text{м}$	Удельное сопротивление ρ''_k , измеренное на постоянном токе, $\text{ом}\cdot\text{м}$	$\frac{\rho''_k - \rho'_k}{\rho'_k} 100\%$
50	80	75,2	-6	—	11	—
300	—	—	—	12,9	12,5	-3,1
500	42,7	42,2	-1,2	15	15,2	+1,3
1 000	38,4	39	+1,5	18,9	18,5	-2,1
1 500	35,8	35,9	+0,29	21,7	20	-8,5
2 000	33,4	33,3	-0,3	—	21,8	—
3 000	29,4	31,6	+7,5	—	24	—

В пункте 2 имеет место обратная зависимость $\rho_{изм}$ от расстояния между токовыми электродами: с увеличением расстояния удельное сопротивление уменьшается. Это указывает на то, что верхний слой земли в пункте 2 имеет большее удельное сопротивление, чем нижний.

Пользуясь двухслойной палеткой, найдем, что для пункта 1 наиболее близко подходящей к измеренной кривой является палеточная кривая с $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 3$. По описанной выше методике получим, что $\rho_1 = 31,6 \text{ ом}\cdot\text{м}$, $\rho_2 = 95 \text{ ом}\cdot\text{м}$ и $h = 34,7 \text{ м}$. Как видно, определенная по палеточным кривым глубина верхнего слоя почти в точности совпадает с глубиной верхнего слоя согласно геологическому разрезу местности. Для пункта 2 аналогичным образом получим:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{5}; \quad \rho_1 = 50 \text{ ом}\cdot\text{м}; \quad \rho_2 = 10 \text{ ом}\cdot\text{м}, \quad h = 15 \text{ м}.$$

Пользуясь кривыми рис. 2, можно без труда рассчитать частотную зависимость кажущегося удельного сопротивления земли. Результаты измерений и расчета сведены в таблицу.

Измерения методом двух петель производились почти одновременно с измерением прибором МС-07. В пункте 2 измерения методом двух петель производились в диапазоне частот от 300 до 1 500 гц . Результаты измерений по обоим методам практически совпадают, отличаясь в диапазоне тональных частот самое большее на 8,5%. Если же удельное сопротивление определить методом, предложенным в 1950 г., то для пункта 1 получим следующие величины: для частоты 500 гц — 104 $\text{ом}\cdot\text{м}$, 1 000 гц — 69 $\text{ом}\cdot\text{м}$, 2 000 гц — 54 $\text{ом}\cdot\text{м}$ и 3 000 гц — 48 $\text{ом}\cdot\text{м}$. Как видно, ошибка в среднем составляет 60...80%, а для частоты 500 гц — почти 250%.

Как видно из таблицы, кажущееся удельное сопротивление земли в пункте 1, определенное по кривым Радлея и Джозефа, начиная примерно с 3 000 гц , достигает величины удельного сопротивления верхнего слоя и дальше не изменяется. Это означает, что при частоте тока

3 000 гц и выше основная часть тока вытесняется вследствие явления поверхностного эффекта в верхний слой земли. Естественно, что при более высоких частотах кажущееся удельное сопротивление будет оставаться равным ρ_1 . Таким образом расчет частотной зависимости по кривым Джозефа и Радлея следует производить только до частоты, при которой параметр p становится равным 1 000, при более высоких частотах $\rho_k = \rho_1$.

В пункте 2, наоборот, кажущееся удельное сопротивление с увеличением частоты очень медленно приближается к ρ_1 . Это объясняется тем, что геологическая структура в данном пункте отличается от геологической структуры в пункте 1. Так как нижний слой обладает меньшим удельным сопротивлением, то токи даже сравнительно высоких частот в значительной степени продолжают протекать по этому слою. Параметр p для пункта 2 становится равным 1 000 лишь при частоте около 22 000 гц .

Вывод. Предлагаемый способ уточнения определения кажущегося удельного сопротивления земли переменному току при двухслойной структуре дает результаты, практически совпадающие с результатами определения удельного сопротивления по методу двух петель.

Литература

1. М. И. Михайлов и В. М. Чесноков. Кажущаяся проводимость земли при слоистой структуре. Электросвязь, № 5, 1939.
2. П. А. Азбукин, В. У. Костиков, А. А. Пономарев. Определение удельной проводимости земли для подсчетов коэффициентов взаимной индукции между воздушными линиями. Труды Томского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта, вып. XVI, 1950.
3. Radley Joseph P. Взаимное сопротивление цепей с возвратом тока через землю с горизонтально слоистой структурой. ЛЕЕ, январь 1937, стр. 481.
4. Л. Я. Нестеров, Н. С. Бибиков и А. Ш. Усманов. Курс электроразведки, ГОНТИ, 1938.
5. А. И. Заборовский. Электроразведка. Госстехиздат, 1943.

[24. 12. 1954]



Электрические параметры искусственной успокоительной системы с замыкающими кольцами¹

Кандидат техн. наук Н. А. ПОЛЯК

ВГПИ „Теплоэлектропроект“

Стержни в полюсных наконечниках ротора совместно с замыкающими кольцами или сегментами образуют искусственную успокоительную систему синхронной машины. Помимо этой системы, синхронная машина имеет естественную успокоительную систему, образованную контурами токов в стальных листах полюсов ротора. Электрическими параметрами этих систем являются: реактивные сопротивления рассеяния и активные сопротивления

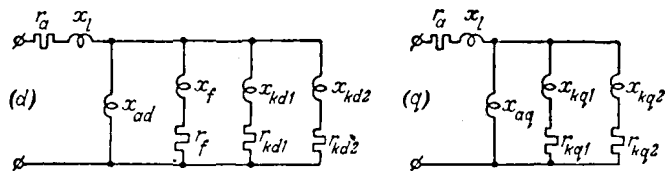


Рис. 1.

в поперечной и продольной электрических осях машины. Параметры естественной и искусственной успокоительной системы входят (рис. 1) в эквивалентные электрические схемы синхронной машины. Параметры естественной успокоительной системы обозначены нами в статье дополнительным индексом 1, а искусственной — дополнительным индексом 2. Результирующее реактивное сопротивление рассеяния обеих успокоительных систем по продольной оси x_{kd} и по поперечной оси x_{kq} определяется параллельным сложением сопротивлений рассеяния естественной и искусственной систем:

$$x_{kd} = \frac{x_{kd1} x_{kd2}}{x_{kd1} + x_{kd2}} = \frac{x_{kd2}}{1 + \frac{x_{kd2}}{x_{kd1}}}; \quad (1)$$

$$x_{kq} = \frac{x_{kq1} x_{kq2}}{x_{kq1} + x_{kq2}} = \frac{x_{kq2}}{1 + \frac{x_{kq2}}{x_{kq1}}}. \quad (2)$$

При искусственной успокоительной системе с замыкающими кольцами реактивные сопротивления рассеяния x_{kd2} и x_{kq2} малы по сравнению с x_{kd1} и x_{kq1} . Поэтому результирующие реактивные сопротивления рассеяния x_{kd} и x_{kq} обеих систем практически равны x_{kd2} и x_{kq2} . В отсутствии междуполюсных переемычек, т. е. при искусственной успокоительной системе не с замыкающими кольцами, а с замыкающими сегментами в пределах каждого отдельного полюса, имеют место несколько иные условия. Такие системы здесь не рассматриваются.

Для подсчета параметров успокоительной системы с замыкающими кольцами применяют следующие полуэмпирические формулы [Л. 1, 2]:

$$r_{kd} = \frac{35\,500}{f} \cdot \frac{F_{an}}{2 \cdot \Phi} \left[\frac{c_1 l_1}{q_1 n_D} + \frac{0,2 \cdot D c_2}{p \cdot q_2} \right]; \quad (3)$$

$$r_{kq} = \frac{26\,600}{f} \cdot \frac{F_{an}}{2 \cdot \Phi} \left[\frac{c_1 l_1}{q_1 n_D} + \frac{0,4 \cdot D c_2}{p q_2} \right]; \quad (4)$$

$$x_{kd} = 5,1 \frac{F_{an}}{2 \cdot \Phi} \left[\frac{1}{n_D} \left(1,7 + 2,8 \frac{h_{s2}}{b_{s2}} \right) l + \frac{D}{4 \cdot p} \right]; \quad (5)$$

$$x_{kq} = 0,75 \cdot x_{kd}. \quad (6)$$

Эти формулы применяют при симметричном расположении стержней относительно середины полюса и при практически равных расстояниях между стержнями.

Расстояние между крайними стержнями полюса влияет на размеры доли общего магнитного потока, сцепленного с контуром, образованным стержнями (рис. 2, а и б). Чем больше расстояние между крайними стержнями, тем большая часть продольного магнитного потока сцеплена с контуром, образованным стержнями, и тем меньше реактивное сопротивление рассеяния этого контура по продольной оси. Обратное соотношение, при замыкающих кольцах, имеет место по поперечной оси.

Для того чтобы выяснить зависимость параметров успокоительной системы от расстояния между стержнями и для уточнения зависимости параметров от числа стержней на полюс, были рассмотрены электромагнитные соотношения и связи успокоительной системы с магнитным потоком в воздушном зазоре и с основными параметрами синхронной машины. После подробного аналитического исследования мы получили расчетные формулы (7) и (8), аналогичные по форме их записи формулам (3), (4) и (5):

$$r_k = \frac{4\,400}{f} \cdot \frac{F_{an}}{2 \cdot \Phi_1} \cdot \frac{1}{c_k} \left[\frac{c_1 l_1}{q_1} + \frac{c_2 \tau}{q_2} \cdot S_k \right]; \quad (7)$$

$$x_k = \frac{F_{an}}{2 \cdot \Phi_1} \cdot \frac{1}{c_k} \left[\left(1 + 1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}} \right) l + 0,3 \cdot \tau S_k \right]. \quad (8)$$

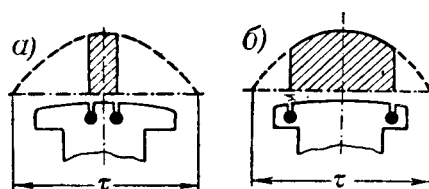


Рис. 2.

¹ По материалам доклада, прочитанного 22 апреля 1952 г. на совместном заседании секций электрических машин НТО Московского энергетического института (МЭИ) им. Молотова и МОНИТОЭ.

Формулы (7) и (8) применимы к обеим электрическим осям машины, но коэффициенты c_{kd} и c_{kq} , а также S_{kd} и S_{kq} (табл. 1 и рис. 3) соответственно различны.

Таблица 1

Число стержней на полюс n_D	Расстояние между крайними стержнями одного полюса	Продольная ось		Поперечная ось при замыкающих кольцах	
		Электрические градусы $\Delta\beta$	c_{kd}	S_{kd}	c_{kq}
2	80	0,260	0,450	0,375	0,555
	90	0,315	0,505	0,320	0,500
	100	0,370	0,560	0,265	0,445
	112	0,435	0,625	0,200	0,380
3	80	0,260	0,450	0,695	0,920
	90	0,315	0,505	0,640	0,845
	100	0,370	0,560	0,585	0,770
	112	0,435	0,625	0,520	0,680
5	80	0,340	0,580	1,250	1,640
	90	0,415	0,655	1,175	1,540
	100	0,490	0,730	1,100	1,440
	112	0,580	0,820	1,010	1,320
7	80	0,435	0,735	1,800	2,330
	90	0,530	0,830	1,705	2,195
	100	0,625	0,925	1,610	2,060
	112	0,740	1,040	1,500	1,900

При выводе формул (7) и (8) имелось в виду следующее: 1) синусоидальное распределение магнитной индукции в зазоре между ротором и статором, т. е. только первая гармоническая распределения магнитной индукции; 2) синусоидальное изменение этого магнитного потока во времени; 3) номинальная частота изменения потока — частота, соответствующая числу пар полюсов ротора и номинальной скорости вращения рассматриваемой машины; 4) отсутствие токов вне стержней и замыкающих колец; 5) поток рассеяния вокруг стержня, а следовательно, и его реактивное сопротивление не зависят от основного потока полюса; 6) высшие гармонические магнитного потока в зазоре и н. с. обмотки статора и успокоительной системы не влияют на искомые параметры; 7) стержни — круглые, заложены в круглые пазы с прорезью к поверхности полюса; 8) активные и реактивные сопротивления замыкающих колец не видоизменяют распределения токов по стержням полюса.

Коэффициенты c_k и S_k в формулах (7) и (8) зависят (табл. 1 и рис. 3) от расстояния между крайними стержнями одного полюса, от числа стержней на полюс и от рассматриваемой электрической оси машины. Активное сопротивление r_k является сопротивлением постоянному току при условной температуре 75°С. Величины r_k и x_k , как обычно, в относительных единицах. Обозначения основных величин даны в конце статьи.

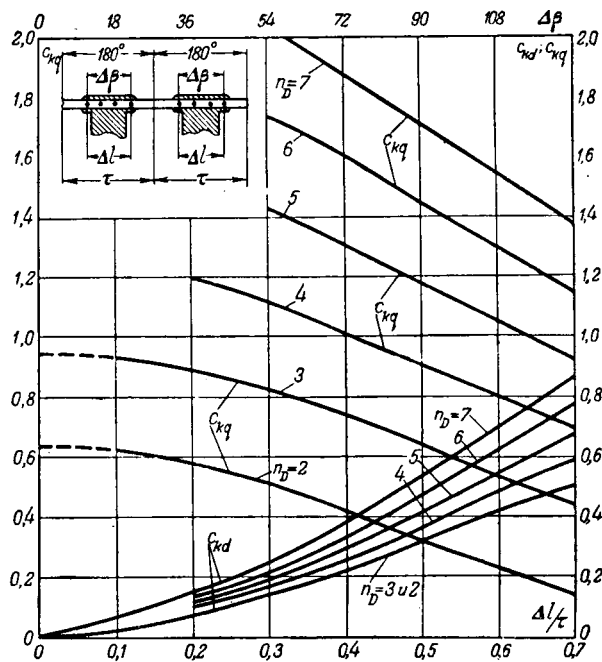


Рис. 3.

Для сопоставления величин r_k и x_k в различных условиях выполнения успокоительной системы можно в первом приближении принять коэффициент S_k равным нулю. Тогда величины r_k и x_k обратно пропорциональны коэффициенту c_k . Иначе говоря, активная и реактивная проводимости рассеяния успокоительной системы при прочих равных условиях пропорциональны соответственно c_{kd} по оси d и c_{kq} по оси q .

Соотношение между коэффициентами c_{kd} и c_{kq} зависит и от числа стержней на полюс и от расстояния между крайними стержнями одного полюса. Например (рис. 4, а), при трех стержнях на полюс и $\Delta l/\tau = 0,3$ коэффициенты c_{kd} и c_{kq} соответственно равны 0,15 и 0,82, а отношение их близко к 0,18; при пяти стержнях на полюс (рис. 4, б) и $\Delta l/\tau = 0,5$ коэффициенты c_{kd} и c_{kq} соответственно равны 0,42 и 1,18, а отношение их составляет около 0,35 — почти в 2 раза больше, чем в первом случае.

При значительном числе стержней на полюс, например при шести стержнях, успокоительную систему можно условно рассматривать состоящей из нескольких, например двух или трех, независимых контуров по продольной и поперечной осям машины. Параметры r_k , x_k каждого такого контура можно определить по формулам (7) и (8), табл. 1 и диаграмме рис. 3.

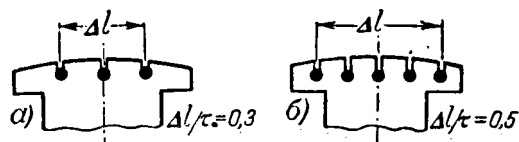


Рис. 4.

Сложением проводимостей рассеяния отдельных контуров, пропорциональных c_{kd} и c_{kq} , получают результирующие проводимости рассеяния всей успокоительной системы в каждой электрической оси. По этим проводимостям могут быть подсчитаны результирующие реактивные сопротивления всей успокоительной системы. При таком подсчете предполагается, что активные сопротивления не влияют на распределение токов по контурам системы. Результирующее активное сопротивление всей успокоительной системы определится из условия равенства потерь активной мощности во всей системе сумме потерь активной мощности в отдельно взятых контурах.

Такой метод подсчета может оказаться целесообразным в том случае, когда реактивные сопротивления рассеяния отдельных стержней различны, например, вследствие неодинаковой высоты или ширины прорези между пазом стержня и поверхностью полюсного наконечника или в том случае, когда стержни различных контуров выполнены из различного материала (медь, латунь или др.). Тот же метод применим при рассмотрении успокоительных систем с неравными расстояниями между стержнями.

Для иллюстрации изложенного приводим два примера.

Примеры 1. Шесть стержней на полюс с расстоянием $0,11\tau$ между соседними стержнями (рис. 5, а). Во всех пазах отношение высоты к ширине прорези $h_{s2}: b_{s2} = 1$. От-

считав по диаграмме рис. 3 коэффициенты c_{kd} и c_{kq} , определяют (табл. 2, строка 1) кратности величин x_{kd} и x_{kq} и их отношение.

Предположим теперь, что отношение высоты к ширине прорези пазов стержней 1 и 6 увеличено до 3,5, а у пазов 2, 3, 4 и 5 оно равно единице. Расстояния между стержнями остались те же. Требуется выяснить, как изменятся величины x_{kd} и x_{kq} .

По тому же рис. 3 отсчитывают коэффициенты отдельно для крайних (1, 6) и отдельно для средних (2, 3, 4 и 5) стержней, записывают в табл. 2 (строки 2 и 3) и

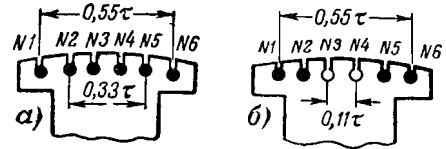


Рис. 5.

затем суммируют итоговые величины (табл. 2, строка 4). Для упрощения подсчетов не принималось во внимание сопротивление замыкающих колец и поэтому коэффициенты S_{kd} и S_{kq} полагались равными нулю.

Из сопоставления строк 1 и 4, табл. 2 следует, что при выполнении крайних стержней (1 и 6) с увеличенным отношением высоты прорези паза к ее ширине не только увеличиваются величины x_{kd} и x_{kq} , но меняется и отношение этих величин; вместо первоначального значения 0,43 получают 0,29. Это вызвано тем, что крайние стержни особо существенны для параметров по продольной электрической оси и имеют малое значение для поперечной.

2. Из шести стержней на полюс (рис. 5, б) два стержня (3 и 4) вынуты из пазов. Пазаы всех шести стержней имеют одинаковые прорези. Необходимо выяснить, как изменятся x_{kd} и x_{kq} в этом случае.

По диаграмме рис. 3 отсчитывают соответствующие коэффициенты (табл. 3, строки 1 и 2), производят под-

Таблица 2

Порядковый номер стержня	Номер стержня	n_D	$\Delta l/\tau$	c_{kd}	c_{kq}	$1+1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}$	$\frac{c_{kd}}{1+1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}}$	$\frac{c_{kq}}{1+1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}}$	$x_{kd} \equiv$	$x_{kq} \equiv$	$\frac{x_{kq}}{x_{kd}}$
1	1-6	6	0,55	0,57	1,36	2,6	0,220	0,520	$\frac{1,0}{0,22} = 4,5$	$\frac{1,0}{0,52} = 1,92$	0,43
2	1, 6	2	0,55	0,37	0,28	6,6	0,056	0,043	—	—	—
3	2, 3, 4, 5	4	0,33	0,20	1,08	2,6	0,077	0,415	—	—	—
4	1-6	6	—	—	—	—	0,133	0,458	$\frac{1,0}{0,133} = 7,5$	$\frac{1,0}{0,458} = 2,2$	0,29

Таблица 3

Порядковый номер стержня	Номер стержня	n_D	$\Delta l/\tau$	c_{kd}	c_{kq}	$1+1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}$	$\frac{c_{kd}}{1+1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}}$	$\frac{c_{kq}}{1+1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}}}$	$x_{kd} \equiv$	$x_{kq} \equiv$	$\frac{x_{kq}}{x_{kd}}$
1	1-6	6	0,55	0,57	1,36	2,6	0,22	0,52	$\frac{1,0}{0,22} = 4,5$	$\frac{1,0}{0,52} = 1,92$	0,43
2	3, 4	2	0,11	0,03	0,62	2,6	0,01	0,24	—	—	—
3	1, 2, 5, 6	4	—	0,54	0,74	2,6	0,21	0,28	$\frac{1,0}{0,21} = 4,8$	$\frac{1,0}{0,28} = 3,6$	0,75

счета и определяют разность итоговых величин (табл. 3, строка 3).

Исключение стержней 3 и 4 не только увеличивает реактивные сопротивления рассеяния x_{kd} и x_{kq} , но и изменяет отношение между ними.

Помимо формулы (7) и (8), возможны и другие формы записи предлагаемых формул, например:

$$r_k = \frac{1,555}{f} \cdot \frac{A_1}{B_\delta} f \omega \left[\frac{k_\lambda k_\phi}{\alpha} \right] \times \frac{1}{c_k} \left\{ \frac{c_1}{q_1} \left(\frac{l_1}{l} \right) + \frac{c_2}{q_2} \left(\frac{\tau}{l} \right) S_k \right\}, \quad (9)$$

$$x_k = \frac{100}{283} \cdot \frac{A_1}{B_\delta} f \omega \left[\frac{k_\lambda k_\phi}{\alpha} \right] \frac{1}{c_k} \times \left\{ \left(1 + 1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}} \right) + 0,3 \left(\frac{\tau}{l} \right) S_k \right\}. \quad (10)$$

В таком виде в формулы входят: линейная нагрузка статора A_1 , средняя магнитная индукция в воздушном зазоре под полюсом B_δ и другие величины, характеризующие машину в электромагнитном отношении. Во многих случаях такая запись формул более целесообразна. В предварительных подсчетах при коэффициенте α в пределах от 0,6 до 0,8 можно приближенно принимать:

$$\frac{k_\lambda \cdot k_\phi}{\alpha} = \frac{2,25}{1 + \alpha}. \quad (11)$$

Возможна еще одна форма записи, удобная при учебном изложении вопроса:

$$r_k = \frac{1}{2800} \cdot \frac{I_{gn}}{U_a} \left(\frac{\omega f \omega}{p} \right)^2 p \frac{1}{c_k} \times \left\{ \frac{c_1 l_1}{q_1} + \frac{c_2 \tau}{q_2} \cdot S_k \right\}; \quad (12)$$

$$x_k = \frac{f}{12300000} \cdot \frac{I_{gn}}{U_a} \left(\frac{\omega \cdot f \omega}{p} \right)^2 p \frac{1}{c_k} \times \left\{ \left(1 + 1,6 \frac{h_{s2}}{b_{s2}} \right) l + 0,3 \tau S_k \right\}. \quad (13)$$

В Московском энергетическом институте были экспериментально определены реактивные сопротивления синхронного генератора малой мощности: $x_d = 0,510$, $x_q = 0,340$, $x'_d = 0,170$, $x''_d = 0,075$ и $x''_q = 0,067$; реактивное сопротивление рассеяния обмотки статора равнялось 0,030. По этим данным нами подсчитаны реактивные сопротивления рассеяния успокоительных систем по обеим электрическим осям: $x_{kd} = 0,0665$ и $x_{kq} = 0,0420$; их отношение 0,63.

Каждый полюс ротора этого генератора имеет шесть стержней, равномерно распределенных на протяжении 116 электрических градусов; стержни всех полюсов замкнуты кольцами по всей окружности ротора. Такому выполнению успокоительной системы соответствуют (рис. 3) коэффициенты $c_{kd} = 0,70$ и $c_{kq} = 1,22$. В первом приближении, если не при-

нимать во внимание реактивные сопротивления участков замыкающих колец, отношение $\frac{c_{kd}}{c_{kq}} = \frac{x_{kq}}{x_{kd}}$. Таким образом, у рассматриваемого генератора отношение $\frac{x_{kq}}{x_{kd}}$ должно быть $\frac{0,7}{1,22} = 0,575$. Экспериментальное значение близко к этому отношению. Если принять во внимание реактивные сопротивления участков замыкающих колец, отношение $\frac{x_{kq}}{x_{kd}}$ будет еще ближе к значению 0,63. Оба значения (0,575 и 0,630) отличаются от коэффициента 0,75 в формуле (6).

Когда из шести стержней на полюс этого генератора были вынуты четыре средних и оставлены только два крайних, реактивное сопротивление рассеяния успокоительной системы по продольной оси увеличилось не в 3 раза [см. формулу (5)], а лишь в полтора². Это изменение хорошо согласуется с данными рис. 3. Реактивное сопротивление рассеяния по поперечной оси увеличилось также не в 3 раза [см. формулы (5) и (6)], а значительно больше.

Заключение. В результате аналитического исследования выяснилось, что применяемые в настоящее время формулы для подсчета электрических параметров успокоительной системы с замыкающими кольцами требуют поправки при числе стержней и их расположении в полюсном наконечнике, отличающихся от типовых.

Разработаны и предлагаются новые формулы, позволяющие учитывать действительное расположение стержней по ширине полюсного наконечника.

Обозначения:

- A_1 — линейная нагрузка статора, а/см;
- $F_{ан}$ — намагничивающая сила обмотки статора на пару полюсов по прямоугольной волне при номинальном токе в обмотке;

$$F_{ан} = \frac{3}{2} \sqrt{2} \cdot I_{gn} \cdot \frac{\omega}{p} \cdot f \omega;$$

- α — отношение ширины полюсного наконечника к ширине полюсного деления;
- $\Delta\beta$ — расстояние между крайними стержнями одного полюса в электрических градусах;
- B_δ — средняя магнитная индукция в воздушном зазоре под полюсным наконечником на холостом ходу машины с номинальным напряжением на выводах, гс;
- b_{s2} — ширина прорези между круглым пазом стержня и поверхностью полюсного наконечника, мм;
- c_1 — отношение удельного электрического сопротивления материала стержня к удельному электрическому сопротивлению меди (для меди $c_1 = 1$);
- c_2 — отношение удельного электрического сопротивления материала замыкающих колец к удельному электрическому сопротивлению меди (для меди $c_2 = 1$);

²Автор выражает благодарность канд. техн. наук А. В. Иванову-Смоленскому (МЭИ) за сообщение некоторых данных по экспериментам, проведенным в МЭИ.

К расчету трехфазных цепей с произвольным числом коротких замыканий и разрывов фаз

Инж. В. Н. БОРКОВСКАЯ и доктор техн. наук, проф. Г. Е. ПУХОВ

Таганрогский радиотехнический институт

Расчеты трехфазных цепей при наличии одновременных коротких замыканий и разрывов фаз за последние годы приобрели весьма важное значение. Такие расчеты производятся при проектировании сетей электрических систем, релейной защиты, электроавтоматики.

Теория трехфазных цепей со сложной несимметрией разработана в работах Н. Н. Щедрина, Н. А. Мельникова, Р. А. Воронова и др. [Л. 1... 8]. Существующие методы расчета позволяют в настоящее время определять токи и напряжения в сколько угодно сложной несимметричной цепи с симметричными вращающимися машинами.

Таким образом, задача о расчете цепи с произвольным числом коротких замыканий и разрывов принципиально решена. Мы полагаем, однако, что в решение ее могут быть внесены некоторые упрощения, так как при n точках несимметрии применяемые методы в большинстве своем предполагают составление и решение $6n$ уравнений. Ниже показывается, что если обратить должное внимание на способ составления расчетных уравнений, то число их можно сократить до n путем выполнения только действий сложения.

Расчетные уравнения. Анализируя зависимости между токами и напряжениями отдельных последовательностей (табл. 1) при рассматриваемых несимметриях (коротких замыканиях и разрывах), нетрудно заметить, что каждый вид несимметрии характеризуется одной группой суммирующихся величин и одной

общей величиной. Под суммирующимися условимся понимать токи и напряжения отдельных последовательностей, которые в точке несимметрии суммируются, а под общими — токи и напряжения, которые для всех трех последовательностей одинаковы. Из таблицы видно также, что результат сложения суммирующихся величин или равен нулю, или выражается через общую величину.

При решении задачи методом симметричных составляющих составляются уравнения для схем замещения отдельных последовательностей. Эти схемы замещения, очевидно, можно рассматривать как $2n$ -полосники, если через n обозначить число точек несимметрии. В целях упрощения расчетов предлагается уравнения схем замещения последовательностей составлять так, чтобы суммирующиеся величины выражались через общие. Суммирующиеся токи и напряжения условимся обозначать через $\rho_{ci}^{(\mu)}$, а общие — через $\rho_{oi}^{(\mu)}$, где μ — номер последовательности ($\mu = 0, 1, 2$); i — порядковый номер точки несимметрии.

Например, если в цепи имеется две точки несимметрии: 1) однополюсное короткое замыкание в фазе A и 2) разрыв в фазе B , то, пользуясь табл. 1 (п. п. 4 и 2), можем записать суммирующиеся величины:

$$\rho_{c1}^{(0)} = \dot{U}_1^{(0)}, \rho_{c1}^{(1)} = \dot{U}_1^{(1)}, \rho_{c1}^{(2)} = \dot{U}_1^{(2)}; \quad (1)$$

$$\rho_{c2}^{(0)} = \dot{I}_2^{(0)}, \rho_{c2}^{(1)} = a^2 \dot{I}_2^{(1)}, \rho_{c2}^{(2)} = a \dot{I}_2^{(2)}; \quad (2)$$

c_{kd}, c_{kq} — коэффициенты, характеризующие успокоительную систему по продольной и поперечной осям;

D — диаметр расточки статора, см;

f — частота, гц;

f_w — обмоточный коэффициент обмотки статора;

h_{s2} — высота щели над круглым пазом стержня, мм;

$I_{\Phi n}$ — действующее значение номинального фазного тока статора, а;

k_{Φ} — отношение полного потока в статоре на один полюс Φ к первой гармонической этого потока Φ_1 ;

k_{λ} — отношение магнитного потока, вступающего в полюсный наконечник, к полному потоку в статоре на полюс;

l — длина пакетов активной стали ротора и вентиляционных каналов, см;

l_1 — длина стержня, см;

Δl — расстояние между крайними стержнями одного полюса, см;

n_D — число стержней на полюс;

p — число пар полюсов ротора синхронной машины;

q_1 — поперечное сечение стержня, мм²;

q_2 — поперечное сечение замыкающего кольца, мм²;

r_{kd}, r_{kq} — активное сопротивление постоянному току успокоительной системы в продольной и поперечной осях при условной температуре 75°C, в долях единицы;

S_{kd}, S_{kq} — вторые коэффициенты, характеризующие успокоительную систему в продольной и поперечной осях;

τ — ширина полюсного деления, см;

U_n — номинальное линейное напряжение на выводах статора машины, в;

Φ — полный магнитный поток в статоре на один полюс при номинальном напряжении на выводах разомкнутой цепи статора и номинальной скорости вращения, мкс;

Φ_1 — первая гармоническая полного потока, мкс;

ω — число последовательно включенных витков фазы обмотки статора при сопряжении фаз звездой;

x_{kd}, x_{kq} — реактивные сопротивления рассеяния успокоительной системы в долях единицы по продольной и поперечной осям.

Литература

- В. И. Сысоев. Расчет синхронных машин. Ленинград, 1940.
- И. М. Постников. Проектирование электрических машин. Государственное издательство технической литературы УССР, Киев, 1952.



Таблица 1

№ п/п.	Виды несимметрии	Граничные условия	
		Суммирующиеся величины	Общие величины
1	Разрыв фазы <i>A</i> или замыкание на землю фаз <i>B</i> и <i>C</i>	$i^{(0)} + i^{(1)} + i^{(2)} = 0$	$\dot{U}^{(0)} = \dot{U}^{(1)} = \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}_A}{3}$
2	Разрыв фазы <i>B</i> или замыкание на землю фаз <i>C</i> и <i>A</i>	$i^{(0)} + a^2 i^{(1)} + a i^{(2)} = 0$	$\dot{U}^{(0)} = a^2 \dot{U}^{(1)} = a \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}_B}{3}$
3	Разрыв фазы <i>C</i> или замыкание на землю фаз <i>A</i> и <i>B</i>	$i^{(0)} + a i^{(1)} + a^2 i^{(2)} = 0$	$\dot{U}^{(0)} = a \dot{U}^{(1)} = a^2 \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}_C}{3}$
4	Разрыв фаз <i>B</i> и <i>C</i> или замыкание на землю фазы <i>A</i>	$\dot{U}^{(0)} + \dot{U}^{(1)} + \dot{U}^{(2)} = 0$	$i^{(0)} = i^{(1)} = i^{(2)} = \frac{i_A}{3}$
5	Разрыв фаз <i>C</i> и <i>A</i> или замыкание на землю фазы <i>B</i>	$\dot{U}^{(0)} + a^2 \dot{U}^{(1)} + a \dot{U}^{(2)} = 0$	$i^{(0)} = a^2 i^{(1)} = a i^{(2)} = \frac{i_B}{3}$
6	Разрыв фаз <i>A</i> и <i>B</i> или замыкание на землю фазы <i>C</i>	$\dot{U}^{(0)} + a \dot{U}^{(1)} + a^2 \dot{U}^{(2)} = 0$	$i^{(0)} = a i^{(1)} = a^2 i^{(2)} = \frac{i_C}{3}$
7	Замыкание между фазами <i>B</i> и <i>C</i>	$i^{(1)} + i^{(2)} = 0$	$\dot{U}^{(1)} = \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}_A}{3}$
8	Замыкание между фазами <i>C</i> и <i>A</i>	$a^2 i^{(1)} + a i^{(2)} = 0$	$a^2 \dot{U}^{(1)} = a \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}_B}{3}$
9	Замыкание между фазами <i>A</i> и <i>B</i>	$a i^{(1)} + a^2 i^{(2)} = 0$	$a \dot{U}^{(1)} = a^2 \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}_C}{3}$
10	Разрыв фазы <i>A</i> через переходное сопротивление <i>Z</i>	$i^{(0)} + i^{(1)} + i^{(2)} = \frac{\dot{U}}{Z}$	$\dot{U}^{(0)} = \dot{U}^{(1)} = \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}}{3}$
11	Разрыв фазы <i>B</i> через переходное сопротивление <i>Z</i>	$i^{(0)} + a^2 i^{(1)} + a i^{(2)} = \frac{\dot{U}}{Z}$	$\dot{U}^{(0)} = a^2 \dot{U}^{(1)} = a \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}}{3}$
12	Разрыв фазы <i>C</i> через переходное сопротивление <i>Z</i>	$i^{(0)} + a i^{(1)} + a^2 i^{(2)} = \frac{\dot{U}}{Z}$	$\dot{U}^{(0)} = a \dot{U}^{(1)} = a^2 \dot{U}^{(2)} = \frac{\dot{U}}{3}$
13	Замыкание на землю фазы <i>A</i> через переходное сопротивление <i>Z</i>	$\dot{U}^{(0)} + \dot{U}^{(1)} + \dot{U}^{(2)} = Z i_A$	$i^{(0)} = i^{(1)} = i^{(2)} = \frac{i_A}{3}$
14	Замыкание на землю фазы <i>B</i> через переходное сопротивление <i>Z</i>	$\dot{U}^{(0)} + a^2 \dot{U}^{(1)} + a \dot{U}^{(2)} = Z i_B$	$i^{(0)} = a^2 i^{(1)} = a i^{(2)} = \frac{i_B}{3}$
15	Замыкание на землю фазы <i>C</i> через переходное сопротивление <i>Z</i>	$\dot{U}^{(0)} + a \dot{U}^{(1)} + a^2 \dot{U}^{(2)} = Z i_C$	$i^{(0)} = a i^{(1)} = a^2 i^{(2)} = \frac{i_C}{3}$
16	Замыкание между фазами <i>B</i> и <i>C</i> через сопротивление <i>Z</i>	$-j\sqrt{3} \dot{U}^{(1)} + j\sqrt{3} \dot{U}^{(2)} = Z i_B$	$i^{(1)} = -i^{(2)} = j \frac{\sqrt{3}}{3} i_B$
17	Замыкание между фазами <i>C</i> и <i>A</i> через сопротивление <i>Z</i>	$(1-a)\dot{U}^{(1)} + (1-a^2)\dot{U}^{(2)} = Z i_A$	$\frac{i^{(1)}}{1-a^2} = \frac{i^{(2)}}{1-a} = \frac{i_A}{3}$
18	Замыкание между фазами <i>A</i> и <i>B</i> через сопротивление <i>Z</i>	$(1-a^2)\dot{U}^{(1)} + (1-a)\dot{U}^{(2)} = Z i_A$	$\frac{i^{(1)}}{1-a} = \frac{i^{(2)}}{1-a^2} = \frac{i_A}{3}$

Примечания: 1. Верхними индексами обозначены номера последовательностей. В местах коротких замыканий напряжения отсчитываются от нейтрали. В местах разрывов берутся продольные напряжения.

2. Таблица составлена в предположении, что расчетной является фаза *A*.

общие величины:

$$\rho_{o1} = \frac{1}{3} \dot{I}_1 = \dot{I}_1^{(0)} = \dot{I}_1^{(1)} = \dot{I}_1^{(2)}; \quad (1')$$

$$\rho_{o2} = \frac{1}{3} \dot{U}_2 = \dot{U}_2^{(0)} = \dot{U}_2^{(1)} = \dot{U}_2^{(2)} \quad (2')$$

(нижние индексы у токов и напряжений означают номера точек несимметрии, а верхние — номера последовательностей).

В силу предполагаемой линейности цепи связь между n суммирующимися и n общими токами и напряжениями в местах несимметрии выражаются для прямой, обратной и нулевой последовательностей в виде следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{c1}^{(\mu)} &= Z_{10}^{(\mu)} + Z_{11}^{(\mu)} \rho_{o1}^{(\mu)} + Z_{12}^{(\mu)} \rho_{o2}^{(\mu)} + \dots + Z_{1n}^{(\mu)} \rho_{on}^{(\mu)}; \\ \rho_{c2}^{(\mu)} &= Z_{20}^{(\mu)} + Z_{21}^{(\mu)} \rho_{o1}^{(\mu)} + Z_{22}^{(\mu)} \rho_{o2}^{(\mu)} + \dots + Z_{2n}^{(\mu)} \rho_{on}^{(\mu)}; \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \rho_{cn}^{(\mu)} &= Z_{n0}^{(\mu)} + Z_{n1}^{(\mu)} \rho_{o1}^{(\mu)} + Z_{n2}^{(\mu)} \rho_{o2}^{(\mu)} + \dots + Z_{nn}^{(\mu)} \rho_{on}^{(\mu)}. \end{aligned} \right\} (3)$$

В случае симметрично выполненных генераторов члены $Z_{10}^{(\mu)}, Z_{20}^{(\mu)}, \dots, Z_{n0}^{(\mu)}$ (первый нижний индекс указывает номер строки, а второй — столбца) для обратной ($\mu = 2$) и нулевой ($\mu = 0$) последовательностей равны нулю. Для прямой последовательности эти члены будут равны суммирующимся токам и напряжениям в точках несимметрий до появления последних, т. е. при условии равенства нулю величин $\rho_{o1}^{(\mu)}, \rho_{o2}^{(\mu)}, \dots, \rho_{on}^{(\mu)}$.

Коэффициенты $Z_{ik}^{(\mu)}$ уравнений (3) находятся из выражений

$$Z_{ik}^{(\mu)} = a^{i_{ik}^{(\mu)}} \rho_{ik}^{(\mu)}, \quad (4)$$

где $\rho_{ik}^{(\mu)}$ — коэффициенты уравнений, связывающих токи и напряжения, входящие в уравнения (3) для схем замещения.

Применительно к зависимостям (1), (1'), (2) и (2') величины $\rho_{ik}^{(\mu)}$ представляют коэффициенты системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1^{(\mu)} &= \zeta_{10}^{(\mu)} + \zeta_{11}^{(\mu)} \dot{I}_1^{(\mu)} + \zeta_{12}^{(\mu)} \dot{U}_2^{(\mu)}; \\ \dot{I}_2^{(\mu)} &= \zeta_{20}^{(\mu)} + \zeta_{21}^{(\mu)} \dot{I}_1^{(\mu)} + \zeta_{22}^{(\mu)} \dot{U}_2^{(\mu)}; \\ \mu &= 0, 1, 2. \end{aligned} \right\} (5)$$

Показатели $\nu_{ik}^{(\mu)}$ коэффициентов приведения $a^{\nu_{ik}^{(\mu)}}$ принимаются равными 0, 1 или 2. Для нулевой последовательности и для коэффициентов, расположенных на главной диагонали ($i = k$), $\nu = 0$. Для коэффициентов нулевого столбца ($Z_{io}^{(\mu)}$) ν равно показателю степени оператора суммирующейся величины данной строки. Для остальных коэффициентов $\nu_{ik}^{(1)} = 1$, $\nu_{ik}^{(2)} = 2$, если фаза, обуславливающая общую величину

(особенная фаза)¹, является последующей по отношению к фазе с суммирующейся величиной данной строки, и $\nu_{ik}^{(1)} = 2$, $\nu_{ik}^{(2)} = 1$, если фаза с суммирующейся величиной предшествует фазе с общей величиной.

Составив уравнение (3) для прямой, обратной и нулевой последовательностей и сложив одноименные (первые, вторые и т. д.) строки, получим следующие расчетные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= Z_{10} + Z_{11} \rho_{o1} + Z_{12} \rho_{o2} + \dots + Z_{1n} \rho_{on}; \\ \rho_2 &= Z_{20} + Z_{21} \rho_{o1} + Z_{22} \rho_{o2} + \dots + Z_{2n} \rho_{on}; \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \rho_n &= Z_{n0} + Z_{n1} \rho_{o1} + Z_{n2} \rho_{o2} + \dots + Z_{nn} \rho_{on}. \end{aligned} \right\} (6)$$

где $\rho_{o1}, \rho_{o2}, \dots, \rho_{on}$ — общие величины точек несимметрии 1, 2... n . Величины $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, представляющие результат сложения суммирующихся величин, следует брать прямо из табл. 1. Коэффициенты Z_{ik} уравнений имеют вид:

$$Z_{ik} = Z_{ik}^{(0)} + Z_{ik}^{(1)} + Z_{ik}^{(2)} \quad (7)$$

или

$$Z_{ik} = \zeta_{ik}^{(0)} + a^{\nu_{ik}^{(1)}} \zeta_{ik}^{(1)} + a^{\nu_{ik}^{(2)}} \zeta_{ik}^{(2)}. \quad (8)$$

Число расчетных уравнений (6) равно числу точек несимметрий n . Очевидно, это наименьшее число уравнений для рассматриваемой задачи.

Определение токов и напряжений изложенным способом можно производить в следующем порядке.

Из табл. 1 выбираются суммирующиеся и общие токи и напряжения отдельных последовательностей, характеризующие имеющиеся в цепи повреждения. Затем составляются обычным способом схемы замещения цепи для отдельных последовательностей. Уравнения схем замещения записываются таким образом, чтобы токи и напряжения, входящие в суммирующиеся величины, выражались через токи и напряжения, входящие в общие величины [Л. 10]. Коэффициенты уравнений схем замещения могут быть типа Z, Y, A (цепочечная матрица) или других типов. Для простых схем замещения эти коэффициенты вычисляются известными методами холостого хода и короткого замыкания, методом наложения или берутся из таблиц [Л. 9]. Для сложных цепей рекомендуется применять метод подсхем [Л. 9 и 10]. Если несимметрии цепи относятся к разным фазам, то коэффициенты уравнений схем замещения следует привести к расчетной фазе путем умножения на a^ν , где $\nu = 0, 1, 2$ и определяются указанным выше способом. Коэффициенты расчетных уравнений находятся путем простого суммирования одноименных приведенных коэффициентов разных последовательностей. По по-

¹ Особенная фаза—это та фаза, которая поставлена в условия, отличные от условий двух других фаз [Л. 1].

лученным коэффициентам составляются расчетные уравнения (6), которые решаются относительно неизвестных — токов и напряжений в местах повреждения.

Выше имелось в виду, что все точки несимметрии находятся в электрически связанной цепи. Когда между точками несимметрии имеется аппарат углового смещения (трансформатор), то он должен быть учтен в коэффициентах приведения аналогично тому, как это делает в своих работах Н. Н. Щедрин [Л. 1].

ПРИЛОЖЕНИЕ. Пример расчета цепи с одним коротким замыканием и двумя разрывами. Рассмотрим расчет цепи, приведенной на рис. 1. Данные цепи заимствованы из работы Н. И. Соколова [Л. 2].

Численные значения параметров исходной схемы в относительных единицах: $\dot{E}_M = j2$; $\dot{E}_N = j1$; $Z_M^{(1)} = j2$; $Z_M^{(0)} = Z_M^{(2)} = Z_N^{(0)} = Z_N^{(1)} = Z_N^{(2)} = j1$, $Z_T^{(0)} = j0,4$; $Z_T^{(1)} = Z_T^{(2)} = \infty$.

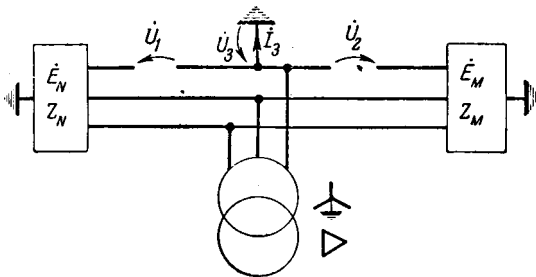


Рис. 1. Схема трехфазной цепи (к примеру)

Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для данной задачи берем одинакового вида (рис. 2).

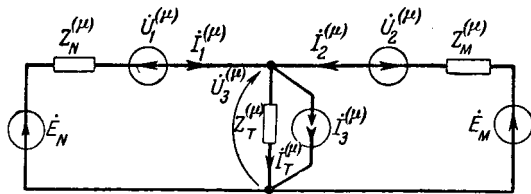


Рис. 2. Схема замещения для симметричных составляющих.

Из табл. 1 выписываем суммирующиеся и общие токи и напряжения.

Суммирующиеся величины:

Общие величины:

$$\left. \begin{aligned} i_1^{(0)} + i_1^{(1)} + i_1^{(2)} &= 0; & \dot{U}_1^{(0)} &= \dot{U}_1^{(1)} = \dot{U}_1^{(2)} = \frac{\dot{U}_1}{3}; \\ i_2^{(0)} + i_2^{(1)} + i_2^{(2)} &= 0; & \dot{U}_2^{(0)} &= \dot{U}_2^{(1)} = \dot{U}_2^{(2)} = \frac{\dot{U}_2}{3}; \\ i_3^{(0)} + i_3^{(1)} + i_3^{(2)} &= 0; & i_3^{(0)} &= i_3^{(1)} = i_3^{(2)} = \frac{i_3}{3}. \end{aligned} \right\} (1,1)$$

Так как все три несимметрии сосредоточены в одной фазе, то $v_{ik}^{(\mu)} = 0$.

Составляем уравнения схем замещения последовательностей. При этом учитываем, что $\zeta_{ik}^{(\mu)} = Z_{ik}^{(\mu)}$, так как $v_{ik}^{(\mu)} = 0$.

Имеем:

$$\left. \begin{aligned} i_1^{(\mu)} &= Z_{10}^{(\mu)} + Z_{11}^{(\mu)} \frac{\dot{U}_1}{3} + Z_{12}^{(\mu)} \frac{\dot{U}_2}{3} + Z_{13}^{(\mu)} \frac{i_3}{3}; \\ i_2^{(\mu)} &= Z_{20}^{(\mu)} + Z_{21}^{(\mu)} \frac{\dot{U}_1}{3} + Z_{22}^{(\mu)} \frac{\dot{U}_2}{3} + Z_{23}^{(\mu)} \frac{i_3}{3}; \\ i_3^{(\mu)} &= Z_{30}^{(\mu)} + Z_{31}^{(\mu)} \frac{\dot{U}_1}{3} + Z_{32}^{(\mu)} \frac{\dot{U}_2}{3} + Z_{33}^{(\mu)} \frac{i_3}{3}. \end{aligned} \right\} (1,2)$$

Одноименные коэффициенты схем замещения в общем виде одинаковы. Они легко определяются по методу наложения²:

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}^{(\mu)} &= - \frac{1}{Z_N + \frac{Z_M Z_T}{Z_T + Z_M}}; & Z_{12}^{(\mu)} &= \frac{Z_T}{Z_N + Z_T} \frac{Z_N \cdot Z_T}{Z_M + Z_N + Z_T}; \\ Z_{13}^{(\mu)} &= - Z_{31}^{(\mu)} = \frac{Z_T Z_M}{Z_N + Z_T + Z_M}; \\ Z_{21}^{(\mu)} &= \frac{Z_T}{Z_M + Z_T} \frac{Z_M Z_T}{Z_N + Z_T + Z_M}; \\ Z_{22}^{(\mu)} &= - \frac{1}{Z_M + \frac{Z_T Z_N}{Z_T + Z_N}}; \\ Z_{23}^{(\mu)} &= - Z_{32}^{(\mu)} = \frac{Z_T Z_N}{Z_M + Z_T + Z_N}; \\ Z_{33}^{(\mu)} &= - \frac{Z_N Z_T Z_M}{Z_N Z_T + Z_T Z_M + Z_N Z_M}; \\ Z_{10}^{(\mu)} &= \frac{\dot{E}_N}{Z_N + \frac{Z_M Z_T}{Z_T + Z_M}} - \frac{\dot{E}_M}{Z_M + \frac{Z_N Z_T}{Z_T + Z_N}} \frac{Z_T}{Z_N + Z_T}; \\ Z_{20}^{(\mu)} &= \frac{-\dot{E}_N}{Z_N + \frac{Z_M Z_T}{Z_T + Z_M}} \frac{Z_T}{Z_M + Z_T} + \frac{\dot{E}_M}{Z_M + \frac{Z_N Z_T}{Z_T + Z_N}} \frac{Z_T}{Z_N + Z_T}; \\ Z_{30}^{(\mu)} &= \frac{Z_T Z_M}{Z_N + \frac{Z_T Z_M}{Z_T + Z_M}} \frac{\dot{E}_N}{Z_T Z_M} + \frac{Z_T Z_N}{Z_M + \frac{Z_T Z_N}{Z_T + Z_N}} \frac{\dot{E}_M}{Z_T Z_N}. \end{aligned} \right\} (1,3)$$

Подставляя в общие выражения коэффициентов схем замещения данные задачи и используя формулу (7), получаем численные значения коэффициентов схем замещения и коэффициентов расчетных уравнений (табл. 2). Величины $Z_{io}^{(0)} = Z_{io}^{(2)} = 0$, так как источники напряжения симметричные.

² В целях сокращения записи, индексы μ в правых частях выражений опущены.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений последовательностей			Коэффициенты расчетных уравнений $z_{ik}^{(0)} + z_{ik}^{(1)} + z_{ik}^{(2)}$
нулевая $z_{ik}^{(0)}$	прямая $z_{ik}^{(1)}$	обратная $z_{ik}^{(2)}$	
$z_{11}^{(0)} = j \frac{7}{9}$	$z_{11}^{(1)} = j \frac{1}{3}$	$z_{11}^{(2)} = j \frac{1}{2}$	$Z_{11} = j \frac{29}{18}$
$z_{12}^{(0)} = -j \frac{2}{9}$	$z_{12}^{(1)} = -j \frac{1}{3}$	$z_{12}^{(2)} = -j \frac{1}{2}$	$Z_{12} = -j \frac{19}{18}$
$z_{13}^{(0)} = \frac{2}{9}$	$z_{13}^{(1)} = \frac{2}{3}$	$z_{13}^{(2)} = \frac{1}{2}$	$Z_{13} = \frac{25}{18}$
$z_{10}^{(0)} = 0$	$z_{10}^{(1)} = -\frac{1}{3}$	$z_{10}^{(2)} = 0$	$Z_{10} = -\frac{1}{3}$
$z_{21}^{(0)} = -j \frac{2}{9}$	$z_{21}^{(1)} = -j \frac{1}{3}$	$z_{21}^{(2)} = -j \frac{1}{2}$	$Z_{21} = -j \frac{19}{18}$
$z_{22}^{(0)} = j \frac{7}{9}$	$z_{22}^{(1)} = j \frac{1}{3}$	$z_{22}^{(2)} = j \frac{1}{2}$	$Z_{22} = j \frac{29}{18}$
$z_{23}^{(0)} = \frac{2}{9}$	$z_{23}^{(1)} = \frac{1}{3}$	$z_{23}^{(2)} = \frac{1}{2}$	$Z_{23} = \frac{19}{18}$
$z_{20}^{(0)} = 0$	$z_{20}^{(1)} = \frac{1}{3}$	$z_{20}^{(2)} = 0$	$Z_{20} = \frac{1}{3}$
$z_{31}^{(0)} = -\frac{2}{9}$	$z_{31}^{(1)} = -\frac{2}{3}$	$z_{31}^{(2)} = -\frac{1}{2}$	$Z_{31} = -\frac{25}{18}$
$z_{32}^{(0)} = -\frac{2}{9}$	$z_{32}^{(1)} = -\frac{1}{3}$	$z_{32}^{(2)} = -\frac{1}{2}$	$Z_{32} = -\frac{19}{18}$
$z_{33}^{(0)} = -j \frac{2}{9}$	$z_{33}^{(1)} = -j \frac{2}{3}$	$z_{33}^{(2)} = -j \frac{1}{2}$	$Z_{33} = -j \frac{25}{18}$
$z_{30}^{(0)} = 0$	$z_{30}^{(1)} = j \frac{4}{3}$	$z_{30}^{(2)} = 0$	$Z_{30} = j \frac{4}{3}$

Пользуясь данными четвертой графы табл. 2, записываем расчетные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} j \frac{29}{18} \cdot \frac{\dot{U}_1}{3} - j \frac{19}{18} \cdot \frac{\dot{U}_2}{3} + \frac{25}{18} \cdot \frac{\dot{I}_3}{3} - \frac{1}{3} &= 0; \\ -j \frac{19}{18} \cdot \frac{\dot{U}_1}{3} + j \frac{29}{18} \cdot \frac{\dot{U}_2}{3} + \frac{19}{18} \cdot \frac{\dot{I}_3}{3} + \frac{1}{3} &= 0; \\ -\frac{25}{18} \cdot \frac{\dot{U}_1}{3} - \frac{19}{18} \cdot \frac{\dot{U}_2}{3} - j \frac{25}{18} \cdot \frac{\dot{I}_3}{3} + j \frac{4}{3} &= 0. \end{aligned} \right\} (1.4)$$

Полученные уравнения решаются относительно неизвестных—токов и напряжений в местах повреждений:

$$\dot{U}_1 = j1; \quad \dot{U}_2 = j1,674; \quad \dot{I}_3 = 0,608.$$

Возвращаясь к уравнениям (10), определим симметричные составляющие токов в левой и правой частях схемы ($i_1^{(\mu)}$ и $i_2^{(\mu)}$):

$$\begin{aligned} i_1^{(0)} &= -0,090; & i_1^{(1)} &= -0,123; & i_1^{(2)} &= 0,213; \\ i_2^{(0)} &= -0,315; & i_2^{(1)} &= 0,326; & i_2^{(2)} &= -0,011. \end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов трансформатора определяются по первому закону Кирхгофа (рис. 2):

$$\begin{aligned} i_T^{(\mu)} &= i_1^{(\mu)} + i_2^{(\mu)} - i_3^{(\mu)}; \\ i_T^{(0)} &= 0,608; & i_T^{(1)} &= i_T^{(2)} = 0. \end{aligned}$$

Заметим, что полученные результаты совпадают с результатами, полученными Н. И. Соколовым [Л. 2].

Литература

1. Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1946.
2. Н. И. Соколов. Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях. Электричество, № 8, 1949.
3. А. Б. Чернин. Короткие замыкания при неполнофазных режимах электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
4. Н. М. Горбатов. К расчету токов и напряжений короткого замыкания. Электричество, № 4, 1952.
5. Р. А. Воронов. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. Госэнергоиздат, 1951.
6. Н. А. Мельников. Расчеты режимов работы сетей электрических систем. Госэнергоиздат, 1950.
7. С. А. Лебедев и П. И. Сазанов. Раздельное выключение фаз и автоматический однофазный резерв для линий передач. Электричество, № 10, 1933.
8. С. А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Госэнергоиздат, 1949.
9. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд. АН СССР, 1951.
10. Г. Е. Пухов. Теория метода подсхем. Электричество, № 8, 1952.

[3. 7. 1954]



Влияние полупроводящей глазури на разрядные явления по загрязненной поверхности фарфора¹

Кандидат техн. наук ДЕН ДУ ХВАН

Корея

Постановка задачи. Одним из неразрешенных вопросов в области электрической изоляции является создание надежной изоляции на электро-технических установках, расположенных в районах с загрязненной атмосферой. Исследованием этого вопроса занимаются уже ряд лет. До последнего времени полагали, что главными факторами в снижении разрядных характеристик загрязненных изоляторов являются запыление и увлажнение. На основе этих представлений были предложены изоляторы специальной формы [Л. 1] и изоляторы с подогревателем. Однако опыт эксплуатации показал [Л. 2], что эти решения не в полной мере обеспечивают надежную работу высоковольтных изоляторов в условиях сильно загрязненной атмосферы.

В 1942 г. Форрест [Л. 4 и 5] предложил новый тип изолятора — «стабилизированный» изолятор. Наблюдая поведение загрязненных гирлянд подвесных изоляторов в тумане, им было выявлено, что в этих условиях распределение напряжения по гирлянде резко неравномерное что приводит к сильному снижению напряжения перекрытия гирлянд. С целью предотвращения возникновения неравномерного распределения напряжения по загрязненной гирлянде Форрест предложил три способа снижения сопротивления отдельного элемента в гирлянде: а) путем вмонтирования в него конденсатора; б) путем вмонтирования в него сопротивления; в) нанесением на его поверхность полупроводящей глазури. Форрест полагает, что последний способ являлся наилучшим, обеспечивающим наиболее высокий срок службы изоляторов. У гирлянд с поверхностью, покрытой полупроводящей глазурью, даже при относительной влажности 90 %, не наблюдается скачкообразного изменения тока, и они при описанных условиях не перекрываются, тогда как у гирлянд из обычных изоляторов в тех же условиях появляются интенсивные скачки тока, приводящие к перекрытию [Л. 5]. Такие благоприятные результаты представляют значительный научный и практический интерес и оправдывают дальнейшие исследования в этом направлении.

Работы Форреста и других исследователей [Л. 3... 8] посвящены в основном изучению поведения гирлянды изоляторов. Исследуя поведение гирлянды, авторы не задавались целью повысить разрядные характеристики изоляторов, хотя этот вопрос, по нашему мнению, является основным и коренным в создании надежной изоляции в районе с загрязненной атмосферой.

Методика исследования разрядных характеристик фарфора, покрытого полупроводником. При изучении явления разряда по поверхности твердых диэлектриков, покрытых полупроводниками (слоем загрязнения, полупроводящей глазурью

и др.), весьма важным является способ приложения напряжения к образцу. Единственно правильным является метод внезапного приложения напряжения к образцу в виде импульса. Метод плавного подъема напряжения, применявшийся Р. Т. Левшуновым [Л. 8] и другими исследователями, не отражает действительной картины разрядных характеристик. При плавном подъеме напряжения, во-первых, может измениться состояние слоя загрязнения из-за его нагревания током, во-вторых, возможно значительное повышение температуры полупроводящей глазури и даже ее тепловое разрушение.

Метод внезапного приложения напряжения к образцу был применен Г. А. Лебедевым [Л. 9] и Есторффом и Кроном [Л. 10]. Однако внезапное приложение напряжения к образцу почти всегда связано с возникновением значительных перенапряжений на образце. Есторфф и Крон не учитывали этого. Г. А. Лебедев с целью предотвращения перенапряжения на образце располагал выключатель достаточно близко к объекту испытания. Однако, очевидно, возможность возникновения перенапряжения этим еще не исключается, поскольку во включаемой цепи находятся, кроме активного сопротивления, индуктивность и емкость. Таким образом, до настоящего времени не был разработан метод, который позволял бы внезапно прикладывать напряжение к образцу, не возбуждая перенапряжений на нем.

Предварительными исследованиями было установлено, что необходимо регулировать момент приложения напряжения к образцу. Для этого удобнее всего поместить выключатель на первичной (низковольтной) стороне испытательного трансформатора. Для проведения таких исследований нами предложен метод внезапного приложения напряжения к образцу, исключающий возможность возникновения перенапряжений на образце даже при включении выключателя на первичной стороне испытательного трансформатора.

Внезапное приложение напряжения к образцу через испытательный трансформатор связано с двумя затруднениями: 1) сильный толчкообразный ток в первичном контуре (толчок насыщения); 2) перенапряжение на образце. Первое затруднение было разрешено путем подбора испытательного напряжения, значительно меньшего, чем номинальное напряжение испытательного трансформатора. Второе затруднение было устранено на основе анализа явления возникновения перенапряжения на образце.

Используя общеизвестную схему замещения трансформатора, внезапно подключаемого к сети, цепь можно представить в виде, показанном на рис. 1. Если для краткости пренебречь в этой схеме активной и реактивной проводимостями, соответствующими току холостого хода,

¹ Работа была выполнена автором в Государственном научно-исследовательском электротехническом институте.

то дифференциальное уравнение для напряжения на образце $U_{об}$ будет иметь вид:

$$\frac{d^2 U_{о5}}{dt^2} + \left(\frac{R_o}{L_o} + \frac{1}{RC} \right) \frac{dU_{о5}}{dt} + \frac{1}{L_o C} \left(1 + \frac{R_o}{R} \right) U_{о5} = \frac{U_o}{L_o C} \sin(\omega t + \theta), \quad (1)$$

где $U_{о5}$ — напряжение на зажимах образца;
 U_o — максимальное значение напряжения источника;

$\omega = 2\pi f$, f — частота;
 θ — сдвиг фазы напряжения источника;

$R_o = R_1 + R_2$ — общее активное сопротивление испытательного трансформатора;
 $L_o = L_1 + L_2$ — общая индуктивность рассеяния испытательного трансформатора;
 R — активное сопротивление образца;
 C — емкость образца.

Для рассматриваемого нами случая представляет интерес решение уравнения (1) при выполнении неравенства

$$\frac{1}{4} \left(\frac{R_o}{L_o} - \frac{1}{RC} \right)^2 > \frac{1}{L_o C}, \quad (2)$$

которое справедливо, когда поверхность образцов загрязнена или покрыта полупроводящей глазурью.

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид:

$$U_{об} = U_{m о5} \sin(\omega t + \theta - \varphi) - U_{m о5} \times \left[e^{-(\alpha-\beta)t} \left\{ \frac{\omega}{2\beta} \cos(\theta - \varphi) + \frac{\alpha + \beta}{2\beta} \sin(\theta - \varphi) \right\} - e^{-(\alpha+\beta)t} \left\{ \frac{\omega}{2\beta} \cos(\theta - \varphi) + \frac{\alpha - \beta}{2\beta} \sin(\theta - \varphi) \right\} \right]; \quad (3)$$

здесь

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} \left(\frac{R_o}{L_o} + \frac{1}{RC} \right); \\ \beta &= \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R_o}{L_o} - \frac{1}{RC} \right)^2 - \frac{1}{L_o C}}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$U_{m о5}$ — максимальное значение напряжения на зажимах образца;

φ — сдвиг фазы напряжения на зажимах образца относительно напряжения источника.

В нашем случае $\omega \ll \beta$, поэтому переходная часть равенства (3) может быть записана в следующем виде:

$$U'_{об} = -U_{m о5} \left[e^{-(\alpha-\beta)t} \frac{\alpha + \beta}{2\beta} - e^{-(\alpha+\beta)t} \frac{\alpha - \beta}{2\beta} \right] \sin(\theta - \varphi). \quad (3a)$$

Из уравнения (3a) видно, что если подключение трансформатора к сети происходит в момент $\theta - \varphi = \frac{\pi}{2}$, то ввиду большого значения β

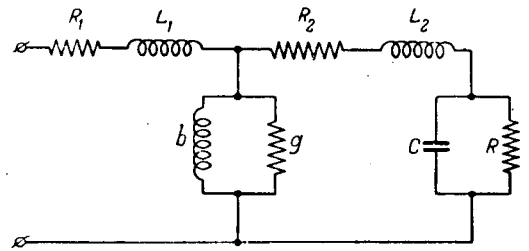


Рис. 1. Схема замещения подключаемой к сети цепи.

R_1, R_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток испытательного трансформатора; L_1, L_2 — индуктивности рассеяния первичной и вторичной стороны испытательного трансформатора; R — активное сопротивление образца; C — емкость образца.

и малого значения $\alpha - \beta$ возникает на зажимах образца значительное перенапряжение, почти достигающее двойного значения установившегося напряжения. Если же произвести включение трансформатора к сети при условии $\theta - \varphi = 0$, то перенапряжение не будет иметь места. Для нашего контура $\varphi \approx 0$, поэтому необходимо производить подключение к сети в момент $\theta \approx 0$.

Следует отметить, что проведенный нами подробный анализ уравнения (1) показал, что в случае незагрязненных изоляторов (R — велико) их также необходимо подключать к сети в момент $\theta - \varphi = 0$.

Для осуществления возможности регулирования момента приложения напряжения к образцу была разработана схема с применением тиратронов (рис. 2).

Схема действует следующим образом: при включенном рубильнике P , но при открытом контакте k сетки тиратронов T_a и T_b имеют отрицательный потенциал и на испытательный трансформатор T_{r1} не подано напряжение. После пуска осциллографа автоматически включается находящийся в нем контакт k , тем самым подается напряжение на трансформатор T_{r3} . После этого в момент, когда достигается условие $e_2 + e_g = 0$, сетки тиратронов T_a и T_b теряют свои отрицательные потенциалы и тиратроны T_b один за другим начинают пропускать ток

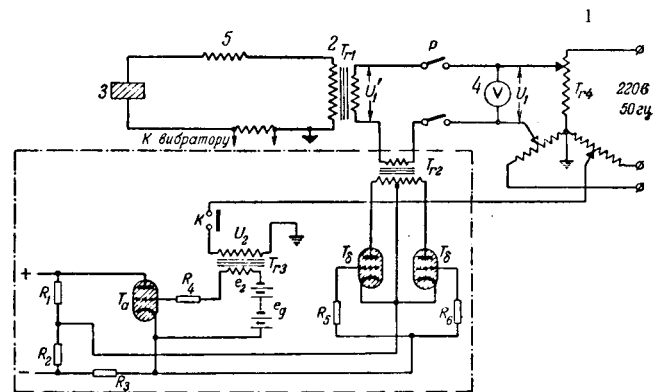


Рис. 2. Схема электронного включателя (схема испытания).

1 — автотрансформатор; 2 — испытательный трансформатор; 3 — образец; 4 — астатический вольтметр; 5 — защитное сопротивление. T_a, T_b — тиратроны, R_1 — 1 мгом, R_2 — 60 ком, R_3 — 200 ком, R_4 — 100 ком, $R_5 = R_6$ — 60 ком.

анода. Следовательно, в этот момент к испытательному трансформатору прилагается полное испытательное напряжение. Так как в данном случае сдвиг фаз между напряжением источника U_1 и напряжением U_2 трансформатора T_{r3} составляет 90° и максимальное значение вторичного напряжения e_{2m} трансформатора T_{r3} равно по величине напряжению батареи e_g , то испытательный трансформатор должен подключаться в момент, когда напряжение источника проходит через нуль, что подтверждается осциллограммой рис. 3.

Для исследования влияния полупроводящей глазури на разрядные явления вдоль загрязненной поверхности фарфора в качестве образцов были использованы фарфоровые трубки с внутренним диаметром 5,1 см, наружным 6,8 и длиной 32 см, покрытые полупроводящей глазурью.

Для получения заданного значения сопротивления слоя полупроводящей глазури поверхность трубки посредством шлифования разделялась на отдельные продольные полосы. Таким образом, на наружной поверхности фарфоровой трубки находилась полоса полупроводящей глазури длиной 10 и шириной 0,6 ... 1,1 см. На концы полос наносились серебряные электроды методом вжигания на расстоянии 8 см один от другого. Толщина полупроводящей глазури была порядка $8 \cdot 10^{-3}$ см для всех образцов, а удельное объемное сопротивление используемых глазурей изменялось в интервале от $4,8 \cdot 10^3$ до $31,5 \cdot 10^3$ ом·см. Таким образом за счет различия в удельных сопротивлениях полупроводящей глазури были получены образцы с разным сопротивлением глазури на участке поверхности в 1 см^2 (от $0,6 \cdot 10^6$ до $3,9 \cdot 10^6$ ом). Выбор вида загрязнения был обусловлен необходимыми значениями отношения k — сопротивления слоя полупроводящей глазури на единицу поверхности к сопротивлению слоя загрязнения на том же участке. Поверхность этой глазури загрязнялась равномерно водой с удельным объемным сопротивлением порядка 1 000 ом·см.

Первые опыты по перекрытию загрязненных образцов, покрытых полупроводящей глазурью, показали, что даже при $k > 1$ происходит значительное повышение напряжения перекрытия. К тому же условие $k > 1$ является наиболее целесообразным из условия уменьшения потерь электроэнергии. Поэтому исследование производили на образцах со значениями $k > 1$. Это условие выполнялось только при наличии водной пленки (вода не дистиллированная) с удельным сопротивлением порядка 1 000 ом·см. Проводимости других видов загрязнения оказались слишком низкими и значение $k > 1$ не достигалось. Вода не воспроизводит загрязнения, обычно встречающегося в практике. Однако многими исследователями установлено, что снижение разрядных характеристик загрязненной поверхности зависит главным образом от проводимости загрязненного слоя [Л. 1]. В связи с указанным условием $k > 1$

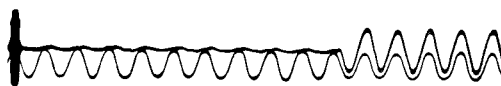


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на зажимах испытательного трансформатора.

Верхняя — напряжение на зажимах испытательного трансформатора, нижняя — напряжение источника.

сопротивление слоя загрязнения было выбрано порядка $0,125 \cdot 10^6$ ом на единицу поверхности.

Чтобы четко выявить влияние полупроводящей глазури на разрядные характеристики загрязненной поверхности фарфора, мы поставили контрольные опыты также с образцами, не покрытыми глазурью, и испытывали их в тех же условиях. Процесс разряда записывался при помощи магнитного осциллографа МПО-2.

Результаты опытов. Осциллограммы тока через образцы (рис. 4) четко характеризуют влияние полупроводящей глазури на разрядные характеристики загрязненной поверхности фарфора в зависимости от отношения k . Скачкообразное увеличение тока (рис. 4) означает возникновение перекрытия, что согласуется с данными наблюдения.

На рис. 4,а приведены осциллограммы для случая напряженности электрического поля 2,9 кВ/см. Образцы с загрязненной поверхностью, но не покрытые полупроводящей глазурью ($k \approx \infty$), переключаются через 6 мкс ($0,12$ сек) после приложения к ним напряжения; образцы, покрытые полупроводящей глазурью, при значении $k = 35$ переключаются через 26 мкс ($0,52$ сек), а в случае $k = 13$, а также $k = 5,3$ перекрытия не наступает (осциллограмма для $k = 13$ не приведена).

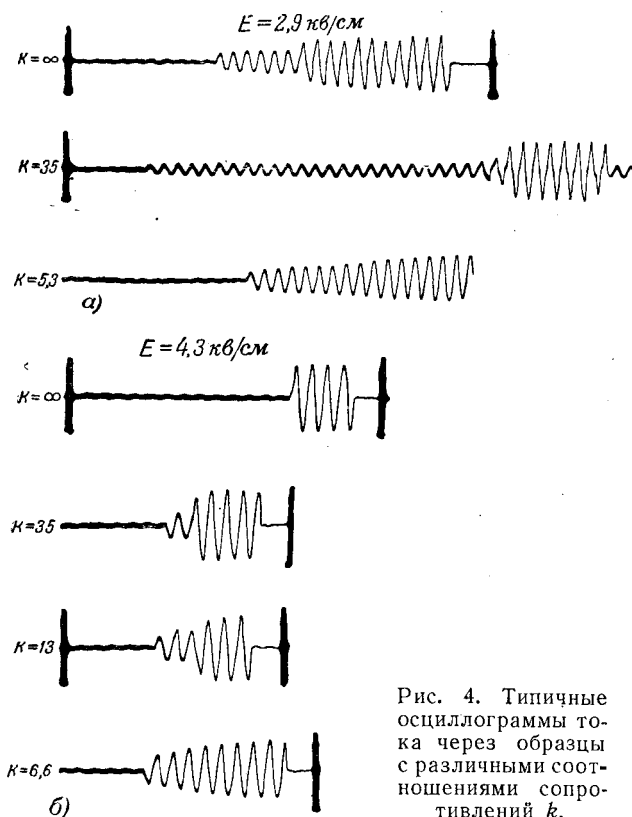


Рис. 4. Типичные осциллограммы тока через образцы с различными соотношениями сопротивлений k .

На рис. 4,б приведены осциллограммы для напряженности электрического поля 4,3 кв/см. Образцы с загрязненной поверхностью, но не покрытые полупроводящей глазурью ($k \approx \infty$), перекрываются в момент приложения к образцу напряжения; образцы, покрытые полупроводящей глазурью, с отношением сопротивлений $k = 35$ перекрываются через 1,5 гц (0,03 сек) после приложения к образцу напряжения, а при отношении $k = 13$ перекрываются через 2,5 гц (0,05 сек); образцы, покрытые полупроводящей глазурью, при отношении сопротивлений $k = 6,6$ не перекрываются.

Данные испытаний показывают, что наличие полупроводящей глазури значительно улучшает разрядные характеристики загрязненной поверхности фарфора и мера этого эффекта сильно зависит от отношения сопротивлений k . С уменьшением k возрастает напряжение перекрытия, а также время от момента приложения напряжения к образцу до возникновения перекрытия.

Полученные экспериментальные данные можно объяснить, исходя из существующего механизма перекрытия, согласно которому прямой причиной перекрытия является появление на поверхности частичных разрядов. Активное и емкостное сопротивления обычной глазури весьма велики, поэтому распределение напряженности по поверхности загрязненного обычного изолятора определяется сопротивлением слоя загрязнения. Вследствие этого большая доля напряжения падает на тот участок, где поверхностное сопротивление значительно (подсушенный слой загрязнения). Эта неравномерность распределения напряжения усиливает неравномерность распределения поверхностного сопротивления, что, в свою очередь, увеличивает неравномерность распределения напряжения и т. д. В результате появляются частичные разряды по поверхности. Следовательно, перекрытия по загрязненной поверхности возникают по причине неравномерного распределения напряжения на его поверхности.

При наличии полупроводящей глазури распределение напряжения по загрязненной поверхности зависит не от сопротивления слоя загрязнения, а от отношений сопротивлений k . Действительно, если рассматривать равномерно загрязненную поверхность фарфора шириной 1 см и длиной l см, покрытого полупроводящей глазурью, и предположить, что по какой-то причине сопротивление слоя загрязнения только на участке длиной 1 см стало бесконечным, тогда степень равномерности распределения напряжения по поверхности может быть выражена в виде:

$$(l-1) \frac{U_1}{U_2} = \frac{\left(\frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{\rho_{2,а}} + \frac{1}{R}\right) + j\omega C}{\left(\frac{1}{\rho_{2,а}} + \frac{1}{R}\right) + j\omega C},$$

где ρ_3 — сопротивление слоя загрязнения на единицу поверхности;

$\rho_{2,а}$ — сопротивление глазури на единицу поверхности;

R — сопротивление тела образца на единицу длины;

C — емкость тела образца на единицу длины;

$\omega = 2\pi f$, f — частота;

U_1 — напряжение на участке, где $\rho_3 \approx \infty$;

U_2 — напряжение на остальном участке;

$(l-1) \frac{U_1}{U_2}$ — степень равномерности распределения напряжения по загрязненной поверхности, которая при равномерном распределении имеет значение, равное единице, а при неравномерном распределении — больше единицы.

Если полагать в этом равенстве $\rho_{2,а} = k\rho_3$ и пренебречь по ее малости величиной $1/R$, то можно написать зависимость степени равномерности от значения k в виде:

$$(l-1) \frac{U_1}{U_2} = \frac{\left(1 + \frac{1}{k}\right) + j\omega C \rho_3}{\frac{1}{k} + j\omega C \rho_3}. \quad (6)$$

Так как $\omega C \rho_3$ — весьма малая величина, то значение правой части равенства (6) в основном определяется отношением k . Из равенства (6) видно, что чем меньше k , тем равномернее распределение напряжения. Именно поэтому наличие полупроводящей глазури улучшает разрядные характеристики загрязненной поверхности фарфора, а степень этого улучшения зависит от отношений k .

Выводы. Основные результаты проведенной работы можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Одним из главных факторов, снижающих напряжения перекрытия загрязненной поверхности твердых диэлектриков, является возникновение резко неравномерного распределения напряженности по поверхности. Полупроводящая глазурь, нанесенная равномерно на поверхность фарфора, предотвращает возникновение такой неравномерности распределения электрического поля по поверхности и тем самым значительно улучшает поверхностные разрядные характеристики.

2. Степень улучшения разрядных характеристик загрязненного фарфора, покрытого полупроводящей глазурью, зависит главным образом от отношения k — сопротивления слоя полупроводящей глазури на единицу поверхности к сопротивлению слоя загрязнения на том же участке, определяющего равномерность распределения напряженности электрического поля по поверхности изолятора.

Улучшение поверхностных разрядных характеристик фарфора в основном выражается: 1) в повышении напряжения перекрытия и 2) в замедлении наступления перекрытия. Замедление наступления перекрытия может иметь

существенное практическое значение для защиты изоляторов от коммутационных и других перенапряжений, если учесть кратковременный характер этих перенапряжений.

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что улучшение разрядных характеристик загрязненного фарфора, покрытого полупроводящей глазурью, достигается и в тех случаях, когда сопротивление полупроводящей глазури значительно больше, чем сопротивление слоев загрязнения. Так, при $k = 6,6$ поверхность фарфора не перекрывается даже при $E = 4,3$ кВ/см, что немного ниже сухоразрядной напряженности электрического поля при чистой поверхности фарфора. При $k = 35$ и $E = 2,9$ кВ/см полупроводящая глазурь задерживает момент наступления перекрытия на 20 мкс (0,4 сек). Выявленные факторы, по видимому, могут служить основанием для создания надежно работающих изоляторов в условиях сильно загрязненной атмосферы.

В заключение выражаю глубокую благодарность канд. техн. наук Х. С. Валееву, ценными указаниями и советами которого я пользовался в процессе работы. Весьма признателен также проф. Н. Г. Дроздову за обсуждение данной работы и инж. К. М. Стрельцову за большую помощь в ее выполнении.



Литература

1. А. В. Ефимов. Разработка и исследование специальных изоляторов для загрязняемых районов. Изолятор. Госэнергоиздат, 1941.
2. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, т. 2, стр. 274—275, 1939.
3. J. S. Forrest. The Electrical Characteristics of 132 kV Line Insulators under Various Weather Conditions. JIEE, т. 79, N 478, стр. 401...423, 1936.
4. J. S. Forrest. The Characteristics and Performance in Service of High-Voltage Porcelain Insulators. JIEE, т. 89, ч. II, стр. 60...92, № 7, 1942.
5. J. S. Forrest. Insulateurs pour très haute tension en porcelaine enduite de vernis semi-conducteur. Société Belge des Électriciens, т. 66, № 3, 1950.
6. J. S. Forrest. The Electrical Properties of Semi-Conducting Ceramic Glazes. Journal of Scientific Instruments, т. 24, стр. 211...217, 1947.
7. D. H. Lucas. The Properties of Semi-Conducting Ceramic Glazes. British Journal of Applied Physics, т. 3, стр. 293...296, № 9, 1952.
8. Р. Т. Левшунов. Исследование изоляторов, покрытых полупроводящей глазурью. Электрические станции, стр. 36, № 4, 1954.
9. Г. А. Лебедев. Мокроразрядные напряжения изоляторов при коммутационных перенапряжениях. Труды научно-технической сессии по перенапряжениям. Госэнергоиздат, 1950.
10. W. Esdorff, H. V. Cron. Der Hochspannungsisolator als Bremsschichtproblem, ETZ, т. 73, стр. 57...62, № 3, 1952.

[7. 1. 1955]

Испытание витковой изоляции обмоток электродвигателей в условиях эксплуатации

Кандидат техн. наук М. В. СМЕРНОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Электростанции ежегодно в порядке профилактики проводят планово-предупредительный осмотр и ремонт электродвигателей собственных нужд. Подобные же осмотры и ремонты электродвигателей производят многие предприятия другого типа. Важно во время этих осмотров и ремонтов выявить слабые места витковой изоляции и устранить поврежденные секции. Однако до сих пор нет методов и аппаратуры, которые обеспечивали бы надежное испытание витковой изоляции на электрическую прочность повышенным напряжением. Поэтому в условиях эксплуатации витковую изоляцию или вовсе не подвергают испытанию, или ограничивают испытанием напряжением $1,3 U_n$ по стандарту. Такое испытательное напряжение явно недостаточно, так как оно во много раз ниже того напряжения, которое может возникнуть в обмотках электродвигателей при коммутационных и иных перенапряжениях в условиях эксплуатации.

Имеющие распространение в производстве электрических машин импульсные методы испытания витковой изоляции непригодны для применения в условиях эксплуатации, когда нет доступа к отдельным секциям; подача импульсного напряжения на фазу не обеспечит испытания всех секций обмотки, так как вследствие неравномерного распределения импульсных напряжений

вдоль обмотки испытанию повышенным напряжением подвергается витковая изоляция лишь первых секций.

В условиях эксплуатации на обмотку могут падать волны напряжения с крутым фронтом, максимальные амплитуды которых превосходят $\sqrt{2} U_n$ [Л. 2 и 3]. Напряжение на первой секции может достигать 80...95% амплитудного значения независимо от числа витков секции [Л. 1]. Поэтому импульсное испытательное напряжение должно быть не ниже $0,95 \sqrt{2} U_n$ на секцию.

В статье описаны разработанные автором метод и аппарат для импульсных испытаний витковой изоляции обмоток электродвигателей в условиях эксплуатации, когда нет доступа к отдельным секциям.

Описание аппарата. Сущность метода заключается в следующем. При помощи мощного электромагнита 16 (рис. 1), питаемого тиратронным импульсным генератором, индуцируется высокое напряжение в витках секции, лежащей в пазу, над которым установлен электромагнит. В случае пробоя витковой изоляции индуцируемым напряжением загорается неоновая лампочка.

Работа аппарата происходит следующим образом.

От высоковольтного трансформатора 2, питаемого от сети посредством плавно регулируемого

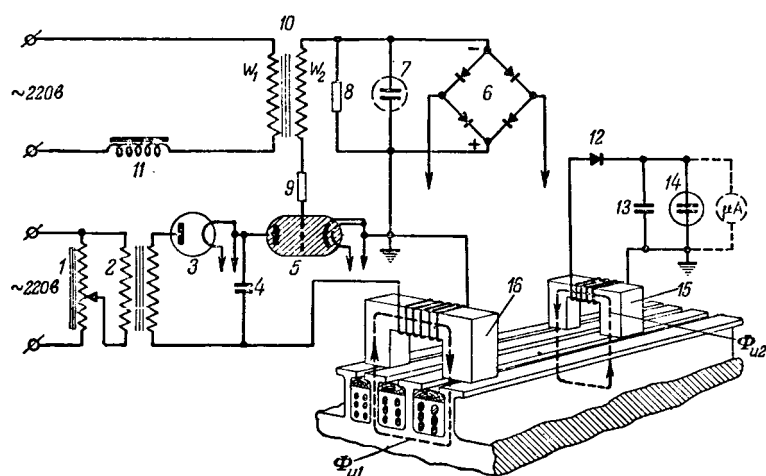


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата для испытания витковой изоляции электродвигателей.

1 — автотрансформатор; 2 — высоковольтный трансформатор; 3 — газотрон; 4 — конденсатор; 5 — тиратрон; 6 — селеновые выпрямители запирающего блока; 7 — конденсатор запирающего блока; 8 — выпрямители запирающего блока; 9 — сеточное сопротивление; 10 — пик-трансформатор; 11 — дроссель; 12 — селеновый выпрямитель; 13 — конденсатор сигнального блока; 14 — неоновая лампа (или микроамперметр); 15 — контрольный электромагнит; 16 — мощный электромагнит.

автотрансформатора 1, через газотрон 3 заряжается конденсатор 4. Тиратрон 5 заперт отрицательным потенциалом на его сетке, поданным от запирающего блока. Первичная обмотка w_1 пик-трансформатора 10 питается через дроссель 11 от той же сети, что и импульсный генератор. Вторичная обмотка w_2 пик-трансформатора включена в сеточную цепь тиратрона 5 в такой полярности, что в положительный полупериод, когда заряжается конденсатор 4, пикообразная э. д. с. вторичной обмотки пик-трансформатора накладывается со знаком минус на сетку на запирающее напряжение тиратрона 5 и способствует еще большему запирающему тиратрона. В следующий, отрицательный полупериод пикообразная э. д. с. вторичной обмотки пик-трансформатора накладывается на запирающее напряжение тиратрона со знаком плюс на сетке. Так как эта э. д. с. больше запирающего напряжения и противоположна ему по знаку, то тиратрон 5 отпирается и заряженный в предыдущий полупериод конденсатор 4 разряжается на обмотку электромагнита 16. Импульсный генератор питается от сети переменного тока 50 гц, и процесс заряда и разряда конденсатора 4 повторяется каждый период. Протекающий по обмотке электромагнита 16 импульсный ток создает магнитный поток Φ_{u1} . Сцепляясь с витками, лежащими в пазу под средней электромагнита, поток Φ_{u1} наводит в витках импульсное напряжение. Величина наводимого напряжения регулируется при помощи автотрансформатора 1. При отсутствии пробоя между испытываемыми витками ток по ним протекать не будет. Если в пазу, над которым расположена середина электромагнита 16, произойдет пробой витковой изоляции и образуются короткозамкнутые витки, то наведенная в них потоком Φ_{u1} э. д. с. вызовет импульсный ток, который создаст вокруг короткозамкнутых витков другой магнит-

ный поток, распределенный по всей их длине. Часть этого потока Φ_{u2} замкнется через контрольный электромагнит 15, установленный над тем же пазом, что и электромагнит 16 (рис. 1), и наведет в его обмотке э. д. с. При этом загорится неоновая лампа 14 сигнального устройства, присоединенного к этой обмотке. Вместо лампы в качестве индикатора пробоя можно применить микроамперметр.

Порядок испытания. Прежде чем включить аппарат в сеть, нужно, собрав схему согласно рис. 1 и установив электромагниты 15 и 16 над пазом, в котором расположена испытываемая секция обмотки статора, снять или проколоть изоляцию в двух местах на концах этой секции. К оголенным местам секции присоединяют амплитудный вольтметр. Затем включают аппарат в сеть и не меньше чем в течение 5 мин прогревают лампы. После прогрева ламп, при помощи автотрансформатора 1 повышают напряжение на секции. Напряжение на секции должно быть равно заданному испытательному напряжению на виток, умноженному на число витков в секции.

Параллельные ветви обмоток образуют замкнутые контуры. Поэтому в случае испытания обмоток, имеющих параллельные ветви, индикатор будет ложно указывать на пробой при исправном состоянии изоляции, и без распылки ветвей обмотки аппарат не может быть использован в целях испытания обмоток с параллельными ветвями. Не рекомендуется также этим методом испытывать обмотки, закладываемые в пазы враспыльную. В этих случаях первый виток секции может оказаться рядом с последним, и тогда витковая изоляция между этими витками окажется под импульсным напряжением всей секции. На такое напряжение эта изоляция не рассчитана и она может быть пробита.

Параметры элементов аппарата. Питание аппарата предусмотрено от сети переменного тока 220 в. В схеме используется автотрансформатор 1 типа ЛАТР1 (220 в, 9 а). Вторичное напряжение трансформатора 2 составляет 2 800 в, потребляемый аппаратом от сети ток 2 а. Сердечник Ш-35 × 80 мм, $w_1 = 470$, провод ПЭЛШО 0,83; $w_2 = 6 000$, провод ПЭЛШО 0,25. Лампа 3 — газотрон типа ВГ-129 (или ГГ1-0,5/5) на 5 кв, 1,5 а в амплитуде. Лампа 5 — тиратрон на 3,5 кв, 200 а в амплитуде. Конденсатор 4 типа РЛ-0,5, 0,5 мкф, 5 кв. Дроссель 11: сердечник Ш-11 × 25, 3 500 витков, провод ПЭЛ 0,12; пик-трансформатор 10 имеет сердечник из пермаллоя Ш-11 × 10, $w_1 = 550$, ПЭЛ 0,2 и $w_2 = 1 550$, ПЭЛ 0,12. Сеточное сопротивление 9 типа ВС-2, 4,3 ком. Запирающий блок состоит из: селенового выпрямителя, собранного из четырех столбиков типа ВС-18-26; электролитического конденсатора 7 типа КЭГ-1 б, 20 мкф, 150 в; сопротивления 8 типа ВС-0,5, 1 мгом. Амплитудное напряжение на выходе аппарата — не более 3 кв.

Как показал опыт эксплуатации аппарата, при электромагните 16 указанных ниже размеров и конфигурации согласно рис. 3 на одном витке можно получить импульсное напряжение 300...500 в.

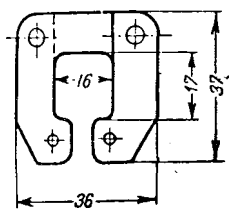


Рис. 2. Размеры пластины контрольного электромагнита 15.

Большой электромагнит 16 имеет форму буквы П. Размеры листа трансформаторной стали толщиной 0,35 мм следующие: ширина полюса 45 мм, высота окна 28 мм, ширина 16 мм, толщина (пакета стали) 137 мм (толщина пакета составляет от 137 до 225 мм в зависимости от минимальной длины испытываемого статора). Обмотка состоит из двух одинаковых параллельно соединенных катушек; катушки имеют по три витка и рассчитаны на напряжение 3 кв импульсного значения.

Малый контрольный электромагнит 15 также имеет форму буквы П. Размеры стали (рис. 2): ширина полюса 10 мм, высота по окну 17 мм, ширина окна 16 мм, толщина пакета 30 мм. Электромагнит 15 должен перекрывать только один паз. Катушка электромагнита 15 имеет 100 витков из провода ПЭЛШО 0,41 мм. В зависимости от ширины паза статора и ширины охватывающих его зубцов, электромагнит 15 может иметь простую форму буквы П, без загиба концов полюсов внутрь и с меньшим срезом или совсем без среза наружных углов полюсов.

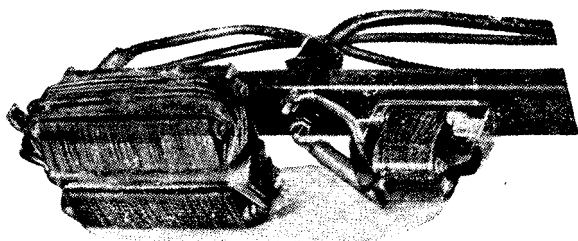


Рис. 3. Опытный образец приспособления с двумя электромагнитами.

Опытный образец приспособления с двумя электромагнитами показан на рис. 3. Держатель, на котором закрепляются электромагниты 15 и 16, в отличие от показанного на рис. 3, должен иметь длину 0,8...1,0 м. Длина должна быть достаточной для того, чтобы 2 чел., стоящие у противоположных торцов статора, взявшись за концы держателя, могли, соблюдая правила техники безопасности, переставлять электромагниты по рассточке статора, с паза на паз.

Сигнальное устройство состоит из селенового выпрямителя 12 типа ВС-18-26 (20 элементов диаметром 18 мм); конденсатора 13 типа КВГМ-2, 0,001...0,005 мкф, 600 в; неоновой лампы 14 на 110...220 в или микроамперметра типа М494 на 50 мка, смонтированных на панели в виде отдельного блока. Для измерения импульсного напряжения на испытываемых секциях необходимо применять амплитудный вольтметр.

Достоинства и недостатки аппарата. Достоинствами аппарата являются его простота, портативность, небольшой вес отдельных элементов, выполненных в виде самостоятельных блоков, удобных для переноски. Недостатком является то, что для испытания обмотки статора двигателя нужно вынимать ротор, однако при профилактических испытаниях на электростанциях ротор, как правило, вынимается. Для испытания витковой изоляции статорных обмоток гидрогенераторов с многовитковыми секциями или катушками необходимо или проворачивать ротор, если приспособление с электромагнитами размещается между полюсами, или приподнимать статор на такую высоту, чтобы приспособление с электромагнитами можно было устанавливать над каждым пазом. Это, видимо, можно осуществить только при капитальных ремонтах гидрогенераторов.

Неоновая лампа иногда загорается при отсутствии витковых замыканий за счет наводок и больших емкостных токов, протекающих в испытываемой обмотке. Этот недостаток можно устранить, применив вместо лампы микроамперметр.

Опыт эксплуатации. Аппарат с тиратронным импульсным генератором был испытан в лабораторных условиях, затем в условиях эксплуатации. При помощи аппарата испытывалась витковая изоляция секций обмоток высоковольтных двигателей, уложенных в пазы, но еще не соединенных между собой. Испытательное напряжение было установлено равным 500 в на виток. Испытывались обмотки статоров 6-кв двигателей типов ДАМСО, ДАМЭ и АМ. Всего было испытано 45 статоров и у трех было обнаружено по одной секции с дефектной витковой изоляцией, которые пробились. За время испытания ненормальностей в работе аппарата не наблюдалось.

При помощи аппарата и приспособления с двумя электромагнитами было проведено испытание витковой изоляции обмотки гидрогенератора завода «Электросила» на одной из гидростанций. Мощность гидрогенератора 8750 кв, напряжение 11 кв. Генератор проработал в эксплуатации 27 лет. Испытание всех секций сперва индуктированным импульсным напряжением 300 в на виток, а затем повторно 535 в на виток не сопровождалось пробоем витковой изоляции.

Лабораторные исследования и опыт эксплуатации аппарата показали, что разработанный импульсный метод испытания витковой изоляции обмоток электродвигателей в условиях эксплуатации вполне себя оправдал и может быть применен на электростанциях, заводах и в других организациях, эксплуатирующих электродвигатели и гидрогенераторы с многовитковыми секциями.

Литература

1. Г. Н. Петров и А. И. Абрамов. Межвитковые напряжения в обмотках электрических машин при волновых процессах. Электричество, № 7, 1954.
2. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, Госэнергоиздат, вып. III, 1945.
3. Руководящие указания по защите от перенапряжений установок переменного тока напряжением 3...220 кв, 1946.

Электроннолучевой прибор для изучения импульсных процессов в обмотках трансформаторов

Кандидат техн. наук Н. А. ТАТАРНИКОВА

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Атмосферные перенапряжения воздействуют на обмотки трансформаторов в виде кратковременных импульсов. Для таких импульсов обмотки представляют собой сложную схему, состоящую из емкостей, индуктивностей и взаимоиндуктивностей. Возникающие переходные волновые процессы характеризуются большой неравномерностью распределения импульсного напряжения по обмоткам. Эти импульсные напряжения могут вызывать повреждения изоляции обмоток трансформаторов в виде пробоя главной изоляции или пробоя между отдельными элементами продольной изоляции. Создание грозоупорных трансформаторов также обеспечивается выполнением правильного расчета их внутренней изоляции. Расчет изоляции обмоток трансформаторов усложняется с ростом его напряжения. Здесь становится решающим вопрос о достижении электрической прочности изоляции, в основном продольной, без значительного увеличения стоимости и габаритов трансформаторов. Теория переходных процессов в обмотках трансформаторов весьма сложна и не дает простого метода для правильной оценки величин импульсных напряжений, воздействующих на главную и продольную изоляцию обмоток. Обычно вопрос решается путем непосредственного измерения на моделях или реальных трансформаторах действительных значений потенциалов и градиентов, получающихся при воздействии на них импульсных волн, амплитуды которых безопасны для изоляции.

Измерения значительно упрощаются при использовании повторно-импульсного осциллографа, представляющего сочетание электроннолучевого осциллографа со встроенным в него миниатюрным низковольтным импульсным генератором и специальной схемой синхронизации. Прибор обладает следующим рядом ценных качеств:

1. Использование низковольтного генератора позволяет без риска повреждения исследуемой обмотки воздействовать на нее многократно импульсами различной формы.

2. Возможность наблюдения кратковременных импульсных процессов в виде неподвижного изображения на экране трубки.

3. Фотографирование изучаемого процесса не вызывает затруднений.

4. Прибор можно выполнить достаточно портативным и удобным для перемещения, что позволяет его вплотную придвинуть к исследуемому объекту и сделать подводку к пластине явления минимально короткой.

5. Работа с прибором безопасна, проста и не требует специальной подготовки перед включением его в работу.

Использование в исследованиях повторно-импульсного осциллографа на трансформаторных заводах в значительной мере облегчит рациональное проектирование изоляции трансформаторов.

Прибор такого типа (ИПГ-3) разработан ВЭИ.

Схема прибора. На рис. 1 показана блок-схема прибора. Взаимная связь между отдельными блоками и последовательность их работы в схеме осуществляется следующим образом. При включении напряжения на элементах электроннолучевой трубки появляются соответствующие потенциалы, но луч еще заперт отрицательным смещением на модуляторе электроннолучевой трубки. Первым начинает работать генератор синхронизирующих импульсов (рис. 2), создавая синхронизирующие импульсы каждый полупериод напряжения сети. При получении синхронизирующих импульсов начинает работать блок временной развертки, вызывая срабатывание блока отпирания луча. Появившийся луч записывает нулевую линию на экране трубки.

Синхронизирующие импульсы приходят и на сетку тиратрона *T-2* блока генератора импульсных волн и на сетку тиратрона *T-4* блока временной градуировки.

Блоки генератора импульсных волн и временной градуировки получают пульсирующие напряжения питания, причем один блок работает в одну полуволну, а другой в другую полуволну напряжения сети. Такая последовательность работы блоков дает возможность при измерении потенциалов, подводя волну с объекта к одной из пластин явления, а временную градуировку к другой пластине явления, наблюдать на экране электроннолучевой трубки одновременно и волну и временную градуировку.

Блок среза импульсных волн включается только тогда, когда желают получить срезанную волну. Блок емкостных делителей используется для измерения потенциалов, а также градиентов, если измеряемая разность потенциалов создаст достаточное отклонение луча на экране трубки, при этом сохраняется хорошая фокусировка луча. Если измеряемая разность потенциалов дает незаметное отклонение луча на экране,

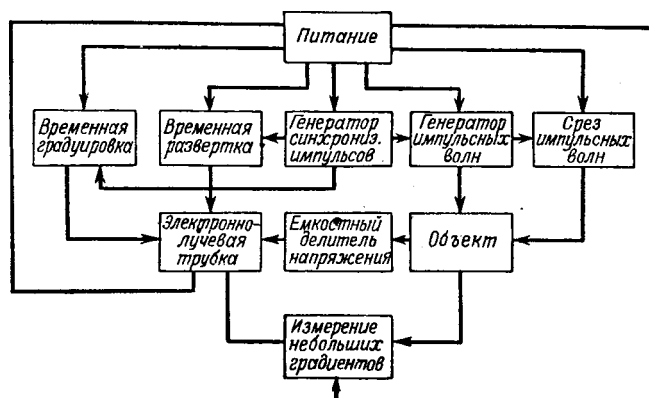


Рис. 1.

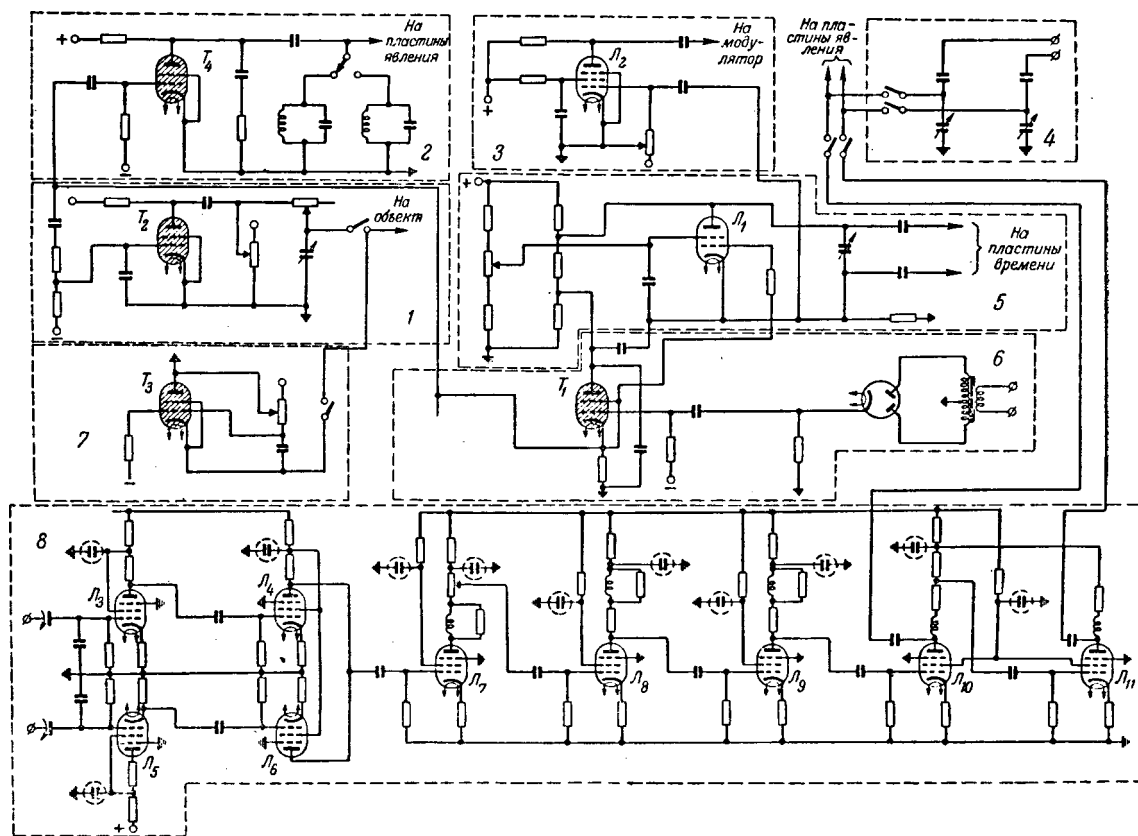


Рис. 2. Принципиальная схема повторно-импульсного осциллографа типа ИПГ-3.

1 — блок генератора импульсных волн; 2 — временной градуировки; 3 — отклонения луча; 4 — блок емкостных делителей; 5 — временной развертки; 6 — синхронизации; 7 — среза импульсных волн; 8 — блок для измерения небольших градиентов.

то включается блок для измерения небольших градиентов.

Получаемая на экране трубки неподвижная осциллограмма измеряемого потенциала или градиента может быть зарисована или фотографирована.

Наиболее интересной и сложной частью схемы прибора является блок для измерения небольших градиентов (рис. 2). Введение в схему прибора этого блока обусловлено следующими соображениями.

Измерение небольших градиентов при помощи емкостных делителей не представляется возможным по той причине, что получается недостаточное отклонение луча на экране трубки. Получить достаточное отклонение луча с хорошей фокусировкой за счет увеличения разности потенциалов нельзя. Для этого потребуется подать на пластины явления значительные потенциалы одной и той же полярности, которые в промежутке между пластинами явления и вторым анодом будут создавать большие искажающие поля, дефокусирующие электронный луч.

Получение четкой записи с хорошо сфокусированным лучом и достаточной амплитудой отклонения производится блоком для измерения небольших градиентов. Задача решается путем выделения искомой разности потенциалов и приведения ее к потенциалу относительно земли

с последующим усилением до значения, обеспечивающего необходимое отклонение луча на экране трубки.

Выделение измеряемой разности потенциалов производится частью схемы блока (рис. 2), выполненной на лампах L_3-L_6 , а остальная часть схемы на лампах L_7-L_{11} усиливает полученную разность потенциалов.

Усилительная часть блока выполнена по схеме реостатно-емкостного усилителя. Выбор постоянных в цепях ламп произведен из условия получения наименьших нелинейных, частотных и фазовых искажений, а также получения выходного напряжения, обеспечивающего достаточное отклонение луча на экране трубки.

Схема блока позволяет измерять разности потенциалов, составляющие 5% от амплитуды воздействующей на обмотку импульсной волны, при

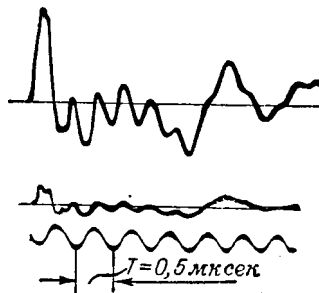


Рис. 3.

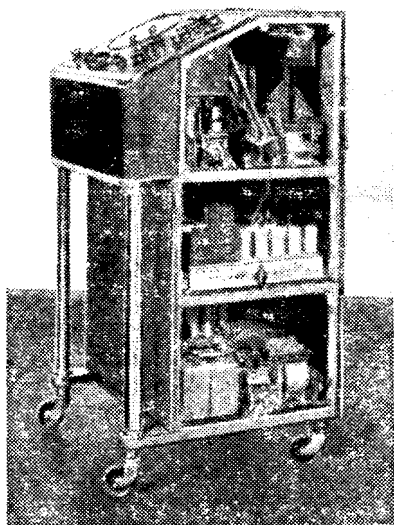


Рис. 4. Повторно-импульсный осциллограф ИПГ-3 (ВЭИ).

этом можно достичь десятикратного усиления градиента.

В качестве иллюстрации точности воспроизведения блоком кривой градиента на рис. 3 приведены две осциллограммы, снятые на одной фазе 30-кв обмотки трансформатора типа ТМ 320/35; обмотка катушечного типа, собранная из 28 сдвоенных катушек. На рис. 3,а приводится осциллограмма градиента шестой катушки, снятая при помощи блока для измерения небольших градиентов, а на рис. 3,б — осциллограмма того же градиента, полученная при помощи емкостных делителей.

Конструктивное оформление прибора (рис. 4). Блоки расположены по трем ярусам. В нижнем ярусе расположен блок питания. Для удобства смены дефектных деталей блок смонтирован на выдвижной панели. Во втором ярусе помещен блок для измерения небольших градиентов и делитель напряжения трубки. На третьем ярусе расположены блоки: временной развертки, временной градуировки, генератора синхронизирую-

щих импульсов, генератора импульсных волн, емкостных делителей. Каждый блок смонтирован отдельно и его можно вынуть из прибора.

Для удобства визуального наблюдения электроннолучевая трубка расположена в наклонном положении и проходит через верхний и средний ярусы. Управление прибором осуществляется с верхней наклонной панели. Для фотографирования осциллограмм предусмотрено специальное фотоустройство со встроенным объективом. Крепится фотоустройство при помощи двух специальных гаек, расположенных около экрана трубки.

Основные технические характеристики прибора типа ИПГ-3

1. Временная развертка имеет четыре ступени грубой регулировки с плавной регулировкой на каждой ступени. При наиболее быстрой временной развертке луч перемещается по экрану 120 мм за время 2,5 мксек и при наиболее медленной — за время 600 мксек.

2. Импульсный генератор позволяет получать апериодические волны длиной от 30 до 150 мксек с фронтом от 0,2 мксек.

Изменение параметров волны происходит плавно, без изменения ее амплитуды.

3. Блок среза импульсной волны позволяет срезать импульсную волну с различным временем запаздывания.

4. Блок для измерения небольших градиентов позволяет записать на экране трубки с усилением от 1 до 10 кривую градиента, максимальный пик которой составляет 5% от амплитуды импульсной волны.

5. Временная градуировка дает синусоидальные колебания с периодом $T_1 = 0,5$ мксек и $T_0 = 5$ мксек.

В измерениях при помощи емкостных делителей входная емкость равна 13 пф, а в измерениях при помощи блока для измерения небольших градиентов она составляет около 9 пф.

Прибор ИПГ-3 можно также использовать в учебных лабораториях институтов для наглядного обучения при изучении волновых процессов в обмотках.

[30.9.1954]



Ионизация бумажной маслопропитанной изоляции

(Обзор)

Кандидат техн. наук, доц. Е. В. КАЛИНИН

Ленинград

Наиболее совершенные методы обнаружения ионизации основаны на измерении электронным осциллографом высокочастотных токов, возникающих в изоляции при наступлении ионизации. В советской литературе [Л. 1] описаны методы осциллографирования ионизационных токов в изоляции, дающие чувствительность, в несколько раз превышающую достигнутую за рубежом, поэтому в настоящем обзоре описание этих методов осциллографирования опущено. Точно так же

опущено за небольшим исключением изложение влияния ионизации на работу изоляции, пропитанной минеральными маслами, так как процессы в подобной изоляции также хорошо освещены в советской литературе.

Физическая природа ионизации в конденсаторной изоляции [Л. 3]. Бумага, пропитанная жидким диэлектриком. Когда к пропитанному жидким диэлектриком конденсатору прикладывается постепенно повышающееся синусоидаль-

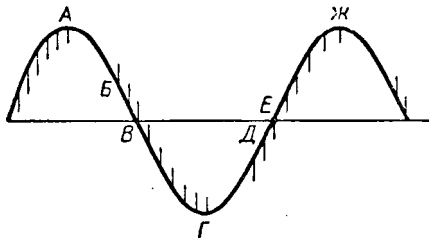


Рис. 1. Фазы вспышек ионизации (конденсатор из крафт-целлюлозы, пропитанный жидким диэлектриком).

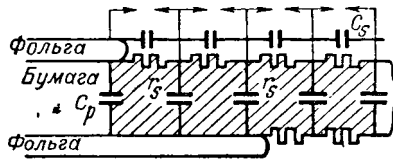


Рис. 2. Эквивалентная схема диэлектрика конденсатора.

C_p — параллельная емкость; C_s — поверхностная емкость; r_s — поверхностная утечка.

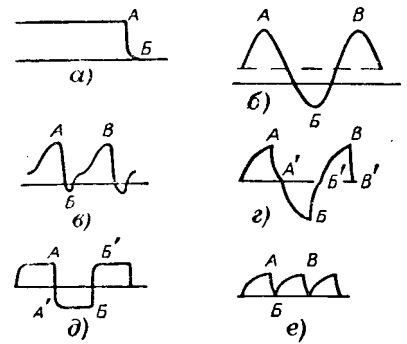


Рис. 3. Формы волн, при которых исследовано возникновение переходной ионизации.

ное напряжение, то в процессе его повышения сначала выявляется ионизация сравнительно малой интенсивности. При дальнейшем увеличении напряжения ионизация резко меняется по характеру — в 10 ... 100 раз, — увеличиваясь по интенсивности, и продолжает быстро усиливаться при дальнейшем возрастании напряжения. В зоне малой интенсивности ионизация носит случайный характер, меняясь от образца к образцу, и представляется, что она зависит от структуры диэлектрика в отдельных точках. Интенсивность этого типа ионизаций может мало изменяться с напряжением и может даже быть независимой от напряжения, ионизация может даже вовсе пропадать. Поэтому она называется неустойчивой ионизацией.

Ионизация большой интенсивности воспроизводится от образца к образцу. Она появляется на краю обкладок и характеризуется общей структурой образца в этой области. Поэтому она называется характеристической ионизацией.

Подобное поведение диэлектрика наблюдается при частотах от 20 до 500 кгц на бумагах как пропитанных минеральными маслами, так и пентахлордифенилом. При более высоких частотах интенсивность неустойчивой ионизации увеличивается и переход от неустойчивой к характеристической ионизации становится нерезким. С увеличением частоты напряжение начала характеристической ионизации падает.

В то время как неустойчивая ионизация возникает вблизи амплитуды синусоиды, характеристическая ионизация обнаруживается в разных частях синусоиды, как показано на рис. 1. Очевидно, что поле в диэлектрике определяется не только приложенным напряжением, так как вспышки ионизации возникают и около нуля кривой напряжения (рис. 1). Это обстоятельство показывает, что на электрическое поле влияют также и значительные пространственные заряды, созданные ионизационными процессами. После достижения амплитуды (точка А, рис. 1), когда приложенное к конденсатору напряжение начинает уменьшаться, то, так как образовавшийся положительный пространственный заряд не может быстро стечь обратно к электроду, напряженность поля в диэлектрике на краю электрода начинает возрастать. Когда в момент В напряженность оказывается достаточно большой, возникает вспышка ионизации, во время которой часть

пространственного заряда оставляет диэлектрик и вызывает кратковременное повышение потенциала обкладки. Этот процесс повторяется по мере дальнейшего изменения напряжения. Вблизи точки В весь положительный пространственный заряд оказывается нейтрализованным отрицательными вспышками ионизации и в дальнейшем вспышки создают отрицательный пространственный заряд вплоть до момента Г (рис. 1). На участке ВГ происходит кратковременное понижение потенциала обкладки.

Таким образом, когда при синусоидальной волне напряжения возникает характеристическая ионизация, то процесс на протяжении одной полу волны поддерживается за счет ионизации, имевшей место в предшествующую полу волну. Поэтому этот тип ионизации можно также назвать устойчивым. Процесс характеристической ионизации вполне отображает эквивалентная схема рис. 2, действие которой очевидно.

Ионизация при выпрямленном напряжении и при неустойчивых режимах. Когда к твердому диэлектрику, пропитанному жидким диэлектриком, прикладывается медленно возрастающее выпрямленное напряжение, то вплоть до пробоя диэлектрика ионизация не возникает. Однако, если конденсатор достаточно быстро разряжается (рис. 3, а), то ионизация появляется, причем с увеличением скорости спада напряжения уменьшается необходимое для появления ионизации значение спада. Ионизация этого типа воспроизводится от образца к образцу и ее следует считать характеристической. Но так как волна неперриодическая, то ионизация не носит устойчивого характера, — эта ионизация называется характеристической переходной ионизацией. Этот тип ионизации также объясняет эквивалентная схема рис. 2.

Ионизация при циклических напряжениях разной формы (рис. 3, б—е). Как следует из предыдущего, наличие постоянной составляющей не оказывает влияния на переходную ионизацию. Ионизация появляется в конце участка с быстрым изменением напряжения (АВ на рис. 3, в, е; АА'; ВВ' на рис. 3, г и д). При некотором значении напряжения происходит рез-

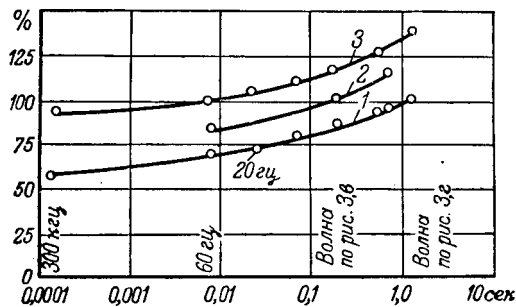


Рис. 4. Напряжение начала устойчивой ионизации в зависимости от времени релаксации.
1 — толщина диэлектрика 40 мкн; 2 — 55 и 3 — 85 мкн.

кое увеличение интенсивности ионизации и появление ее также на участках со слабой скоростью изменения напряжения. Эта ионизация большой интенсивности обладает теми же свойствами, что и устойчивая ионизация при синусоидальной волне, и поэтому поддерживается пространственным зарядом от одного полуцикла к следующему. Опыт показывает, что наступление устойчивой ионизации совпадает с началом процесса повреждения диэлектрика, поэтому этот тип ионизации требует наиболее тщательного изучения.

Время релаксации устойчивой ионизации. Если в волне вида, показанного на рис. 3, в, постепенно увеличивать время от B до B до нескольких секунд, то наступает режим, когда устойчивая ионизация вовсе не появляется — переходная ионизация просто усиливается по интенсивности. Это происходит потому, что пространственный заряд, внесенный в диэлектрик переходной ионизацией предыдущего цикла, успевает стечь к началу следующего цикла. Промежуток времени между двумя скачками напряжения назван автором временем релаксации. При волне вида, показанного на рис. 3, в и d , этот промежуток исчисляется между соседними полуциклами.

На рис. 4 приведена зависимость от времени релаксации величины скачка напряжения, необходимого для возникновения устойчивой ионизации. Скачок выражен в процентах от двойной амплитуды напряжения 60 гц, вызывающего аналогичную ионизацию при толщине диэлектрика 85 мкн.

В приводимом автором примере весьма совершенного диэлектрика из крафт-бумаги, обработанной поливинилкарбозолом, поверхностное сопротивление было практически бесконечным¹. В таком диэлектрике ионизация появлялась и при выпрямленном напряжении при времени подъема напряжения, доходившем в опытах до 10 мин. Диэлектрик с практически конечным удельным сопротивлением ведет себя примерно так же, как и рассмотренный выше диэлектрик с жидкой пропиткой.

Разряды в газовых пузырях в диэлектрике [Л. 4]. Изучение возникновения и гашения ионизации в искусственно созданных газовых возду-

¹ Оно составляет около $10^{14} \dots 10^{15}$ ом·см (Справочник электрической изоляции под ред. Б. М. Тареева, стр. 59, 77, 1948 г.).

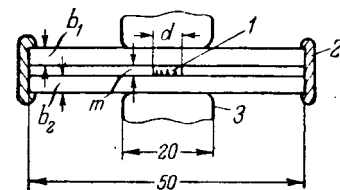


Рис. 5. Устройство для исследования газового пузыря внутри диэлектрика.
1 — газовый пузырь; 2 — замазка; 3 — электрод.

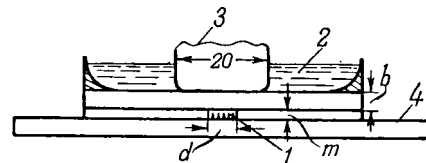


Рис. 6. Опытное устройство при газовом пузыре, прилегающем к электроду.
1 — газовый пузырь; 2 — масло; 3 и 4 — электроды.

ных пузырях в диэлектрике производилось при синусоидальном напряжении 50 и 1000 гц. Форма образцов показана на рис. 5 и 6. Газовый пузырь имел цилиндрическую форму с гладкими стенками. Экспериментально устанавливалось напряжение на образце в момент возникновения и гашения ионизации. По размерам диэлектрика и газового пузыря рассчитывалось напряжение на газовом пузыре и напряженность электрического поля. На основании исследования была получена формула для напряжения по оси пузыря, где существует наибольшая разность потенциалов:

$$\frac{U'}{U} = \frac{\left(1 + \frac{2b}{m}\right) \epsilon^{1,6} + \epsilon \left(\frac{d}{m}\right)^{3/2} \left(\epsilon + \frac{2b}{m}\right)}{\left(1 + \frac{2b}{m}\right)^2 \epsilon^{1,6} + \left(\frac{d}{m}\right)^{3/2} \left(\epsilon + \frac{2b}{m}\right)^2},$$

где U' — напряжение на газовом пузыре;
 U — напряжение на образце;
 b — толщина диэлектрика;
 m — толщина газового пузыря;
 d — его диаметр;
 ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

В результате исследований было найдено, что напряжение зажигания ионизации U' не зависит от диаметра пузыря, а также от толщи-

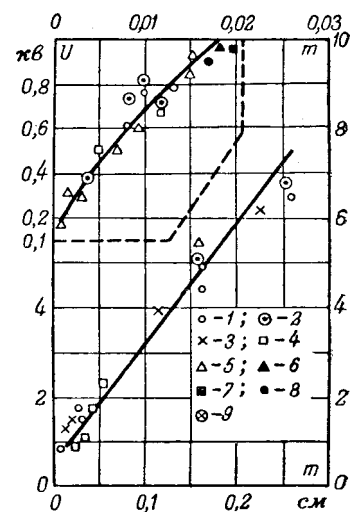


Рис. 7. Средние значения напряжения возникновения ионизации в газовом пузыре (действующая значения).

1 и 2 — поливиниловый карбозол (по рис. 5 и 6); 3 — резина; 4 — маслопропитанная бумага; 5 — полистирол; 6 — ацетатцеллюлоза; 7 — воздух; 8 — полиэтилен; 9 — поливинилкарбозол при 1000 гц.

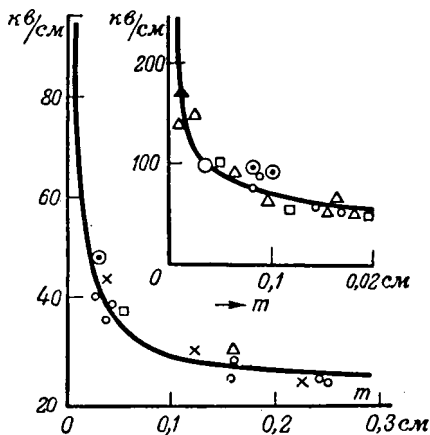


Рис. 8. Средние значения напряженности (действующие значения) вспышки ионизации в газовом пузыре (обозначения опытных точек, см. рис. 7).

ны диэлектрика $b_1 + b_2$. Напряжение гашения оказалось приблизительно на 10% ниже напряжения зажигания. Напряжение зажигания оказалось также практически независимым от рода диэлектрика, как это видно на рис. 7: для обоих типов пузырей — внутри диэлектрика и у электрода, а также для металлических электродов без твердого диэлектрика между ними напряжение зажигания ионизации оказалось приблизительно одинаковым. Напряженность поля зажигания зависит от толщины пузыря (рис. 8).

Зависимость напряжения зажигания (действующее значение) от произведения толщины диэлектрика на давление воздуха подчиняется закону Пашена (рис. 9). Ее можно выразить формулой:

$$U' = 26,5 \cdot p m + 0,55,$$

где U' — в кВ, m — в см, p — в ат.

При частоте 1 000 гц влияние частоты не выявилось, и нельзя было обнаружить заметных различий в напряжениях зажигания при 1 000 и 50 гц.

Во время опытов часто наблюдалось самопогасание ионизации после нескольких минут приложения напряжения. Это явление наблюдалось и другими авторами. Результаты исследований позволяют при известных размерах газового пузыря рассчитать напряжение начала ионизации на диэлектрике и определить предельно допустимые размеры пузырей.

Влияние напряжения начала ионизации на работу диэлектрика [Л. 5]. Образцы из крафт-целлюлозы, пропитанные пентахлордифенилом. При неизменной толщине диэлектрика между обкладками конденсатора напряжение начала ионизации не изменяется при изменении числа слоев бумаги от двух до десяти за счет ее толщины. С увеличением толщины диэлектрика напряженность начала ионизации падает:

Толщина диэлектрика, мкн . . .	25	50	75	100	250	600
Напряженность ионизации, %	100	65	50	45	35	30

Но нельзя применять в конденсаторах очень малую толщину диэлектрика, так как пробивная прочность конденсатора падает с уменьшением толщины диэлектрика. Например, при толщине бумаги 12,5 мкн значения пробивной напряженности в зависимости от толщины диэлектрика составляют:

Толщина диэлектрика, мкн	25	37	50	65	75	100	125
Пробивная напряженность при импульсном воздействии, кВ/мм	—	175	235	—	217	200	—
То же при выпрямленном напряжении, кВ/мм . . .	70	135	200	220	210	195	190

Отмечается, что импульсная прочность и прочность при выпрямленном напряжении дают очень близкие значения. Данные о прочности конденсаторов показывают, что максимум их пробивной напряженности получается при пяти-шести слоях бумаги между обкладками. При этом пробивная напряженность растет с уменьшением толщины листа бумаги. Таким образом, изоляцию конденсатора следует выполнять из возможно тонкой бумаги, по пять-шесть слоев между обкладками, набирая необходимое число последовательных секций. Такой конденсатор будет иметь высокое пробивное напряжение при высоком напряжении начала ионизации. Но так как стоимость бумаги очень быстро растет с уменьшением ее толщины, то предел уменьшению бумаги кладут экономические соображения. Авторы указывают, что для 60 гц выбрана толщина бумаги в 60 ... 90 мкн при пяти слоях.

Влияние плотности бумаги. Для бумаги, пропитанной пентахлордифенилом, увеличение плотности с 0,75 до 1,3 г/см³ снижает напряжение начала ионизации на 15%. Но с другой стороны, уменьшение плотности бумаги вызывает снижение пробивного напряжения и увеличение разброса пробивных напряжений. Характерно также влияние плотности бумаги на величину свободного пространства между станионом и листом бумаги. Величина свободного пространства зависит от степени сжатия. При пропитке это пространство заполняется пентахлордифенилом. Максимум напряжения ионизации получается при 20% пространства. Его изменение от 10 до 30% очень мало сказывается на напряжении начала ионизации (в пределах 2 ... 3%). Уменьшение свободного пространства практически до нуля в случае диэлектрика толщиной в 40 мкн вызывает понижение напряжения начала ионизации на 10% по сравнению с максимальным, соответствующим 20% пространству. При толщине диэлектрика 80 ... 160 мкн напряжение ионизации падает всего на 5%.

Сравнение пропитки пентахлордифенилом и минеральным маслом. Бумага, пропитанная минеральным маслом, имеет в исходном состоянии значительно более высокое напряжение начала ионизации (на 83 ... 96%), чем при пропитке пентахлордифенилом. Но пентахлордифениловый конденсатор значительно более стабилен в экс-

плуатации, чем маслопропитанный. Например, была сделана партия конденсаторов, половина пропитана минеральным маслом и половина пентахлордифенилом. Конденсаторы были поставлены на испытание при 50%-ной перегрузке по напряжению и окружающей температуре, равной максимальной ожидаемой в эксплуатации. Через неделю напряжение начала ионизации маслопропитанных конденсаторов упало до 12...60% от начального. Некоторые из этих значений были ниже испытательного. Спустя еще неделю, эти образцы пробилась, а все маслопропитанные образцы пробилась² в течение 28 дней. Напряжение начала ионизации для конденсаторов пентахлордифениловой пропитки за год эксплуатации не изменилось.

При отрицательных температурах, от -30°C и ниже, пентахлордифенил затвердевает и растрескивается, что снижает напряжение начала ионизации до недопустимых значений. Смесь³ пентахлордифенила и трихлорбензола имеет удовлетворительные характеристики и при -70°C .

Влияние длительности перенапряжения. Для конденсатора с толщиной диэлектрика 70 мкм, пропитанного пентахлордифенилом, определялась предельная длительность однажды приложенного напряжения, еще не вызывающего снижения напряжения начала ионизации, которое определялось немедленно после снятия напряжения:

Длительность воздействия, сек	150	15	2	150
Безопасная кратность перенапряжения	1	1,1	2	3,5

При одной и той же суммарной длительности приложения напряжения двухкратное приложение напряжения безопаснее однократного. Кумулятивное воздействие опасных перенапряжений также вызывает снижение напряжения начала ионизации.

При снижении напряжения начала ионизации на 15% первоначальное его значение восстанавливалось через неделю отдыха. При снижении напряжения начала ионизации на 30...40% напряжение ионизации конденсатора никогда не восстанавливалось.

О величине допустимых перенапряжений для силовых конденсаторов [Л. 6]. Стандарты на силовые конденсаторы не дают указаний о значении допустимых перенапряжений рабочей частоты, если их длительность меньше 5 мин, т. е. меньше длительности приложения испытательного напряжения. Однако в Руководящих указаниях Американского института инженеров-электриков этот вопрос получил известное освещение. Названные Руководящие указания относятся только к силовым конденсаторам на рабочие напряжения

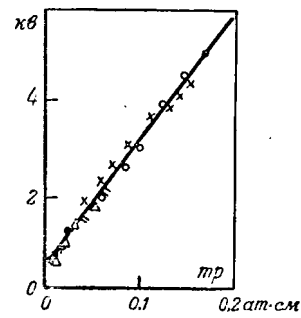


Рис. 9. Напряжение ионизации (действующее значение) в зависимости от $m\rho$ — произведения толщины изоляции и относительной плотности воздуха.

Образцы по рис. 5.

В качестве диэлектрика применен поливинил карбозол ($m = 0,035; 0,021$ и $0,08$ см при различных давлениях; $m = 0,008$ и $0,034$ при различных температурах).

от 1,2 до 6,9 кВ, выполненным по последним американским нормам, и неприменимы к конденсаторам, изготовленным до 1949 г. При синусоидальной форме волны амплитуда перенапряжения 60 гц не должна превосходить шести-, восьмикратного действующего значения номинального напряжения ($\sqrt{2} \cdot 4,8$) — это предельное значение, допустимое при длительности в полпериода. Если напряжение на конденсаторе ограничивается искровым промежутком, то должны быть предусмотрены токоограничивающие устройства для предупреждения опасного значения разрядного тока.

Таблица допустимых перенапряжений составлена в предположении, что за срок службы конденсатора произойдет не более 200...300 воздействий перенапряжения длительностью от 1 мин и меньше; число перенапряжений, превосходящих 1 мин, может быть больше. Предполагается, что перенапряжения происходят со столь значительными перерывами, которые позволяют диэлектрической прочности восстановиться, что исключает кумулятивный эффект. Указывается, что данные о допустимых перенапряжениях выбраны с известной осторожностью и что по мере получения дальнейших сведений о прочности конденсаторов они будут уточнены в сторону их повышения. Руководящие указания дают следующие значения допустимых перенапряжений 60 гц:

Длительность, гц	Кратность по отношению к номинальному напряжению	Длительность	Кратность по отношению к номинальному напряжению
0,5	4,8	1 сек	2,2
1	4,2	15 сек	1,8
6	3,05	1 мин	1,7
15	2,6	5 мин	1,55

В дискуссии имеются указания со ссылкой на опыт эксплуатации конденсаторов в большой системе, что эти рекомендации слишком осторожны и некоторое повышение нормированных допустимых перенапряжений необходимо по экономическим соображениям. Так как конденсаторы снабжены предохранителями, то не следует опасаться пробоя отдельных конденсаторов. В этой системе были произведены опыты с приложением в течение 13 гц 3,2-кратного перенапряжения к 15 конденсаторам трех различных фирм, после

² Правильно спроектированный маслопропитанный конденсатор может надежно работать [Л. 1, 2].

³ Подобная совтолу.

Пленкоэлектрокартон — новый электроизоляционный материал

Инж. Я. Л. ШУГАЛ и инж. С. И. СМЕРНОВА

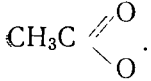
Москва

В электродвигателях с изоляцией класса А для изоляции обмотки относительно корпуса применяют лакоткань, располагаемую между двумя слоями электрокартона. Наличие трех слоев изоляции в пазу служит причиной образования дополнительных воздушных прослоек между обмоткой и пакетом статора, которые приводят к ухудшению теплопроводности и влагостойкости изоляции.

Стремление повысить теплостойкость и влагостойкость пазовой изоляции привело к созданию однослойного составного материала, состоящего из электрокартона, оклеенного пленкой, полученной на базе синтетических смол или сложных эфиров целлюлозы. Этот составной материал называется пленкоэлектрокартон.

Исходные материалы. Из сложных эфиров целлюлозы наиболее проверенной является пленка из триацетата целлюлозы.

Триацетат целлюлозы представляет собой продукт полного замещения гидроксильных групп целлюлозы на остатки уксусной кислоты, так называемые ацетильные радикалы:



Эмпирическая формула триацетата целлюлозы: $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OCOCN}_3)_3$. Триацетат целлюлозы получается взаимодействием линтера с уксусным ангидридом в присутствии катализатора.

Одно из ценнейших качеств триацетатной пленки — это ее высокая теплостойкость (рис. 1).

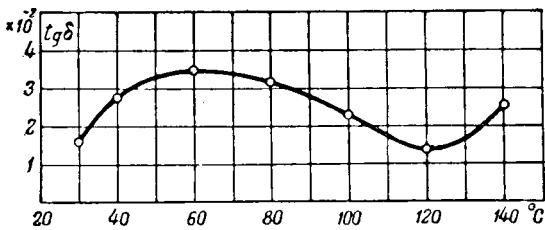


Рис. 1. $\text{tg } \delta$ триацетатной пленки в зависимости от температуры (50 гц).

чего напряжение снижалось до нормального на 2,75 мин, затем опыт повторялся. Подобное воздействие было повторено 500 раз без признаков повреждения. Некоторые из испытанных конденсаторов оставлены в эксплуатации и удовлетворительно работают. Полученная точка допустимого значения перенапряжения лежит значительно выше кривой, соответствующей Руководящим указаниям.

Литература

1. В. М. Файницкий. Осциллографирование токов в изоляции. Электричество, № 4, 1952.
2. Г. С. Кучинский, В. Т. Ренне и В. М. Файни-

При длительной (до 10 суток) выдержке триацетатной пленки в воде электрическая прочность ее снижается незначительно, как это видно из рис. 2, на котором приведена зависимость электрической прочности пленок от длительности выдержки их в воде.

В табл. 1 приведены данные по физическим и электрическим свойствам слабопластифицированных пленок из триацетата целлюлозы, полученные на основе испытаний.

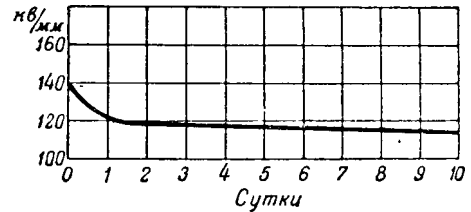


Рис. 2. Электрическая прочность триацетатной пленки толщиной 0,07 мм в зависимости от времени выдержки в воде.

В качестве подложки для изготовления пленкокартона наиболее удовлетворяет требованиям производства электрокартон марки ЭВП, изготовленный из небеленой сульфатной целлюлозы с добавкой хлопчатобумажной массы в количестве 25 ... 40%. Добавка сообщает картону эластичность и стойкость к деформациям.

Лак, применяемый для склейки пленки с картоном, должен иметь хорошие диэлектрические характеристики, сохранять длительное время эластичность. Лаковая пленка не должна стареть в процессе хранения пленкоэлектрокартона и сильно размягчаться при повышении температуры. Триацетатная пленка не должна отставать от картона при штамповке пазовых коробочек и при нагревании в продолжение 24 час при температуре 120°С.

Из известных лаков лучше всех удовлетворяют указанным требованиям лаки типа полиакрилата или смеси масляноглифталевых и триэтилглицольфталевых. Лаки применяются 75 ...

кий. Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов. Электричество, № 6, 1954.

3. J. R. Nye, W. R. Wilson. Физическая природа ионизации в конденсаторах. AIEE Transactions, т. 72, ч. III, стр. 781, 1953.

4. H. C. Holl, R. M. Russek. Возникновение и гашение разрядов в газовых пузырьках. The Proceedings of IEE, т. 101, ч. II, стр. 47, февраль 1954.

5. R. J. Hopkins, T. R. Walters, M. E. Scoville. Измерение ионизации в диэлектрике и исследование ее влияния на работу изоляции конденсатора. AIEE Transactions, т. 70, ч. II стр. 1643, 1951.

6. Руководящие указания по допустимым кратковременным перенапряжениям промышленной частоты (60 гц) для силовых конденсаторов. Доклад комитета AIEE. AIEE Transactions, т. 71, ч. III, стр. 493, 1952.

[15.11. 1954]



Таблица 1

Физические и электрические свойства слабопластифицированных пленок из триацетата целлюлозы

Толщина, мм	0,05	0,07
Предел прочности при разрыве, кг/мм ² :		
в состоянии поставки	9,8... 10,7	10... 11,2
после 48-час выдержки при 140° С	9,1... 10,1	11... 11,5
Удлинение (%):		
в состоянии поставки	11,6... 12,5	10,6... 13,4
после 48-час выдержки при 140° С	7,4... 9,9	6,3... 7,1
Число двойных перегибов:		
в состоянии поставки	600... 700	345... 530
после 48-час выдержки при 140° С	550... 720	277... 554
Потери в весе после 168-час выдержки при 140° С, не более %	9	9,5
Усадка поверхности:		
после 168-час выдержки при 140° С, не более %	12,5	8,8
Напряжение пробоя, кв:		
в состоянии поставки	3,5... 6,5	9,9
после 48-час выдержки при 140° С	3,5... 6,5	9,6
после 48-час выдержки в воде	3,0... 7,1	8,3
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см 10 ¹⁴ :		
в состоянии поставки	1,5... .	8,1
после 48-час выдержки при 140° С	1,5	8,1
после 48-час выдержки в воде	1,1	2,5

ки, сушке лакированной подложки в сушилке камерного типа и склейке триацетатной пленки с подложкой. Агрегат состоит из самостоятельных узлов, смонтированных в технологической последовательности, образуя, таким образом, процесс непрерывного производства (комбинированного конвейера).

Склейка пленки с рольным картоном производится следующим образом (рис. 3).

Рулон с электрокартоном 13 устанавливается на отпуском механизме и свободный конец рулона протягивается через направляющий валик 14 и перевальный вал 3 в сушильную камеру 5. По выходе из сушильной камеры картон проходит нижний ведущий вал 17, передний вал 18, затем наматывается на гильзу 12, установленную на приемном механизме. Включают мотор. На движущийся картон в момент, когда он проходит вал 3, наливают порцию лака. Количество нанесенного на картон лака регулируют при помощи ножа (ракля) 2, планкой подъема картона 4 и угловыми ограничителями, установленными с двух сторон у вала 3. Обогрев сушильной камеры осуществляется паровыми плитами 15. Температура в сушильной камере 5 поддерживается порядка 70... 80° С.

Скорость движения картона зависит от длины сушильной камеры и контролируется по степени подсушки лаковой пленки, которая подсушивается только до отлипа.

По выходе лакированного картона из сушильной камеры 5 на его лакированную поверхность накладывают свободный конец от рулона 8 триацетатной пленки, установленной на кронштейне. При помощи регулировочных винтов 9 сближают валы 16 и 18 настолько, насколько это требуется, чтобы получить качественную склейку триацетатной пленки с картоном. Неровности и воздушные пузыри выравниваются и устраняются при помощи укаточного вала 10.

Пленкоэлектрокартон. Пленкоэлектрокартон изготавливают двух марок: марка О — односторон-

80% концентрации, что способствует устранению коробления картона, вызываемому избытком растворителя, сокращению длительности сушки лакового слоя, уменьшению вредности при работе, обусловленной применением токсических растворителей.

Склеивание пленки с картоном производится на машине, разработанной Я. Г. Шугалом и И. И. Лебедевым (рис. 3).

Машина представляет собой агрегат, в котором совмещены операции по лакировке подлож-

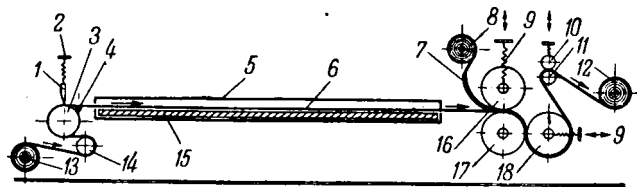


Рис. 3. Схема машины для наклейки триацетатной пленки на картон, хлопчатобумажную ткань и стеклоткань.

1 — нож ракля; 2 — винт регулировочный; 3 — перевальный вал; 4 — планка для угла подъема картона; 5 — сушильная камера; 6 — картон; 7 — ширинная дуга; 8 — рулон триацетатной пленки; 9 — регулировочные винты; 10 — укаточный резиновый вал верхний; 11 — укаточный вал нижний; 12 — гильза с рулоном готовой продукции; 13 — рулон подложки (картон); 14 — направляющий валик; 15 — паровая плита; 16 — верхний вал с электрообогревом; 17 — нижний ведущий вал с электрообогревом; 18 — передний вал с электрообогревом.

Таблица 2

Свойства пленкоэлектрокартона

Толщина, мм	0,16	0,2	0,3	0,48	0,5
Пробивное напряжение, кв:					
в состоянии поставки	7,7	8,3	11	10,3	12,5
после 48-час выдержки в среде 95% относительной влажности	5,4	4,2	9	9,7	6,1
после перегиба	5,7	6,3	10	—	—
Удельное объемное сопротивление, (Ом·см·10 ¹³):					
в состоянии поставки после 48-час пребывания в среде 95% относительной влажности	9,4	1,3	10	0,58	0,014
	0,66	0,73	0,029	2,5·10 ⁻³	

Опыт применения способа самосинхронизации генераторов на гидростанции

Инж. Л. М. ИВАНОВ и инж. Ю. А. ФРЕЙМАН

На одной гидроэлектростанции установлены два вертикальных гидрогенератора, мощность каждого из них равна 17,5 тыс. *кв*а, напряжение — 10,5 *кв*, скорость вращения — 150 *об/мин*, ток статора — 970 *а*. Обмотка статора не компаундированная, с двумя параллельными ветвями. Ротор с явновыраженными полюсами из наборного железа, без успокоительных обмоток. Маховой момент ротора 1200 *тм*². Генераторы снабжены устройством компаундирования и электромагнитным корректором, постоянно включенными в действие.

Связь гидроэлектростанции с системой осуществлена через повысительный трансформатор мощностью $3 \times 10,5$ тыс. *кв*д и линию протяженностью 15 *км*. По условиям работы станции число включений и отключений гидрогенераторов доходит до 10 в сутки.

Метод самосинхронизации стал применяться на гидроэлектростанции с 1951 г. и зарекомендовал себя настолько хорошо, что в 1954 г. устройство для точной синхронизации было демонтировано. Процесс самосинхронизации генераторов, так же как и другие процессы, автоматизирован. Включение генераторов по методу самосинхронизации производится при помощи реле ИРЧ-1 ЦНИЭЛ по сниженной характеристике регулятора скорости.

За время эксплуатации генераторы включались по методу самосинхронизации по 3400 раз каждый (1951 г. — 361 раз; 1952 г. — 1200 раз; 1953 г. — 1213 раз; 1954 г. — 615 раз).

Как показывают осциллограммы испытаний, в первый момент после включения по методу са-

мосинхронизации периодическая составляющая тока статора превышает $2,5 I_{ном}$, а посадка напряжения (при отключенном втором гидрогенераторе) — 18%. При скольжении $s = 5\%$ генератор втягивается в синхронизм в течение $0,56 \dots 2$ *сек*.

При отключенном устройстве автоматической самосинхронизации дежурный добивается того, чтобы скорость вращения генератора по тахометру была близкой к скорости, соответствующей частоте сети. Добившись этого, он производит включение от руки (ключами управления) сначала выключателя, а затем автомата гашения поля генератора. Не было ни одного случая, чтобы при такой синхронизации генератор не втягивался в синхронизм.

При автоматической самосинхронизации наблюдались случаи, когда генератор не втягивался в синхронизм. Эти случаи имели место при чрезмерно быстром нарастании скорости вращения генератора. Реле подавало импульс на включение выключателя, но скорость вращения в момент включения была уже значительно выше синхронной. В таких случаях дежурному персоналу приходилось отключать генератор от сети, так как возникали глубокие колебания тока и напряжения генератора.

На станции применено устройство автоматического повторного включения с самосинхронизацией генераторов, которое пускается от защиты линии 110 *кв* и от защиты от повышения напряжения генераторов при сбросе нагрузки. В сентябре 1954 г. устройство было подвергнуто испытаниям. После сброса нагрузки с линии 110 *кв* и отключения генераторов их обратное включение про-

не склеенный картон толщиной 0,16, 0,2 и 0,3 *мм*; марка Д — двусторонне оклеенный картон толщиной 0,48 и 0,5 *мм*.

Для изготовления пленкоэлектрокартона марки О используют картон толщиной 0,10 ... 0,2 *мм* и триацетатную пленку толщиной 0,04 ... 0,07 *мм*, в зависимости от толщины пленкоэлектрокартона. Для изготовления пленкокартона марки Д применяют два слоя картона толщиной 0,2 *мм* и пленку толщиной 0,04 или 0,07 *мм* в зависимости от заданной толщины пленкоэлектрокартона. Свойства пленкоэлектрокартона по данным испытаний приведены в табл. 2.

После 24-час выдержки при температуре 120° С пленка не должна сползать с картона более чем на 5 *мм* и на поверхности не должны появляться вздутия и пузыри. При перегибе пленка

не должна отслаиваться в месте сгиба более чем на 5 *мм*.

По данным исследования НИИ МЭП электродвигатели с изоляцией из пленкоэлектрокартона имеют более высокое сопротивление изоляции в атмосфере с 95% относительной влажностью и при повышенной температуре 125° С, чем электродвигатели с обычной изоляцией из лакоткани и картона. Электрическая прочность электродвигателей с изоляцией из пленкоэлектрокартона на 40% выше, чем электродвигателей с нормальной изоляцией. Применение пазовой изоляции из пленкоэлектрокартона исключает необходимость использования более дорогих материалов, как лакошелк и лакоткань, изготавливаемых из шелковой и хлопчатобумажной ткани и растительных масел.

[24. 6. 1954]

шло через 25 сек, а полный набор нагрузки через 55 сек.

В 1954 г. на станции смонтировано устройство частотного автоматического пуска генераторов, которое при частоте, равной 49 *Гц*, осуществляет одновременный пуск генераторов, самосинхронизацию и включение их в сеть, а также набор максимальной нагрузки. Время от пуска до полного набора нагрузки составляет 45 сек.

Результаты испытаний устройств автоматического повторного включения с самосинхронизацией и частотного автоматического пуска показывают, насколько велика оперативность ввода мощности в системе в аварийных условиях. Снижение напряжения на шинах 10 *кВ* при этом весьма незначительно. Даже при почти одновременном включении генераторов оно не превышает 0,20 ... 0,25 номинального. Максимальный ток линии 110 *кВ* при включении генераторов не более 200 *а*.

Не сказывается ли отрицательно столь частое включение генераторов методом самосинхронизации на их состоянии, на надежности их работы? Ответом на этот вопрос может послужить, по нашему мнению, характеристика состояния генераторов в настоящее время, т. е. после 3 лет применения способа самосинхронизации.

В нормальном режиме генераторы работают с проточным циклом охлаждения; температура входящего воздуха колеблется от +5 до +30° С, а максимально наблюдаемая температура меди обмотки статора — от 85 до 100° С.

Изоляция нижних лобовых частей обмотки пропитана турбинным маслом, так как до 1953 г. на них попадало турбинное масло из верхней масляной ванны и из тормозных колодок. В настоящее время попадание масла на обмотку почти исключено. Произведено покрытие обмоток изоляционным лаком.

За время с 1951 г. были следующие повреждения обмоток.

Во время капитального ремонта в 1953 г. при профилактических испытаниях переменным током была пробита изоляция между фазами Ж и К верхних лобовых частей обмотки статора гене-

ратора № 1. Пробой произошел вследствие нагрева дефектных паяк и имевшего место при этом обугливания изоляции.

Во время капитального ремонта генератора № 2 в 1953 г. при профилактических испытаниях переменным током была пробита изоляция между фазами Ж и К на соединительных дугах верхних лобовых частей. Пробой произошел вследствие того, что при монтаже были неудовлетворительно изолированы соединительные дуги. Дефект своевременно не был обнаружен потому, что после монтажа испытания производились напряжением 1,3 $U_{ном}$, а в 1953 г. — 1,5 $U_{ном}$.

Во время капитального ремонта генератора № 2 в марте 1954 г. при профилактических испытаниях выпрямленным током напряжением 2 $U_{ном}$ произошел прожог изоляции фазы Ж в пазовой части секции обмотки статора примерно в 15 ... 20 *мм* от выхода из паза. Секция была отключена от обмотки и в июле 1954 г. заменена. Причиной прожога, как предполагается, послужило некачественное изготовление секции.

Механических повреждений обмоток за период эксплуатации с 1951 г. не наблюдалось.

Тщательный осмотр испытания и замеры во время капитального ремонта с выемкой ротора и с заменой секций в 1953 и 1954 гг. показали вполне удовлетворительное состояние обмоток генераторов. Крепление лобовых частей и пазовых клиньев совершенно не нарушено.

До 1952 г. в цепях генераторов были установлены выключатели типа ВМГ-133 с номинальным током 1 000 *а*. Опыт эксплуатации этих выключателей до и после внедрения самосинхронизации показал, что их конструкция ненадежна и что в тех случаях, когда требуется большое количество включений и отключений их применять не следует. Ремонты выключателей ВМГ-133 приходилось производить каждые 2 ... 3 мес. После замены выключателей ВМГ-133 выключателями МГГ-10 с номинальным током 2 000 *а* ремонты с заменой свечей и зачисткой или заменой ламелей розеточных контактов производятся 2 раза в год.

[26.11.1954]

Упрощение и реконструкция схемы синхронных электродвигателей

Кандидат техн. наук О. В. СУСЛОВ, инж. С. М. ФИЛИН

г. Ярославль

Эксплуатационным циркуляром № Э-5/54 Технического управления МЭС рекомендуется максимально упрощать схемы пуска и защиты асинхронных и синхронных электродвигателей. Ниже приводится упрощенная схема управления и защиты синхронного электродвигателя типа СМВ 19А7-16, 6 *кВ*, 1 200 *кВт*, $I_c = 155$ *а*, $I_p = 230$ *а*, 375 *об/мин*, изготовленного заводом

«Электросила» в 1935 г. Электродвигатель предназначен для привода одного из трех циркуляционных насосов вертикального исполнения типа ВН-32, производительностью 9 000 *м³* в час при полном напоре 35 *м вод. ст.* Возбудитель типа В-44/21-6, 115 *в*, 32 *кВт*, $I_a = 278$ *а* жестко насажен на вал ротора электродвигателя. Обмотка статора выполнена двухслойной, корзиночного

типа, с непрерывной изоляцией микалентой. Ка-тушки в лобовых частях прикреплены (бандажи-рованы) к кольцам во избежание их перемеще-ний при коротких замыканиях. Пусковая обмотка ротора выполнена из латунных стержней диаме-тром 18 мм, по семь стержней на полюс. Пайка стержней осуществлена серебряным припоем.

Электродвигатель питается от шин генератор-ного напряжения 6,3 кв через реактор типа РБ-6—200—5%, установленный для ограничения токов короткого замыкания. Проектом предусматривался пуск электродвигателя через специаль-ный пусковой реактор с обмоткой ротора, зако-роченной на пусковое сопротивление 3,5 ом, при отключенном возбуждате. Пуск осуществлялся с постоянно установленными сопротивлениями магнитного регулятора 1 ом (сопротивление ро-тора 0,298 ом) и реостата возбуждения 16 ом (сопротивление шунтовой обмотки возбуждения возбуждателя 10,5 ом), соответствующими нор-мальному режиму работы электродвигателя.

При скольжении 3...5% после включения вы-ключателя, шунтирующего пусковой реактор, по-давалось полное напряжение 115 в на обмотку ротора. Пуск производился только при закрытой задвижке на нагнетательной линии водовода.

По проектной схеме предусматривались сле-дующие виды защит электродвигателя:

1) от перегрузки — тепловые реле типа ТТ-20 с действием на отключение (впоследствии эта защита была переведена на сигнал вследствие ее ложной работы);

2) от понижения напряжения — реле типа ИН-32 с зависимой характеристикой, впослед-ствии заглубленной до 5 сек при напряжении, рав-ном нулю;

3) от обрыва поля — с током трогания 10 а, током возврата 60 а и выдержкой времени поряд-ка 1 сек;

4) от межфазных коротких замыканий — ма-ксимальная защита, действующая на отключение выключателя в распределительном устройстве у шин генераторного напряжения, с током трогания 800 а и временем 1,5 сек.

Вместе с аппаратурой автоматики пуска в схе-ме насчитывалось 15 реле и магнитный контактор (АГП), подающий постоянный ток в обмотку ро-тора. В числе указанных реле находилось два весьма сложных моторных реле времени типа СВ-11.

В 1950 г. авторами настоящей статьи были проведены опыты по пуску электродвигателя с обмоткой ротора, постоянно подключенной к возбуждателю. Опыты дали вполне удовлетвори-тельные результаты, после чего все электродвига-тели были переведены на упрощенную схему пуска с жестко подключенным к обмотке ротора возбуждателем. За период четырехлетней эксплуа-тации никаких ненормальностей в работе элект-родвигателей не наблюдалось. Опыты, проведен-ные в 1954 г., были направлены на дальнейшее упрощение схемы — пуск электродвигателя без реактора и при открытой задвижке на нагнета-тельной линии водовода.

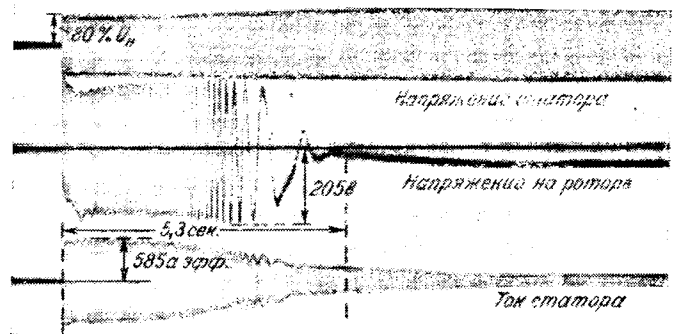


Рис. 1. Пуск синхронного электродвигателя без реактора с открытой задвижкой и форсировкой.
 $R_{ш} = 0$; $R_{м} = 1$ ом.

Пуск с открытой задвижкой повышает эффек-тивность (быстродействие) АВР и упрощает его схему, так как в этом случае не требуется предва-рительного открытия задвижки. Было проведено 12 опытов включения электродвигателя — восемь с открытой задвижкой и четыре с закрытой. Электродвигатель втягивался в синхронизм за время не более 10 сек. Он включался на общий водовод параллельно с двумя другими работаю-щими насосами. Наиболее интересными были опыты пуска с открытой задвижкой при отсут-ствии реактора.

На осциллограмме рис. 1 записан пуск элек-тродвигателя при нормальном значении сопротив-ления магнитного регулятора в 1 ом и наличии форсировки возбуждения; время пуска (нестацио-нарный процесс) составило 5...6 сек.

На осциллограмме рис. 2 записан пуск элек-тродвигателя при нормальном значении сопротив-ления магнитного регулятора и отсутствие фор-сировки возбуждения. В этом случае пуск затяги-вается до 10 сек вследствие медленного нараста-ния возбуждения.

На осциллограмме рис. 3 приведен пуск элек-тродвигателя при пониженном значении сопротив-ления магнитного регулятора 0,7 ом и наличии форсировки возбуждения. Здесь наблюдается не-которое увеличение длительности пуска, вызван-ное уменьшением сопротивления магнитного ре-гулятора. Переменная составляющая напряжения

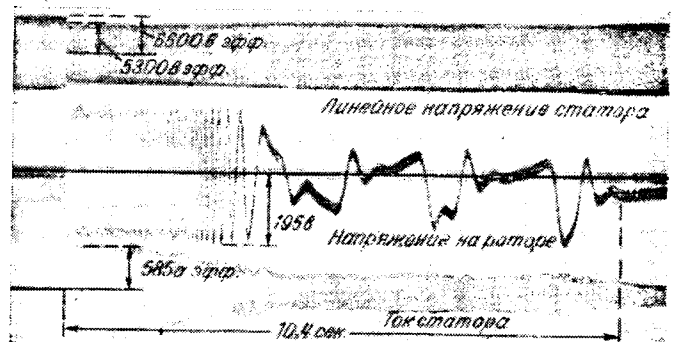


Рис. 2. Пуск синхронного электродвигателя без реактора с открытой задвижкой, без форсировки.
 $R_{ш} = 16$ ом; $R_{м} = 1$ ом.

на кольцах ротора в этом случае значительно меньше, чем при нормальном значении сопротивления магнитного регулятора.

Пуск двигателя при отсутствии реактора и закрытой задвижке, произведенный при аналогичных условиях, дает примерно такую же картину, как и пуск с открытой задвижкой при наличии форсировки возбуждения.

Для сопоставления на рис. 4 приведены осциллограммы пуска двигателя по старой схеме, т. е. при наличии реактора и закрытой задвижке. Из осциллограммы видно, что продолжительность пуска в этом случае составляет около 10 сек. Втягивание двигателя в синхронизм происходит значительно раньше включения выключателя, шунтирующего реактор. По заводской настройке

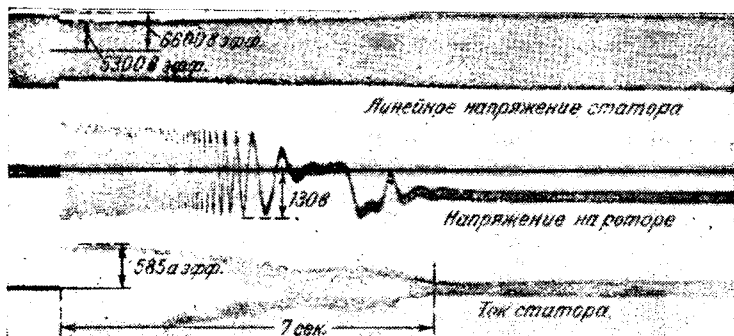


Рис. 3. Пуск синхронного электродвигателя без реактора с открытой задвижкой и форсировкой.

$R_{ш} = 0$; $R_{м} = 0,7 \text{ ом}$.

шунтирование реактора осуществляется только через 25 сек.

Все опыты по пуску производились с сопротивлениями магнитного регулятора и реостата возбуждения возбудителя, соответствующими нормальному рабочему режиму электродвигателя (при наличии форсировки возбуждения реостат возбуждения возбудителя закорачивается), исходя из тех соображений, что включение от АВР и самозапуск электродвигателя после понижения напряжения будут производиться при тех же условиях.

Освободиться от магнитного регулятора для данной конструкции возбудителя без принятия специальных мер не представляется возможным, так как без магнитного регулятора возбудитель работает на прямолинейной части характеристики, т. е. неустойчиво.

Изменение активной мощности, потребляемой двигателем при пуске, наблюдалось по щитовому прибору.

В начальный момент при пуске с закрытой задвижкой мощность доходила до 2 мвт и затем резко снижалась до 0,6 мвт, оставаясь постоянной до открытия задвижки.

При пуске же с открытой задвижкой в начальный момент мощность доходила также до 2 мвт, а затем снижалась до 0,95 мвт.

Помимо опытов по пуску электродвигателя, производились опыты и по его останову при закрытой задвижке.

Во время останова электродвигателя снималась осциллограмма выбега и гашения поля при разных значениях сопротивления в цепи обмотки возбуждения возбудителя, вводимого блок-контактами выключателя (сопротивление магнитного регулятора в этих опытах было нормальным, т. е. 1 ом).

Время выбега электродвигателя до полного останова составило 100 сек.

При добавочном сопротивлении 156 ом в цепи обмотки возбуждения возбудителя поле гасится до 50% за время 0,72 сек; при сопротивлении 66 ом это же время составило 0,94 сек; при сопротивлении 16 ом (только реостат возбуждения) — 2,7 сек; при отсутствии сопротивления в цепи обмотки возбудителя (режим форсировки возбуждения) — 4 сек.

В качестве добавочного сопротивления для гашения поля в цепи возбуждения возбудителя установлено сопротивление в 50 ом.

Процесс гашения поля при этом сопротивлении иллюстрирует осциллограмма рис. 5.

На основании произведенных испытаний принята схема защиты и автоматики, показанная на рис. 6.

В этой схеме для защиты от междофазных коротких замыканий в двигателе выбрана максимально токовая отсечка в двухфазном исполнении с током трогания 1 200 а, что соответствует 200% от пускового

тока электродвигателя. Защита от обрыва поля с током трогания 10 а, током возврата 60 а и временем действия 1 сек оставлена без изменения. На реле форсировки 1 (рис. 6) уставка выполнена по циркуляру — 0,85 $U_{н}$. Для форсировки установлено одно реле типа ЭН, так как длительная форсировка в случае перегорания предохранителей не опасна и в этом случае действует звуковой сигнал.

Реле форсировки одновременно служит для контроля наличия напряжения на шинах резервного насоса в схеме АВР.

Специальная защита от асинхронного хода не предусматривалась, так как питание синхронных электродвигателей осуществляется непосредствен-

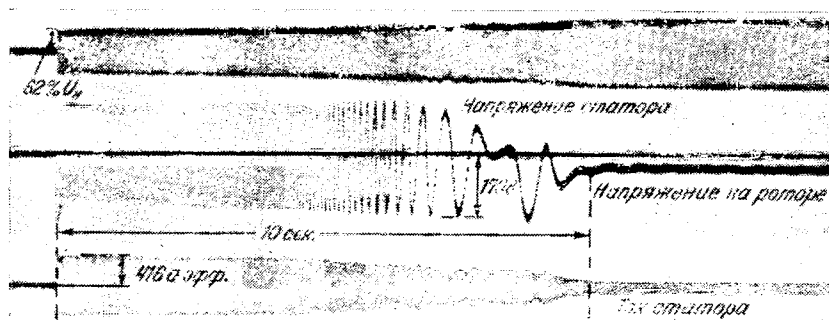


Рис. 4. Пуск синхронного электродвигателя по старой схеме с реактором и закрытой задвижкой.

$R_{ш} = 16 \text{ ом}$; $R_{м} = 1 \text{ ом}$.

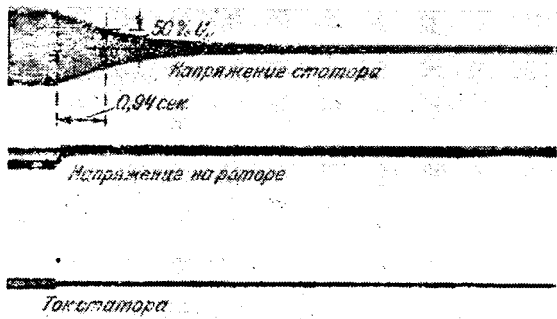


Рис. 5. Останов синхронного электродвигателя с закрытой задвижкой.
 $R_{ш} = (16 + 50) \text{ ом}; R_M = 1 \text{ ом}.$

но от шин генераторного напряжения. Самозапуск осуществляется без специальной схемы ресинхронизации, и работа возбудителей, расположенных на одном валу, является весьма надежной.

Защита поля от обрыва, которая одновременно служит для отключения двигателя при длительном исчезновении напряжения, сохранена, учитывая, что при кратковременных понижениях напряжения она не работает, что подтверждается опытом эксплуатации.

Указанное объясняется двумя обстоятельствами: сравнительно медленным спаданием возбуждения двигателя при понижениях напряжения в сети, а также малой чувствительностью реле обрыва поля 5 (рис. 6) и наличием в нем выдержки времени.

Как показал опыт, в случае отключения двигателя без гашения поля спадание тока ротора до 50% от начального значения происходит за время 4 сек.

При посадке напряжения в сети вследствие короткого замыкания ток возбуждения будет даже больше, чем в указанном опыте, за счет тока, индуктируемого в роторе периодической составляющей тока статора, и потому реле 5 в этом случае работать не будет.

В результате принятой схемы защиты и автоматики (рис. 6) из старой схемы было изъято девять реле. При этом произведена замена реле понижения напряжения ИН-32 на реле ЭН-528/160 для ускорения форсировки возбуждения при понижениях напряжения в сети и добавлено два токовых реле отсечки.

Остальная аппаратура, предусмотренная проектной схемой, сохраняется без изменения. На схеме рис. 6 положение контактов реле соответствует нахождению двигателя в работе. Как видно из схемы, форсировка напряжения при пуске электродвигателя обеспечивается при помощи реле 6 от реле времени 4, а при понижении напряжения в сети — от реле 1 и 2.

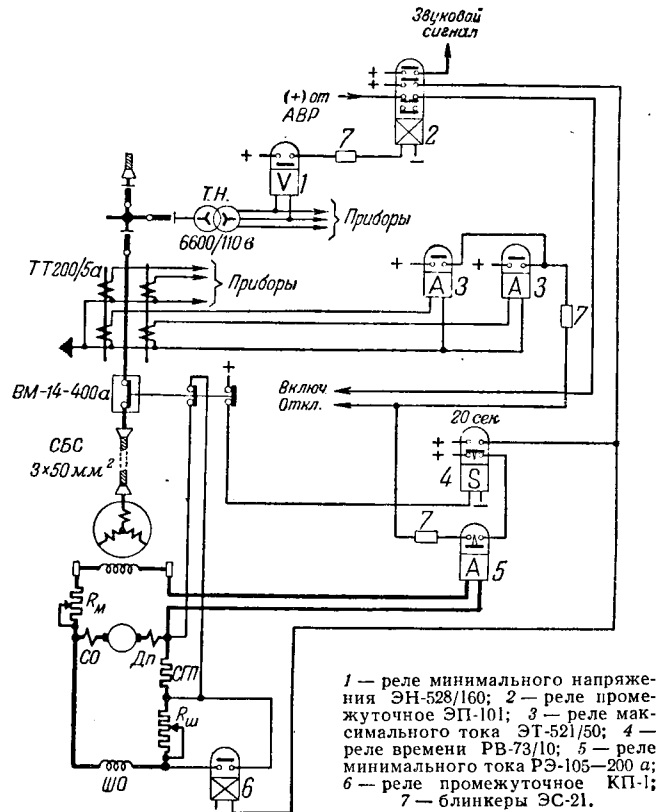


Рис. 6. Схема защиты и управления синхронного двигателя 1200 квт, 6 кв, 375 об/мин.

Реле времени 4 имеет выдержку времени, превышающую максимальное время пуска. При пуске электродвигателя оно, кроме подачи форсировки, блокирует реле обрыва поля 5, которое в противном случае, не дало бы возможности включить выключатель.

Выводы. Синхронные электродвигатели описанной конструкции, служащие для привода циркуляционных насосов, должны иметь прямой безреакторный пуск от полного напряжения сети с непосредственным (жестким) подключением возбудителя к ротору двигателя и с открытой задвижкой (при наличии на водоводе обратного клапана).

Указанное радикально упрощает схему управления электродвигателя и повышает эффективность АВР.

При пуске должна осуществляться форсировка возбуждения посредством закорачивания шунтового реостата в цепи возбуждения возбудителя.

Гашение поля двигателя должно производиться введением сопротивления в цепь возбуждения возбудителя путем его дешунтирования блокшайбой выключателя при отключении последнего.

[28.12.1954]

Передвижные электростанции типов САЭ-200 и Э-14

Кандидат техн. наук Г. С. ЛОПОЯН

Московский электромеханический завод Министерства нефтяной промышленности и Ликинский машиностроительный завод Министерства лесной промышленности освоили и выпустили образцы передвижных электростанций типов САЭ-200 и Э-14. Электростанции изготовлены на базе однотипных двигателей В2-300 и 1Д12 мощностью

обеим сторонам каркаса размещены водяные и масляные радиаторы 5. Во время работы агрегата дверки каркаса герметически закрываются. Это обеспечивает полное прохождение через радиаторы необходимого количества воздуха, засасываемого центробежным вентилятором, установленным на конце вала двигателя в специальном кожухе 6. Двигатель и центробежный вентилятор представляют собой самостоятельный узел — силовой агрегат. При окончательной сборке электростанции агрегат устанавливается на основную раму электростанции 4, изготовленную из швеллеров № 25. После окончательной регулировки на раме положения силового агрегата и генератора производятся соединения вала двигателя с валом генератора.

На рис. 2 показан общий вид электростанции Э-14, изготовленной Ликинским машиностроительным заводом. Двигатель 1Д12 устанавливается непосредственно на специальной раме 3, изготовленной из швеллеров № 25. В отличие от передвижной электростанции САЭ-200 у электростанции Э-14 водяные и масляные радиаторы типа С-80 устанавливаются на передней части двигателя со стороны воздухораспределителя. От двигателя 1Д12 двигатель В2-300 отличается наличием специального привода вентилятора со стороны воздухораспределителя, в то время, когда двигатель В2-300 снабжен центробежным вентилятором, который установлен на противоположном конце коленчатого вала.

Габаритные размеры и весовые данные:

Электростанция	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Вес, кг
САЭ-200	4 120	1 550	2 100	5 200
Э-14	4 220	1 440	1 780	5 200

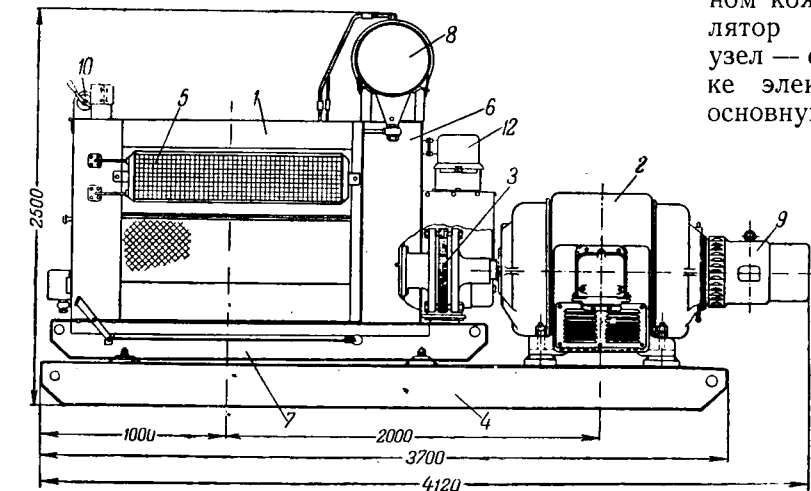


Рис 1. Передвижная электростанция типа САЭ-200.

1 — каркас силовой установки с двигателем В2-300; 2 — генератор типа Сд-128/4; 3 — муфта соединительная эластичная; 4 — рама основная; 5 — радиаторы водяные и масляные; 6 — специальный кожух центробежного вентилятора; 7 — рама стального каркаса силовой установки; 8 — бак топливный; 9 — возбуждатель; 10 — сектор для регулировки подачи топлива к двигателю.

по 300 л. с. и генератора переменного тока типа Сд-128/4 мощностью 200 квт (250 ква).

Передвижные электростанции являются комплексными силовыми агрегатами и предназначаются для питания силовых и световых нагрузок промышленных новостроящихся предприятий и объектов лесоразработок, не имеющих стационарного источника питания электроэнергией от электроснабжающих систем.

На рис. 1 показан общий вид электростанции САЭ-200, изготовленной Московским электромеханическим заводом. Двигатель В2-300 монтируется на раме 7 из швеллеров № 20. Установленный на раме двигатель закрывается специальным каркасом 1, изготовленным из листовой стали. По

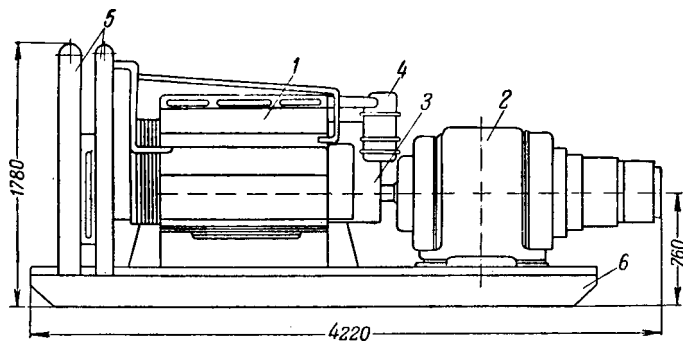


Рис. 2. Передвижная электростанция типа Э-14.

1 — двигатель 1Д12; 2 — генератор типа Сд-128/4 с возбуждителем; 3 — муфта соединительная; 4 — воздухоочиститель; 5 — радиаторы водяные и масляные; 6 — рама дизель-генератора.

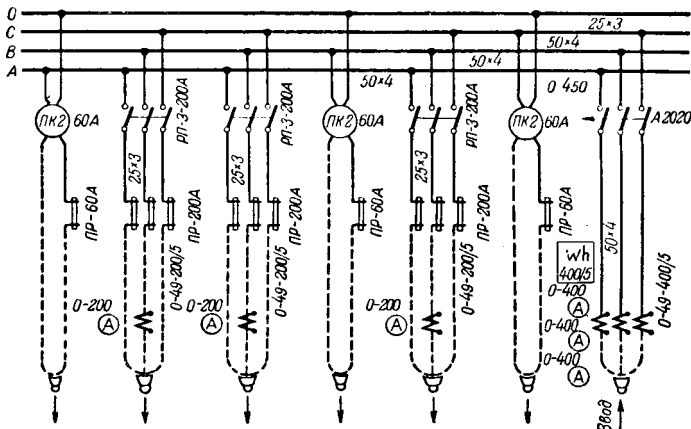


Рис. 3. Электрическая схема передвижной электростанции САЭ-200.



Шестьдесят лет радио

1895—1955

Исполнилось 60 лет изобретения Александром Степановичем Поповым радио. Это событие относится к числу величайших мировых завоеваний человечества. Россия стала колыбелью радиотехники. Имя А. С. Попова — русского ученого и изобретателя, первого практически завершившего большой этап исследований и экспериментов, над которыми трудились в течение второй половины XIX в. выдающиеся физики многих стран, — сохранится в веках.

7 мая 1895 г., выступая в Петербурге с докладом на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества, А. С. Попов показал присутствовавшему действительному сконструированному им радиоприемнику и пояснил, что данный прибор после некоторого видоизменения схемы сможет служить также для передачи сигналов без проводов. 7 мая стало Днем радио.

В январе 1896 г. А. С. Попов опубликовал в Журнале Русского физ.-хим. общества описание своего прибора. 24 марта 1896 г. А. С. Попов совместно с П. Н. Рыбкиным демонстрировал на заседании Физического отделения Общества первую в мире радиопередачу телеграммы («Генрих Герц») на расстояние 250 м. В мае 1897 г. А. С. Попов проводил на Кронштадтском рейде передачу сигналов уже на 640 м и вскоре добился ее дальности более чем в 5 000 м,



испытывая в 1897 г. беспроводный телеграф во флоте (регулярная радиосвязь между крейсером «Африка» и транспортным судном «Европа»). Широкую известность приобрело практическое использование изобретения А. С. Попова в 1900 г. для обеспечения надежной беспроводной телеграфной связи на расстоянии свыше 40 км между островом Гогланд и материком при спасательных работах в связи с аварией в конце 1899 г. вблизи названного острова броненосца «Генерал-адмирал Апраксин».

Творческий успех А. С. Попова, не останавливаясь на его личных выдающихся качествах ученого и изобретателя и на гениальном предвидении им практического значения радио, был подготовлен исторически всем ходом развития в XIX в. науки и техники, в частности в области электричества и магнетизма, и повышенным в тот период интересом к новым, более эффективным видам дальней связи со стороны капиталистической колониальной заморской торговли, военного дела, международных сношений и др. Усилия многих ученых разных стран и народов, как предшественников Попова, так и его современников, были направлены прямо или косвенно к решению той же задачи, которой посвятил свои труды, творческие надежды и всю жизнь А. С. Попов. Роль этих ученых, исследователей, изобрета-

С электростанциями поставляется аккумуляторная батарея из четырех аккумуляторов типа 6СТЭ или 6СТЭ-140 на напряжение 24 в. Передача электроэнергии от генератора электростанции САЭ-200 и Э-14 к потребителям осуществляется посредством электрического распределительного щита. С электростанцией САЭ-200 поставляется двухпанельный электрический распределительный щит отдельно стоящего типа на шести отходящих линиях, три силовых и три световых с необходи-

мыми контрольно-измерительными приборами и электроаппаратурой.

Для поддержания на шинах постоянного напряжения в схему щита включается регулятор напряжения конструкции Московского электромеханического завода. Вес распределительного щита 280 кг, габаритные размеры: длина 1 600, ширина 1 000, глубина 700 мм.

На рис. 3 дана электрическая схема электростанции САЭ-200.

телей имела органическое и существенное значение для изобретения радио; результаты их трудов подготовили, обосновали, облегчили достижение и преодоление А. С. Поповым того последнего рубежа, который еще отделял человечество от овладения радио. Александр Степанович Попов в результате нескольких лет упорного, творческого, целеустремленного труда изобретателя впервые в мире нашел законченное и имевшее практическую форму решение, которое допускало его непосредственную реализацию, и именно это обстоятельство сразу придало работе А. С. Попова достаточно убедительные и четкие черты законченного изобретения. Александр Степанович, превосходно понимая значение и перспективы своего изобретения, вместе с тем проявлял большую скромность и постоянно подчеркивал выдающуюся роль других ученых и изобретателей, упорно трудившихся над той же задачей и продвинувших вперед общее дело ее разрешения. Он восхищался их неумолимыми экспериментами и блестящими теоретическими выводами и обобщениями.

В свете этого необходимо назвать: Михаила Фарадея (1791—1867), открывшего и объяснившего явление электромагнитной индукции (1831), высказавшего в дальнейшем мысль о том, что распространение электрической и магнитной силы представляет собой колебательное явление и происходит с конечной скоростью¹; Джемса Максвелла (1831—1879), автора электромагнитной теории света, теоретически доказавшего существование относительно свободных электромагнитных волн (1863); Генриха Герца (1857—1894), создателя вибратора и резонатора, впервые экспериментально получившего в лаборатории электромагнитные колебания² (1887), исследовавшего их свойства и установившего соответствие их теоретическим положениям Максвелла; Эдуарда Бранли (1844—1940), открывшего изменение проводимости металлических порошков под действием электрических разрядов (1890) и сконструировавшего индикатор электромагнитных волн; Оливера Лоджа (1851—1940), весьма близко подошедшего к изобретению беспроводной связи, развившего опыты Герца и описавшего (1894) его работы и свой метод применения индикаторной трубки Бранли (когерера); Юза (1830—1900) и др.

Труды этих физиков и экспериментаторов создали благоприятные условия для развития изобретательской мысли в области беспроводной связи; оставался еще один, заключательный, шаг, которого, однако, не смогли сделать предшественники и современники А. С. Попова³. И этот шаг,

приведший, наконец, к изобретению радио, был сделан А. С. Поповым. В своих долгих опытах и поисках он уделял большое внимание повторению лабораторных исследований и экспериментов Герца, Бранли и Лоджа, особенно последнего, стремясь при этом изыскать надежный способ быстрого восстановления чувствительности когерера и разработать схему, которая имела бы не только лабораторное применение, но была пригодна для передачи сигналов на расстояние на практике, т. е. в эксплуатации как средство связи. Именно эта целеустремленность работ А. С. Попова отличала его и от предшественников и от многих современников, занимавшихся той же темой. Следует отметить, что еще в 1889 г. А. С. Попов указывал в своей публичной лекции на эту цель. Он выбрал единственно правильный путь — создание чувствительного и надежного «обнаружителя» электромагнитных колебаний. Для этого он выполнил огромное число опытов и исследований свойств металлических порошков, трубок и электродов различной формы и т. д. На основе большой подготовительной работы Попов создал совершенно оригинальную, ранее не существовавшую схему прибора для приема электромагнитных колебаний. Хотя в приборе частично были применены известные прежде детали, но радикальное усовершенствование их Поповым, внесение им целого ряда новых и собственного изобретения деталей, привело к совершенно новому сочетанию отдельных элементов и к оригинальной конструкции в целом.

Включив в цепь когерера электрический звонок, Попов добился повторного автоматического восстановления чувствительности когерера. Звонок, приходя в действие от сигналов вибратора, ударял молоточком по когереру, и спекшийся порошок от встряхивания делался вновь чувствительным. Заэкранировав свою схему, Попов создал защиту от непосредственного воздействия переменных полей. Обнаружив увеличение дальности действия прибора при присоединении к когереру куска провода, Попов проанализировал эту зависимость и впервые в мире ввел приемную антенну.

Все составные части прибора А. С. Попова, описанного им в печати в январе 1896 г., были в основном повторены Маркони (1874—1937), получившим 2 июня 1896 г. английский патент. Ввиду того что вопрос о работах Маркони, сведения о приборах которого были опубликованы (Присом) лишь в июне 1897 г., достаточно уже освещен в литературе, нет необходимости к нему возвращаться. Напомним только, что приоритет А. С. Попова был подтвержден такими авторитетными физиками — современниками Попова и Маркони, как Бранли, Лодж, Риги, Неспер, Леджсет и др. Лофтин сообщил в 1939 г., что американский суд, к которому в 1916 г. обратилась компания Маркони, вынес в 1935 г. решение, которым Маркони было отказано в приоритете.

волн для целей беспроводной телеграфии. Имеется в виду письмо Герца (1889) к Губеру, передавшему в дальнейшем это письмо ETZ для опубликования (1897).

¹ Письмо Фарадея, содержащее это высказывание, датировано 12 марта 1832 г.; оно было обнаружено в архивах Лондонского королевского общества только в 1938 г., т. е. более 100 лет оно было неизвестно.

² Современники Герца называли их «лучами» Герца. По латыни «луч» — *radius*, а «излучаю» — *radio*, что и вошло во все языки мира.

³ Сохранилось предположение, что даже Герц отвергал практическую возможность использования открытых им

Разумеется, это не умаляет фактических достижений Гуглиемо Маркони, который при поддержке крупных финансовых монополий сыграл большую и активную роль в осуществлении линий беспроводной связи на далекое расстояние и в развитии радиопромышленности.

Творчество А. С. Попова отличалось практической инженерной направленностью. Этим оно резко отличалось от лабораторных опытов многих исследователей в этой области. Попов не только конструктивно улучшил трубку Бранли и повысил ее чувствительность, — он ввел в дальнейшем в свой новый прибор (в октябре 1895 г.) реле, приводившее в действие пишущий аппарат. Введение в схему реле не только служило целям создания пишущего приема, но имело большое принципиальное значение как способ приведения в действие слабым приходящим сигналом гораздо больших количеств энергии местных источников. Совершенствуя схему своего прибора, Попов включил последовательно с когерером телефон (1899), что еще более увеличило дальность связи и позволило вести прием на слух⁴; Попов выделил цепи антенны и ввел промежуточный контур для ослабления влияния сопротивления антенны. Он привлек внимание к роли резонанса в радиотехнике, обнаружил (1897) отражение и рассеивание радиоволн и объяснил природу явлений, из которых зародились радиолокация, радиопеленгация и радионавигация. Попов разработал первые волномеры. Он успешно боролся за превращение теоретической идеи беспроводной связи в конструктивно разрешимую задачу, которую в итоге

своих упорных многолетних работ первый и разрешил (1894—1895).

За 60 лет, прошедших после изобретения радио, неузнаваемо изменились техника радио и сфера его применения. Новые методы радиопередач, расширение диапазонов, применение электровакуумных приборов открыли огромные возможности для разнообразного применения радио. Перспективы его развития трудно охватить полностью даже и теперь, настолько они представляются многообещающими. Дальнейшее усовершенствование генераторов и приемников электромагнитных колебаний высокой и сверхвысокой частоты, новые средства радиотехники в связи с бурным развитием электроники и далеко идущими перспективами внедрения ионных и электронных кристаллов (пионер их применения в радиотехнике — наш соотечественник О. В. Лосев), а также в связи с применением новых изолирующих и магнитных материалов, осуществление телевидения, развитие автоматических и телемеханических устройств, широкое внедрение радиотехнических методов и средств, электроники и полупроводников в различные отрасли техники и производства имеют выдающееся значение в социалистическом переустройстве народного хозяйства, техники, культуры, быта.

То, что сейчас объемлет в широком и общем смысле понятие радио, далеко ушло вперед за 60 лет, истекших после исторического изобретения А. С. Попова, когда в это понятие вкладывалась лишь беспроводная телеграфная связь. Советские ученые и инженеры внесли в развитие радио богатейший вклад и направляют ныне все свои усилия на дальнейшее повышение темпов развития радио в нашей стране, на родине радио.

Д. Р.

⁴ Возможность радиоприема на телефон была открыта в июне 1899 г. ближайшим сотрудником Попова — П. Н. Рыбкиным (1864—1948).



Дискуссии

ОБ УЧЕБНИКЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

(Электричество, № 6, 7, 12, 1953; № 3, 4, 1954)

Кандидат техн. наук., доц. Г. В. ЗЕВЕКЕ,
кандидат техн. наук, доц. П. А. ИОНКИН,
доктор техн. наук, проф. А. В. НЕТУШИЛ,
кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Кандидат техн. наук, доц. А. И. ДАРЕВСКИЙ
Всесоюзный заочный политехнический институт
Доктор техн. наук, проф. В. Ю. ЛОМОНОСОВ

ЦНИЭЛ МЭС

В дискуссии были высказаны различные точки зрения по содержанию первой части курса теоретических основ электротехники (ТОЭ). Кафедра ТОЭ МЭИ считает целесообразным начинать курс с теории цепей. В течение ряда лет курс ТОЭ начинался в МЭИ с физических основ электротехники и отказ от этой последовательности изложения

явился результатом продолжительной методической работы по согласованию программы курсов теоретических основ электротехники, математики и физики с целью исключения параллелизма и углубления изложения материала.

Достаточно познакомиться с программой по физике для высших технических учебных заведений, утвержденной Методическим управлением Министерства высшего образования (инд. МУ-23), чтобы убедиться в том, что она предусматривает надлежащую подготовку студентов в части физических основ электротехники (ФОЭ). Включение в курс ТОЭ самостоятельной первой части в виде ФОЭ, как это сделано, например, в книге «Теоретические основы электротехники» П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана, не является достаточно оправданным. Материал, изложенный в этой части книги, в значительной мере повторяет содержание курса физики. Следует учесть, что студенты приступают к изучению курса ТОЭ, как правило, сразу после сдачи экзамена по электричеству и магнетизму в курсе фи-

зики. Поэтому нет оснований к тому, чтобы начинать курс ТОЭ с повторения того материала, который только что изучался.

Наличие ФОЭ в качестве первой части курса ТОЭ приводит к параллелизму не только между курсами ТОЭ и физики, но и к параллелизму в пределах самого курса ТОЭ. Дело в том, что когда студенты приступают к изучению последней части курса ТОЭ — теории электромагнитного поля после того, как они в течение длительного времени изучали теорию цепей, многие сведения, полученные по электромагнитному полю в ФОЭ, оказываются забытыми.

Приходится вновь возвращаться к напоминанию того, что излагалось в физике или в ФОЭ. В данном случае это повторение неизбежно. Поэтому, вместо того чтобы разрывать изучение теории электромагнитного поля на две разобщенные друг от друга части, одна из которых находится в начале, а другая в конце курса, целесообразнее дать весь материал по теории электромагнитного поля в одном месте — в конце курса. При этом, помимо устранения всех перечисленных выше недостатков, связанных с выделением ФОЭ в виде самостоятельной первой части курса ТОЭ, достигается большая целостность и большая глубина изучения теории электромагнитного поля.

Существенным дефектом структуры программы на 3-х частях (ФОЭ, теория цепей, теория поля), является разрыв интегральной и дифференциальной форм изложения законов электромагнитного поля. Этот разрыв длится на протяжении изучения всей теории цепей. Однако он совершенно излишен. При построении программы из 2-х частей этого разрыва нет: напомнив кратко формулировку законов электромагнитного поля в интегральной форме, данных в курсе физики, мы переходим к их формулировке в дифференциальной форме. Этому переходу нужно студентов научить; тогда они будут подготовлены к восприятию более сложных вопросов теории электромагнитных полей.

Конструкция программы по ТОЭ, принятая в МЭИ, полностью соответствует научной целостности этой дисциплины, и курс естественно делится на теорию цепей и теорию поля, а не на 3 части.

Отметим также неправильность утверждения, будто начало курса ТОЭ с теории цепей, делает изложение формальным; в теории цепей содержится много физических вопросов и они обязательно освещаются.

Характерной стороной структуры курса ТОЭ, принятой в МЭИ, является тенденция — разгрузить курс ТОЭ от всего, что может быть без ущерба для дела и с немалым успехом изложено в курсе физики, т. е. именно от того материала, который и входит в ФОЭ. Это дает возможность ввести в курс ТОЭ изучение ряда важных вопросов, которые до сих пор не изучались из-за недостатка времени (дополнительные разделы теории переходных процессов и теории нелинейных цепей, интеграл Фурье и его применения, метод гармонического баланса и т. д.). Этого, наоборот, не удается сделать при ограниченности времени, отводимого на преподавание ТОЭ и сохранении раздела ФОЭ в курсе ТОЭ.

Следует отметить, что структура курса ТОЭ, имеющая в МЭИ, принята также в ряде других крупнейших вузов страны — МАИ, МЭИС и ЛЭТИ.

Наличие ФОЭ в качестве первой части курса ТОЭ может рассматриваться либо как результат недоверия к подготовке студентов по курсу физики, либо как нежелание проводить нормальную для каждого вуза методическую работу по согласованию программ между различными дисциплинами.

В МЭИ кафедры ТОЭ и физики провели совместную работу по согласованию методики изложения раздела электричества и магнетизма в курсе физики. Кафедра физики МЭИ перестроила преподавание раздела «Электричество и магнетизм» с целью приближения его к запросам технических учебных заведений. Изданы учебные пособия по физике Ф. К. Курепина «Электростатика», Б. А. Садикова «Постоянный ток» и «Электромагнетизм», которые обеспечивают подготовку по физике, необходимую для изучения теории цепей. Приводимый ниже в приложении пример обязательного домашнего задания по электричеству и магнетизму показывает на достаточно высокий уровень подго-

товки по этому разделу в курсе физики¹. Из содержания задания следует, что после изучения данного раздела курса физики не требуется какой-либо более углубленной проработки электричества и магнетизма перед тем как приступить к изучению теории цепей, которую рекомендуют проводить некоторые участники настоящей дискуссии.

Различные точки зрения выявились на структуру и содержание части курса ТОЭ, относящиеся к теории электрических цепей. Так, например, А. В. Берендеев, Р. А. Воронов, Г. Е. Пухов, Б. А. Борковский и В. Н. Сосунова считают целесообразным изучать свойства и расчеты электрических цепей при переменных токах и напряжениях, рассматривая цепи при постоянных токах и напряжениях лишь как частные случаи. Такой порядок изложения встретил бы значительные затруднения при изучении курса. Хорошее усвоение основных свойств линейных электрических цепей и методов их расчета возможно лишь при решении большого числа задач. Решение задач на цепи при постоянных токах и напряжениях много проще и требует значительно меньшей затраты времени, чем при синусоидальных токах и напряжениях. Нет надобности обременять студентов, изучающих сущность расчетных методов, большой вычислительной работой с комплексными числами. Поэтому все те свойства цепей и все те методы их расчета, которые являются общими при постоянных и синусоидальных токах и напряжениях, следует изучать при постоянных токах и напряжениях.

Ряд замечаний, сделанных в дискуссии, разделяется авторами и будет учтен в дальнейшей работе над учебником. Так, например, авторы согласны с замечаниями Р. А. Воронова, Г. Е. Пухова, Б. А. Борковского и В. М. Сосуновой о необходимости рассмотрения теории фазовой плоскости, расчета цепей с импульсными э. д. с. и цепей с электронными лампами; А. А. Янко-Триницкого о желательности издания курса в виде нескольких книг меньшего формата и о включении численных примеров, иллюстрирующих некоторые разделы курса. Проведение в жизнь ряда ценных пожеланий в отношении расширения содержания курса (А. В. Берендеева, Г. Р. Рахимова и др.) встречает затруднение вследствие ограниченности времени, представляемого учебными планами на изучение ТОЭ. Вызывает также затруднения учет пожелания А. В. Берендеева о целесообразности рассмотрения теории нелинейных цепей постоянного и переменного тока в одном разделе курса, хотя вообще это пожелание заслуживает внимания.

Можно представить себе два варианта построения первой части курса ТОЭ (теории электрических цепей), приведенных в следующей таблице. Здесь последовательность изложения показана цифрой, а вариант — буквой *a* или *b*.

Цепи	Линейные				Нелинейные	
	с сосредоточенными параметрами		с распределенными параметрами			
Характер процесса в цепи	1 ^a	1 ^b	2 ^a	4 ^b	3 ^a	7 ^b
Постоянный ток	1 ^a	1 ^b	2 ^a	4 ^b	3 ^a	7 ^b
Переменный ток (установившийся режим)	4 ^a	2 ^b	5 ^a	5 ^b	6 ^a	8 ^b
Переходные процессы	7 ^a	3 ^b	8 ^a	6 ^b	9 ^a	9 ^b

В курсе МЭИ принят вариант *a*, по которому сначала излагаются цепи постоянного тока, затем переменного тока и в заключение переходные процессы. А. В. Берендеев, очевидно, предпочитает некоторую разновидность варианта *b*, по которому сначала излагаются линейные цепи с сосредоточенными параметрами, затем с распределенными и в конце нелинейные цепи. Следует заметить, что оба варианта, обладая логической стройностью, имеют свои преимущества и недостатки. Все изложение по варианту *a*

¹ См. планы учебных занятий на 1954—1955 учебный год, II курс (3-й семестр), стр. 23 . . . 25, издание МЭИ.

строится по принципу — от более простого к более сложному. Кроме того, по этому варианту довольно хорошо удовлетворятся запросы специальных дисциплин и, в частности, электрических машин и электрических измерений, касающиеся расчета магнитных цепей. Именно эти обстоятельства заставили авторов отдать предпочтение варианту *a*. Вариант *b* облегчает изложение теории цепей с распределенными и нелинейными параметрами и также заслуживает внимания.

Следует указать, что в настоящее время некоторые разделы курса обусловлены не логической системой построения курса теоретических основ электротехники, а особенностью некоторых технических устройств. Таким разделом является рассмотрение катушек и трансформаторов со стальным сердечником, сочетающее линейную теорию магнитно связанных цепей переменного тока с некоторыми вопросами теории нелинейных цепей. Нам представляется целесообразным в дальнейшей работе над курсом более четко разграничить линейные и нелинейные задачи и рассматривать каждый из вопросов в соответствующем разделе вне зависимости от того, с каким техническим устройством эти вопросы связаны.

Авторы не согласны с замечаниями А. Е. Каплянского и Л. С. Полотовского о том, что введение комплексных величин в начале изучения электрических цепей при синусоидальных токах и напряжениях является методической ошибкой. Наоборот, они рассматривают это как методическое достижение, которое хорошо зарекомендовало себя в практике преподавания. Следует заметить, что в последнем (четвертом) издании (1954 г.) курса П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана применение комплексных чисел дается уже значительно раньше, чем это было в третьем издании.

Авторский коллектив книги «Основы электротехники» под ред. К. А. Круга считает необходимым между прочим отметить, что Л. Р. Нейману и редакции журнала «Электричество» еще в 1952 г. была передана на книгу П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана издания 1951 г. рецензия, написанная в 1952 г. А. И. Даревским, П. А. Ионкиным и С. В. Страховым, в которой содержался ряд замечаний. Авторы удовлетворены тем, что в новом издании книги Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова многие замечания этой, к сожалению, не опубликованной рецензии были учтены.

В заключение авторский коллектив выражает благодарность редакции журнала «Электричество» за организацию дискуссии и всем лицам, принявшим участие в дискуссии, за ряд замечаний, которые будут учтены при подготовке нового издания книги

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример обязательного домашнего задания по электричеству и магнетизму в курсе физики

Первая часть расчета

1. Коаксиальный кабель состоит из прямолинейного проводника круглого сечения диаметром 4 мм и коаксиальной с ним проводящей цилиндрической оболочки диаметром 24 мм, разделенных однородным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$. Рассчитать емкость отрезка такого кабеля длиной 50 см. Какое максимальное напряжение можно приложить между внутренней жилой и оболочкой этого кабеля, если пробивная напряженность диэлектрика 80 кВ/см? Какова при этих условиях энергия электрического поля отрезка кабеля длиной 50 см? Какого радиуса следовало бы взять провод, чтобы при постоянных напряжении и диаметре оболочки ($R = 2$ мм) максимальной напряженности поля имела наименьшее значение.

2. Внутри плоского конденсатора с площадью пластин 200 см^2 и расстоянием между ними 0,1 см находится стеклянная пластинка ($\epsilon = 5$). Толщина стеклянной пластинки равна расстоянию между пластинками конденсатора. Ширина пластинки равна ширине пластин конденсатора, длина ее равна половине длины пластин конденсатора. Определить, как изменится энергия поля конденсатора, если удалить из него стеклянную пластинку. Задачу решить при двух условиях: 1) конденсатор все время присоединен к источнику с э. д. с., равной 300 в; 2) конденсатор присоединяется к тому же источнику, и стеклянная пластинка уда-

ляется из конденсатора после отключения его от источника. Определить для обоих условий задачи совершаемую механическую работу.

3. В двухпроводной линии с заданными размерами течет постоянный ток так, что включенный в начале линии источник э. д. с. вызывает в линии стационарное распределение заряда, отличающееся от равномерного. Задано, что линейная плотность заряда вдоль проводников меняется по закону

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right),$$

где $\tau_0 = + 10^{-7} \text{ к/м}$ на одном и $\tau_0 = - 10^{-7} \text{ к/м}$ на другом проводнике.

Вычислить:

- разность потенциалов между проводниками, как функцию координаты x ;
 - тангенциальную (E_1) и нормальную (E_2) компоненты напряженности электрического поля в зависимости от x и R ;
 - силу кулоновского взаимодействия между проводниками;
 - энергию электрического поля.
- Указания:
- считать, что линия достаточно удалена от земли;
 - положить, что заряд равномерно распределен по поверхности проводника;
 - вычислить \vec{E} для точек, где $x \gg R$. Влиянием концов линии на поле в этих точках пренебречь.

Вторая часть расчета

1. По коаксиальному кабелю (данные см. в задаче 1 из первой части расчета) идет ток 2 а. Вычислить индуктивность, магнитный поток и энергию магнитного поля отрезка этого кабеля длиной 50 см.

2. Одиннадцать круговых контуров радиусом 10 см расположены на одинаковом расстоянии друг от друга таким образом, что их плоскости параллельны друг другу, а центры расположены на прямой, перпендикулярной этим плоскостям. По каждому контуру протекает ток 10 а. Внутри среднего контура помещается маленький контур радиуса 5 мм; центр последнего совпадает с центром среднего контура.

Определить наибольшую э. д. с., возникающую в маленьком контуре, если он будет равномерно вращаться вокруг одного из своих диаметров, делая 10 об/сек. Задачу решить для случаев, когда расстояния между соседними неподвижными контурами равны: 1) $a_1 = 5 \text{ см}$; 2) $a_2 = 0,5 \text{ см}$; 3) $a_3 = 0$ (для случая, когда контуры расположены так близко друг от друга, что расстоянием между ними можно пренебречь).

3. Вычислить силу тока, текущего вдоль линии, описанной в задаче № 3 из первой части расчета, величину э. д. с., приложенной в начале линии, силу магнитного взаимодействия между проводниками, магнитный поток и энергию магнитного поля, если известно, что проводники сделаны из алюминия.

Член-корр. АН СССР, проф. Л. Р. НЕЙМАН

*Ленинградский политехнический институт
им. Калинина*

Проведенное на страницах журнала «Электричество» широкое обсуждение учебников по курсу «Теоретические основы электротехники» для высшей школы имеет исключительно большое значение не только для дальнейшего совершенствования учебников в тех или иных частных разделах, но также, что особенно существенно, для выяснения принципиального вопроса о правильном построении этой важной для подготовки инженеров-электриков дисциплины и соответственно о правильной структуре учебника.

Отдельные частные критические замечания должны быть учтены при последующих изданиях учебников. Многие из этих замечаний и пожеланий уже учтены в последнем издании нашей книги, вышедшей весной 1954 г. Так, например, в этом издании существенно развиты разделы о нелинейных электрических цепях постоянного и переменного

тока, что соответствует пожеланиям, высказанным А. В. Берендеевым, Г. Р. Рахимовым и другими участниками дискуссии. В соответствии с пожеланиями В. Б. Романовского, А. А. Янко-Триницкого и других книга дополнена примерами по применению общих методов расчета; в книге расширено физическое рассмотрение явлений, к которым относятся те или иные методы расчета, а также дополнительно приведены указания о практическом значении рассматриваемых теоретических положений. Согласно пожеланию А. Е. Каплянского, Л. С. Пологовского, А. А. Янко-Триницкого и С. И. Шипкова часть материала книги, которая может рассматриваться как необязательная, набрана мелким шрифтом. Учтен также ряд высказанных участниками дискуссии пожеланий и замечаний, что, несомненно, способствовало дальнейшему улучшению книги.

С некоторыми высказанными в дискуссии замечаниями нельзя согласиться. Так, например, нельзя согласиться с предложением А. Е. Каплянского о введении основных величин, характеризующих магнитное поле, через посредство понятия о фиктивных магнитных массах. Этот метод был использован нами в первых изданиях нашей книги. Однако, учитывая критику ряда лиц, и, особенно, представителей кафедры ТОЭ МЭИ им. Молотова, мы уже в издании 1951 г. перестроили изложение, отказавшись от использования понятия о магнитной массе при введении основных величин. Новое построение более отвечает физической сущности явлений. Одновременно здесь достигнута согласованность между двумя учебниками, по курсу теоретических основ электротехники. А. Е. Каплянский предлагает в этом вопросе вернуться назад, хотя правильнее было бы настаивать на отказе от «магнитных масс» и в соответствующих главах курса физики.

При подведении итогов дискуссии естественно обратить основное внимание на поднятые в ней принципиальные вопросы. К ним прежде всего относится вопрос о структуре курса «Теоретические основы электротехники» и о его взаимоотношении с предыдущими и последующими курсами в учебных планах высших учебных заведений. Почти все выступившие в дискуссии высказались против такого построения курса, которое способствует сведению его к формальному изложению методов расчета электрических и магнитных цепей и электромагнитных полей. Придавая большое значение изложению методов расчета, почти все выступившие требовали насытить курс физическим содержанием и дать ему такое построение, которое наилучшим образом обеспечивает его целостность в идейно теоретическом отношении. Почти по единогласному мнению последнее обеспечивается при наличии в курсе следующих трех основных частей. Первая сравнительно краткая часть, которая может быть названа «Физические основы электротехники», должна содержать проводимое на основе знаний, полученных студентами из курса физики, углубленное изложение основных понятий и закономерностей, относящихся к области электромагнитных явлений. В ней должно быть обращено особое внимание на установление взаимосвязей между электрическими и магнитными явлениями и на обобщение основных законов. Вторая наибольшая по объему часть должна содержать изложение методов расчета электрических и магнитных цепей постоянного и переменного тока и рассмотрение физических явлений в этих цепях. Третья часть должна включать в себя теорию электромагнитного поля с изложением основных современных методов расчета полей. О необходимости такого построения курса вполне определенно высказались В. Б. Романовский, Р. А. Воронов, Г. Е. Пухов, Б. А. Борковский, В. М. Сосунова (Электричество, № 6, 1953), А. А. Янко-Триницкий (№ 7, 1953 г.), А. Е. Каплянский, Л. С. Пологовский (№ 10, 1953), Г. Р. Рахимов (№ 12, 1953) и С. И. Шипков (№ 3, 1954). Против придания первой части курса узкого справочного характера, что осуществлено в книге коллектива авторов МЭИ, резко возражали А. Е. Каплянский, Л. С. Пологовский (№ 10, 1953 г.), А. Ф. Метелкин и К. А. Карпова (№ 12, 1953 г.). О необходимости насыщения изложения физическим содержанием говорит также Б. С. Диковский (№ 3, 1954).

Наличие первой части «Физические основы электротехники», как отмечено в дискуссии, обеспечивает глубокое физическое рассмотрение явлений в цепях переменного тока, излагаемых во второй части, и устраняет опасность сведения этой части к формальному изложению методов расчета электрических цепей. Наличие первой части дает

возможность начать изложение третьей части «Теория электромагнитного поля» с общих связей, характеризующих электромагнитное поле как вид материи, т. е. с установления полных уравнений электромагнитного поля. При этом электростатическое поле и электрическое и магнитное поля постоянных токов, естественно, рассматриваются как частные случаи электромагнитного поля. Последние разделы третьей части, посвященные переменному электромагнитному полю, должны содержать довольно сложный математический аппарат. Но этот аппарат не будет подавлять основной мысли об единстве электрических и магнитных явлений, а, наоборот, развивать ее, так как эта мысль при вышеуказанной структуре курса проходит красной нитью через весь курс. Эта мысль неизбежно будет подавлена математическим аппаратом, если ее впервые ввести полностью в самом конце изложения теории электромагнитного поля, что имело бы место при отсутствии отмеченной выше первой части.

С общим мнением о необходимости придания курсу ТОЭ целостности, обеспечиваемой вышеизложенной его структурой, разошлось высказывание только А. В. Берендеева и З. И. Кязим-Заде. Мнение А. В. Берендеева оказалось отличным от общего мнения, повидимому, потому, что в Ленинградском электротехническом институте им. Ульянова нет единой кафедры «Теоретические основы электротехники» и нет единого курса. Этот курс в ЛЭТИ обслуживают две независимые кафедры, одной из которых, ведущей преподавание только по разделу «Теория электрических цепей», и заведует А. В. Берендеев.

Мнение о необходимости строить курс в трех вышеотмеченных частях было поддержано еще более широким кругом представителей кафедр теоретических основ электротехники различных вузов страны на состоявшемся в Москве в июне 1954 г. совещании представителей этих кафедр по обсуждению программы курса «Теоретические основы электротехники». Совещание было созвано Главным управлением политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР.

Соответственно мнению, высказанному подавляющим числом присутствовавших на этом совещании, а также призвавшим свои отзывы письменно, основанному на широком опыте преподавания, новая программа по курсу ТОЭ, утвержденная Главным управлением политехнических и машиностроительных вузов Министерства высшего образования СССР 10 июля 1954 г., содержит в себе все отмеченные выше разделы. И действительно, весь опыт преподавания свидетельствует, что понятия, относящиеся к области электромагнитных явлений, требующие для своего понимания в значительной степени абстрактного мышления, не могут быть усвоены студентами во всей глубине и во всей сложности их взаимосвязей сразу, полностью и окончательно на младшем курсе при первом же их изложении в упрощенном виде в курсе физики. Да и было бы странно думать иначе, когда мы видим, что вокруг этих понятий продолжают и по настоящее время споры среди компетентных в области физики и электротехники лиц, многие из которых в течение ряда лет ведут преподавание в вузах; об этом свидетельствует и только что проведенная на страницах журнала «Электричество» оживленная дискуссия по терминологии в области теоретической электротехники и ведущаяся в настоящее время в журнале «Электричество» дискуссия по статье «Поле как вид материи».

Первая часть курса теоретических основ электротехники, являясь логическим развитием и углублением соответствующих разделов курса физики, должна иметь, кроме того, больший акцент в направлении практических задач электротехники.

А. В. Берендеев затронул весьма важный вопрос о связи между курсом высшей математики и курсом теоретических основ электротехники. Совершенно справедливо его замечание, что программа курса высшей математики должна содержать все вопросы, которые необходимы для изложения современных методов расчета электрических и магнитных цепей и электромагнитных полей, и что в курсе математики далеко не все эти вопросы излагаются достаточно полно. Однако вряд ли прав А. В. Берендеев в своей крайне пессимистической оценке содержания курса математики, читаемого в вузах.

Не менее существенна правильная связь курса теоретических основ электротехники с последующими специальными электротехническими дисциплинами. Первые издания

книги К. А. Круга содержали наряду с теоретическими положениями довольно подробное описание устройства, принципа действия и характеристик различных электротехнических приборов, машин и аппаратов, соответственно чему курс имел наименование «Основы электротехники». В настоящее время эти вопросы подробно излагаются в сильно развитых специальных электротехнических курсах, и обсуждаемый в настоящей дискуссии курс выкристаллизовался как курс теоретических основ электротехники.

В нем должны быть сообщены студентам теоретические знания как физические, так и математические, необходимые для анализа явлений в сложных современных электротехнических устройствах, необходимые для расчета этих устройств, а также для создания новых таких устройств. Упоминание же о самих практических устройствах и рассмотрение происходящих в них процессов в курсе теоретических основ электротехники должны быть использованы как конкретные примеры, на которых лучше всего могут быть разработаны или иллюстрированы общие методы анализа и расчета. Так, например, в курсе теоретических основ электротехники не должно содержаться подробного описания конструкций и метода расчета трансформаторов. Однако на примере трансформатора лучше всего может быть рассмотрен общий теоретический приближенный метод разделения магнитных потоков на основной поток и потоки рассеяния в устройствах, содержащих замкнутые сердечники из ферромагнитного материала, и объяснен смысл разделения. Такой характер изложения обеспечивает тесную связь теории с практикой. Вместе с тем следует согласиться с замечанием А. Е. Каплянского о целесообразности удаления практических примеров, слабо связанных с общим

теоретическим материалом курса и мало доступных на этом уровне пониманию студентов. Ряд замечаний этого рода уже принят во внимание в последнем издании нашей книги.

При обсуждении был поднят вопрос о наименовании курса и почти все признали наиболее правильным наименование «Теоретические основы электротехники», как наиболее отвечающее предмету и содержанию курса. Такое же мнение было высказано большинством на упомянутом выше совещании по программе курса, и вышедшая из печати программа имеет именно это наименование. К такому мнению склонялась, повидимому, и редакция журнала «Электричество», озаглавившая открытую ею дискуссию: «Об учебнике по теоретической электротехнике для высшей школы».

В заключение необходимо остановиться на важном вопросе о методологии курса, что связано с принципиальным построением курса, а также с определением основных понятий. Мы считаем, и с этим согласились многие выступившие в дискуссии, что указанное выше построение курса наиболее обеспечивает его идейную целостность и, следовательно, методологически правильно. Важный вопрос об определении основных понятий является в настоящее время предметом живых обсуждений.

В соответствии с итогами этих обсуждений совершенствуются в этом отношении от издания к изданию и выпускаемые учебники по теоретическим основам электротехники. Большую пользу для совершенствования учебников в методологическом и в методическом отношении принесли организованные редакцией журнала «Электричество» две дискуссии по научной терминологии в области теоретической электротехники и дискуссия об учебнике по теоретической электротехнике для высшей школы.

ОТ РЕДАКЦИИ

Задачей дискуссии было выяснение основных взглядов на структуру учебника по теоретической электротехнике для высшей школы и на методику изложения теоретических основ электротехники. Для облегчения обсуждения разбор соответствующих вопросов осуществлялся на примере двух книг: 1) коллектива авторов МЭИ им. Молотова под ред. К. А. Круга и 2) Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова (ЛПИ им. Калинина).

Значение создания учебника ТОЭ, удовлетворяющего возросшим требованиям советской высшей школы, огромно; важность общетеоретических дисциплин в подготовке инженеров очевидна. Учебник должен быть кратким по форме, ясным по изложению; он должен полностью отвечать современным передовым научным взглядам в области естествознания, развивать правильное понимание физических процессов, лежащих в основе сложных электротехнических устройств, и подготавливать студентов к решению задач новой техники.

Материалы дискуссии, еще в ходе ее проведения, были, повидимому, учтены при составлении новой программы МВО по курсу теоретических основ электротехники. Некоторые вопросы, по которым в настоящей дискуссии выявились различные точки зрения (например, о порядке расположения материалов), требуют своего дальнейшего изучения на основе практического опыта преподавания в различных вузах. В утвержденной 10 июля 1954 г. программе МВО (ПМ-94) указано, что расположение материалов в программе не является обязательным и чтение курса проводится в соответствии с методикой в различных вузах и специальностями в них. Большое значение для создания полноценного учебника ТОЭ имеет последовательное проведение в этом курсе материалистической идеологии и диалектического метода в объяснении явлений и законов природы. Новые издания книги Л. Р. Неймана и П. Л. Калантарова и книги коллектива авторов МЭИ, в которых большинство замечаний участников дискуссии нашло соответствующее корректирующее применение, могут быть рекомендованы в равной мере студентам энергетических и электротехнических вузов и факультетов.



3—9 июня 1955 г. в Ленинграде будет проведена Научно-производственная конференция по электрическим методам обработки металлов (электроискровая обработка, электроискровое упрочнение поверхностей и т. п.).

Справки — по адресу: Ленинград, 40, Сталинградский пр., д. 55, ЛОНИТОМАШ.

О СХЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

(Статья Н. Н. Крачкового, *Электричество*, № 11, 1953)

Инж. И. В. МАЛХАСЬЯН

Рассмотрим вопрос о схемах электрических соединений гидроэлектростанций в свете опыта эксплуатации, накопившегося в одной из энергосистем.

В этой энергосистеме в настоящее время действуют пять гидроэлектростанций и две гидроэлектростанции предполагается ввести в действие в ближайшее время. Данные об относительных значениях мощностей, которые могут быть переданы и фактически передаются с шин станций в сеть при различных напряжениях, приведены в таблице.

Гидроэлектростанция	Напряжение шин, кВ	Мощность, которая может быть передана в сеть по пропускной способности трансформаторов и линии, %	Мощность, фактически передаваемая в сеть, %
А	110	100	85 . . . 100
	35	50	0 . . . 15
	6	8	2 . . . 3
Б	110	100	60 . . . 70
	10	40	30 . . . 40
В	110	100	100
	10	1,5	< 1
Г	110	80	40 . . . 60
	10	65	60 . . . 40
Д	110	100	100
	35	3	3 (временно)
Е	110	100	—
	35	2	—
Ж	100	100	—
	6	3	—

Схема гидроэлектростанции А приведена на рис. 1. Мощность станции составляет менее 20% мощности системы. По проекту напряжение 35 кВ на станции не предусматривалось, но затем в связи с развитием сетей 35 кВ в районе города, вблизи которого находится станция, и необходимостью обеспечить резервирование питания города это напряжение потребовалось. При завершении монтажных работ второй очереди на гидроэлектростанции был

установлен трехобмоточный трансформатор, обмотка 35 кВ которого соединена непосредственно с линией. В настоящее время в связи с дальнейшим ростом сетей 35 кВ возникла необходимость иметь на станции распределительное устройство 35 кВ. Однако, при осуществлении его пришлось столкнуться с большими конструктивными затруднениями, связанными с тем, что первоначальным проектом место для распределительного устройства 35 кВ предусмотрено не было.

Проектом гидроэлектростанции А предусматривалось, что генераторы попарно будут работать раздельно на разные системы секционированных шин 6 кВ. Поэтому был установлен только один междушинный выключатель 6 кВ. Однако практика эксплуатации показала, что было бы лучше, если бы генераторы работали раздельно не на разные системы шин, а на разные секции одной системы шин. При этом вторая система шин должна использоваться в качестве трансферной. Поэтому пришлось установить дополнительно еще один междушинный выключатель 6 кВ и присоединить трансформаторы напряжения 6 кВ к каждой секции отдельно.

Ввиду того, что все отходящие от гидроэлектростанции А транзитные и радиальные линии 110 кВ являются одиночными, встречаются большие затруднения при отключении этих линий для ремонта выключателей и проверки защиты. Кроме того, в начале эксплуатации при синхронизации станции с системой приходилось производить большое количество операций разъединителями. Это было связано с отсутствием возможности производить включение станции на синхронную работу с системой при помощи линейных выключателей. В дальнейшем на всех транзитных линиях было смонтировано устройство автоматического повторного включения с подхватом синхронизма, которое успешно используется для целей синхронизации и в обычных условиях.

В целях сокращения времени, затрачиваемого на вывод оборудования в ремонт, все секции шин 6 кВ, шины 110 кВ и генераторы были оборудованы стационарными заземляющими ножами, что значительно упростило и ускорило производство операций.

Вследствие того, что местные воздушные сети 6 кВ питались от шин генераторного напряжения, имел место один случай пробоя обмотки генератора во время грозы. После этого пришлось на линиях, питающих местную нагрузку, установить раздельные трансформаторы с коэффициентом трансформации, равным единице.

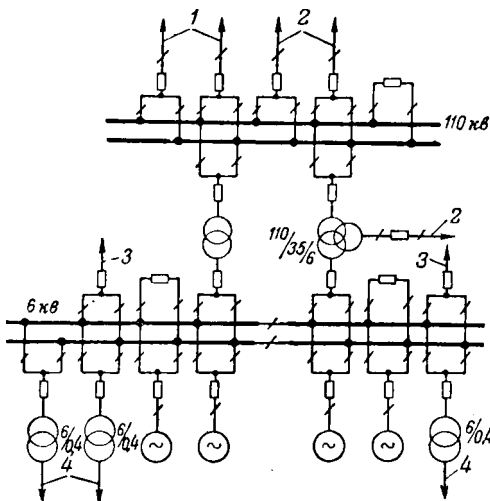


Рис. 1. Схема электрических соединений гидроэлектростанции А.

1 — радиальные линии; 2 — одиночные транзитные линии; 3 — местная нагрузка; 4 — собственные нужды.

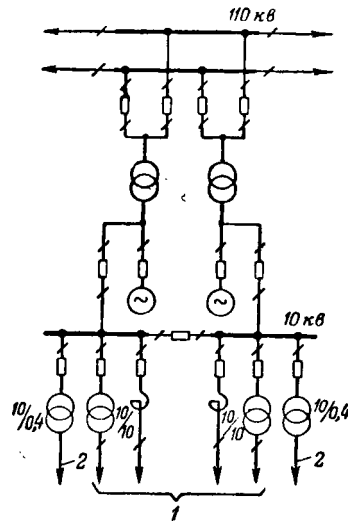


Рис. 2. Схема электрических соединений гидроэлектростанции Б.

1 — нагрузки местного района; 2 — собственные нужды станции.

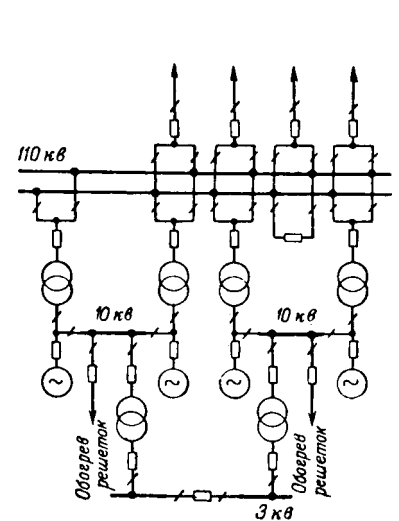


Рис. 3. Схема электрических соединений гидроэлектростанции В. Все линии 110 кВ парные, транзитные.

Гидроэлектростанция *Б* имеет мощность, составляющую менее 10% мощности системы. Территориально станция расположена вблизи ранее построенных парных транзитных линий электропередачи 110 кВ. Ее схема представлена на рис. 2.

К сети системы станция присоединена по схеме блоков с двумя выключателями. Линии одновременно являются шинами 110-кВ станции (см. схему на рис. 23 статьи Н. Н. Крачковского). Ввиду того, что значительную часть мощности (до 40%) станция отдает на генераторном напряжении, предусмотрено распределительное устройство 10 кВ с двумя секциями шин, присоединенными к отпайкам от блоков. Воздушные линии 10 кВ питаются через разделительные трансформаторы с коэффициентом трансформации, равным единице. В эксплуатации схема присоединения гидроэлектростанции оказалась удобной и надежной.

Гидроэлектростанция *В* имеет мощность, составляющую менее 20% мощности системы. Станция не имеет местной нагрузки, кроме собственных нужд и пристанционного поселка, поэтому для нее принята схема чистых блоков генератор-трансформатор с выключателями генераторного напряжения и отпайками от каждой пары блоков для питания собственных нужд (рис. 3). Эксплуатация показала, что в генераторном выключателе нет необходимости и он может быть демонтирован.

Оперативная схема гидроэлектростанции *В* на стороне 110 кВ строилась таким образом, чтобы можно было междушинный выключатель 110 кВ использовать для целей синхронизации станции с системой по одной из парных транзитных линий. Так же как и на станции *А*, в процессе эксплуатации были смонтированы стационарные заземляющие устройства на шинах 110 кВ.

Схема чистых блоков оказалась весьма удобной и надежной в эксплуатации и легко позволила осуществить автоматизацию и перевод станции на телеуправление.

Гидроэлектростанция *Г* является самой мощной в системе, ее мощность составляет около 50% установленной мощности системы. Вначале предполагалось станцию осуществить по схеме чистых блоков генератор-трансформатор. Потребитель, расположенный вблизи от станции и потребляющий до 70% вырабатываемой ею энергии, должен был при этой схеме питаться от специальной понизительной подстанции. Затем было решено в целях сокращения потерь энергии и экономии оборудования отказаться от схемы чистых блоков, а питание указанного потребителя осуществить на генераторном напряжении. Энергосистема возражала против такого решения, так как незначительное сокращение потерь достигалось за счет усложнения схемы станции.

В дальнейшем выяснилось, что ввод в действие расположенного поблизости от станции предприятия задержится и что для него необходим независимый резервный источник питания. Эти два обстоятельства потребовали установки на станции трансформаторов на ее полную мощность и устройства понизительной подстанции, что свело к нулю экономию в трансформаторной мощности.

Было решено установить на станции два укрупненных трансформатора с расщепленной обмоткой, хотя энергосистема возражала против этого решения, так как мощность такого трансформатора составляла 50% рабочей мощности системы того времени. Однако ввиду невозможности получить в срок трансформаторы с расщепленной обмоткой пришлось заменить их четырьмя обычными двухобмоточными трансформаторами, попарно жестко соединенными на стороне 110 кВ. Уже во время монтажа было введено в действие расположенное поблизости от станции предприятие, что позволило отказаться от установки четвертого трансформатора. В результате схема станции приняла вид, изображенный на рис. 4.

Следует заметить, что в начале эксплуатации обе системы шин 10 кВ были секционированы и параллельная работа генераторов, присоединенных к разным секциям, была невозможна. Это создавало неудобства в эксплуатации. Поэтому одна из систем шин 10 кВ была превращена в трансферную.

Схема, представленная на рис. 4, оказалась весьма неудобной в эксплуатации. Кроме трудностей, связанных с отключением двух жестко связанных трансформаторов, возникали трудности с распределением активных и реактивных мощностей при несимметричном подсоединении генераторов и трансформаторов к секциям шин. Длительная

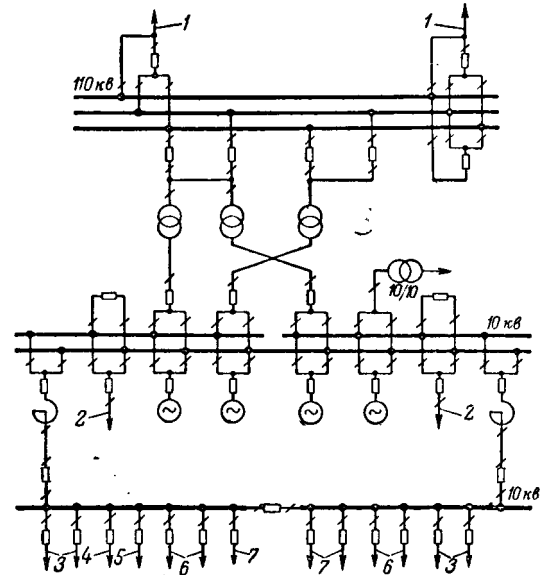


Рис. 4. Схема электрических соединений гидроэлектростанции *Г*.

1 — восемь транзитных и две радиальные линии 110 кВ; 2 — местная нагрузка; 3 — обогрев решеток; 4 — отопление; 5 — резервный возбудитель; 6 — собственные нужды распределительного устройства; 7 — собственные нужды машинного зала.

параллельная работа трех или четырех генераторов на одну систему шин 10 кВ оказалась недопустимой. Для устранения этих неудобств было решено провести реконструкцию схемы, после которой она приняла вид, представленный на рис. 5.

Решение о присоединении трансформаторов к шинам 110 кВ через один выключатель было принято вопреки предложению энергосистемы о присоединении их через два выключателя. Схема с двумя выключателями на трансформатор хорошо зарекомендовала себя в эксплуатации. Все линии, присоединенные к шинам 110-кВ станции, являются парными, поэтому при схеме с двумя выключателями и наличии дифзащиты шин 110 кВ с фиксированными присоединениями повреждение на одной из систем шин 110 кВ не приводит к отключению мощности или недоотпуску энергии потребителям.

За время эксплуатации на гидроэлектростанции *Г* имели место два случая короткого замыкания на шинах 110 кВ. Синхронная связь между системами шин 10 кВ, а также между станцией и системой в обоих случаях не нарушалась, так как эти случаи относятся к тому времени, когда

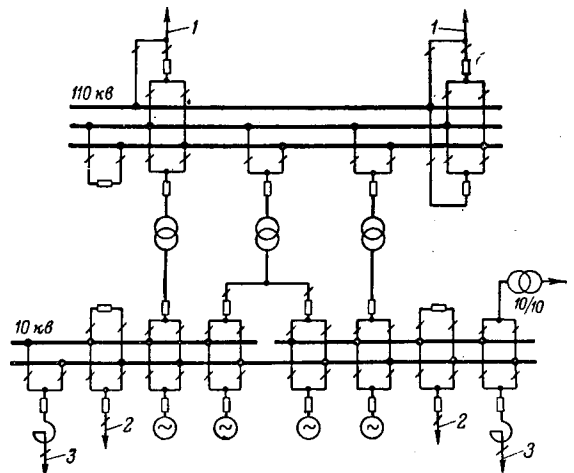


Рис. 5. Схема электрических соединений гидроэлектростанции *Г* после реконструкции.

1 — восемь транзитных и две радиальные линии 110 кВ; 2 — местная нагрузка; 3 — к шинам 10 кВ собственных нужд.

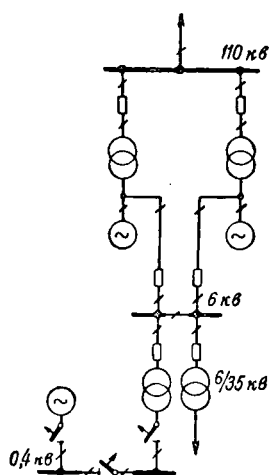


Рис. 6. Схема электрических соединений гидроэлектростанции Д.

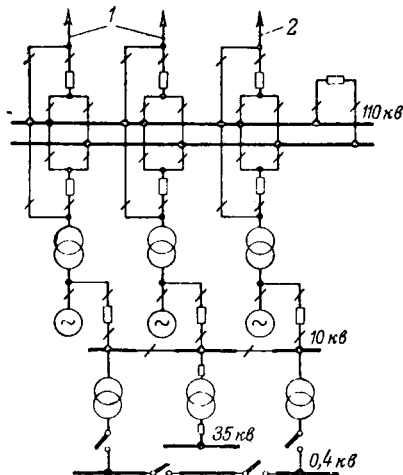


Рис. 7. Схема электрических соединений гидроэлектростанции Е.
1 — парные транзитные линии; 2 — одиночная транзитная линия.

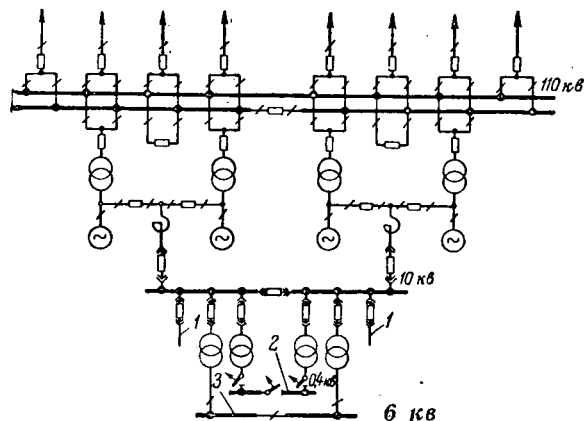


Рис. 8. Схема электрических соединений гидроэлектростанции Ж.
1 — обогрев решеток; 2 — собственные нужды; 3 — местная нагрузка.

станция работала по схеме, представленной на рис. 4. При схеме рис. 5 короткие замыкания на шинах 110 кВ неизбежно будут приводить к нарушению синхронной связи как внутри станции, так и между станцией и системой. Но поскольку местный потребитель не может работать при нарушенной синхронной связи, будет иметь место недоотпуск электроэнергии потребителям.

Как показал опыт эксплуатации, байпасная система шин является весьма удобной и, безусловно, целесообразной.

Следует отметить ненужную сложность схемы питания собственных нужд станции. Число трансформаторов собственных нужд, равное девяти (не считая трансформаторов для питания обогрева решеток и головного узла), можно было бы сократить до четырех или пяти без ущерба для надежности.

Гидроэлектростанция Д связана с сетью 110-кВ системы одиночной линией. Мощность ее составляет менее 10% мощности энергосистемы. Схема чистых блоков (рис. 6), примененная для этой станции, оказалась весьма удобной в эксплуатации. На случай отключения линии 110 кВ на станции имеется устройство автоматического повторного включения, при помощи которого станция включается в сеть 110 кВ методом самосинхронизации.

На гидроэлектростанции Д предусмотрено независимое резервирование собственных нужд от малой турбины. При исчезновении напряжения на шинах собственных нужд станции малая турбина пускается автоматически.

Напряжение 35 кВ не было предусмотрено проектом станции, оно появилось в связи с необходимостью обеспечения энергией строительства станции Е. В дальнейшем напряжение 35 кВ предполагается сохранить для питания местной нагрузки района станции Е и для взаимного резервирования питания собственных нужд станций Д и Е.

Мощность гидроэлектростанции Е будет составлять менее 20% мощности системы, схема ее запроектирована в виде чистых блоков (рис. 7). Учитывая значительную загруженность отходящих линий и наличие одиночной связи со станцией Д, энергосистема считала желательным иметь байпасную систему шин 110 кВ или, по крайней мере, иметь возможность использовать одну из систем шин 110 кВ в качестве байпасной, что было принято при утверждении схемы.

Гидроэлектростанция Ж будет второй по мощности станцией в энергосистеме. Ее местная нагрузка незначительна, поэтому напряжение 35 кВ не предусматривается.

Схема этой станции (рис. 8) имеет, по мнению энергосистемы, некоторые недостатки. Все парные транзитные линии, присоединенные к шинам 110 кВ, будут сильно загружены, поэтому их отключение, при отсутствии байпасной системы шин, будет сопряжено с понижением уровня напряжения в системе. Блоки генератор — трансформатор присоединяются к шинам 110 кВ через один выключатель, а не через два.

Касаясь схем, приведенных на рис. 15—17, 19, 21, 22, 24, 25 и 26 статьи Н. Н. Крачковского, следует отметить, что они, хотя и дают некоторую экономию выключателей, но имеют ряд существенных недостатков. Они очень сложны и не обладают необходимой наглядностью. На каждый выключатель при этих схемах действуют, как минимум, два комплекта защиты от разных присоединений. При повреждении на линиях электропередачи отключаются два или три выключателя. Поскольку эти повреждения являются наиболее частыми, количество внеплановых ревизий выключателей при этих схемах, по сравнению со схемами с одним выключателем, возрастает в 2...3 раза.

Схемы, представленные на рис. 18, 20 и 23 статьи Н. Н. Крачковского, хотя и обладают некоторыми из указанных недостатков, но благодаря своей простоте, наглядности и надежности могут найти широкое применение на гидроэлектростанциях каскада, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга вдоль трассы линии электропередачи.

Кратковременные перерывы питания собственных нужд порядка 3...5 мин обычно не вызывают расстройства в работе оборудования гидроэлектростанции. Исключения составляют редкие случаи, когда эти перерывы во времени совпадают с питанием возбуждения какого-либо из генераторов от резервного возбуждателя. Напротив, длительные перерывы питания собственных нужд гидроэлектростанции недопустимы, так как они приводят к полной остановке станции и невозможности пуска ее без получения напряжения извне. Кроме того, длительный перерыв питания собственных нужд может привести к затоплению помещений и оборудования станции, расположенных на отметках ниже уровня нижнего бьефа. Оперативный персонал, обслуживающий установки собственных нужд, на гидроэлектростанциях отсутствует.

Исходя из изложенного, схема питания собственных нужд гидроэлектростанции должна, по возможности, быть простой. Как правило, для питания установок собственных нужд, расположенных в пределах одной площадки, следует обходиться двумя трансформаторами (кроме трансформаторов, питающих обогрев решеток) с автоматическим включением резерва. Следует избегать применения двигателей высокого напряжения, так как достигаемая при этом экономия потерь не оправдывается вследствие усложнения обслуживания установки. Питание головных узлов и регулирующих сооружений следует осуществлять там, где это возможно, от местных сетей и одиночных понизительных трансформаторов.

На гидроэлектростанциях, работающих изолированно или связанных с другими станциями одной линией и имеющих одну или две машины, следует предусматривать установку малого гидроагрегата. Рассчитывать в этом случае на мелкие теплосиловые установки, существовавшие до строительства гидроэлектростанции, не следует, так как они после ввода в эксплуатацию гидроэлектростанций обычно консервируются.

Выводы. 1. Схема электрических соединений гидроэлектростанции должна выбираться с учетом ее мощности, места в энергосистеме и характера нагрузок. Она должна быть по возможности простой, но в то же время достаточно гибкой. Все необходимые в процессе эксплуатации коммутационные операции (кроме вывода оборудования в ремонт) должны осуществляться только выключателями.

2. Для станций мощностью до 150..200 тыс. *квт*, имеющих три агрегата и более, наиболее приемлемой является схема блоков генератор—трансформатор с двумя рабочими системами шин 110 *кв* и байпасной системой шин. Мощность одного трансформатора не должна превосходить 8..10% рабочей мощности системы. Крупные агрегаты желательно присоединять к шинам 110 *кв* через два выключателя, без присоединения к байпасной системе шин.

3. Станции средней мощности с одним или двумя агрегатами могут присоединяться к сети энергосистем по схеме блока станция—линия, если станция находится в отдалении от сети, или при помощи ответвлений от проходящих рядов линий. В последнем случае весьма надежной является схема присоединения каждого блока к парной линии через два выключателя.

4. Питание местных районов, кроме пристанционных поселков, желательно осуществлять при напряжении 35 *кв*, так как питание их при генераторном напряжении не освобождает от необходимости устанавливать трансформаторы (разделительные) для предохранения обмоток генераторов от повреждения при атмосферных перенапряжениях.

На гидроэлектростанциях, строящихся вблизи крупных городов или в районах, где имеются или могут появиться сети 35 *кв*, следует предусматривать напряжение 35 *кв*.

Питание крупных потребителей при генераторном напряжении должно допускаться только в тех случаях, если оно дает значительные экономические преимущества и если при этом не возникает необходимости в резервировании питания потребителей со стороны высшего напряжения. Если же преимущества невелики, питание крупных потребителей следует осуществлять при напряжении 35 или 110 *кв*.

5. При наличии секционированных шин генераторного напряжения для отбора значительной мощности или для применения укрупненных трансформаторов следует предусматривать трансферную систему шин генераторного напряжения.

6. Все элементы станции, требующие заземления во время производства ремонтных работ, желательно оборудовать заземляющими ножами. При сечении проводов защитных заземлений более 50 *мм*² применение постоянных защитных заземлителей должно быть обязательным.

7. Схемы питания собственных служб гидроэлектростанций по возможности должны быть простыми.

8. Чтобы избежать ненужных затруднений в эксплуатации или дорогостоящих переделок, проектные организации и институты, утверждающие проекты, должны более внимательно относиться к пожеланиям энергосистем.



По страницам технических журналов

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СБОРНЫХ ШИН

Международный исследовательский комитет по релейной защите в мае 1953 г. в Стокгольме обсудил некоторые вопросы, связанные с релейной защитой различных элементов энергетических объектов. На совещании присутствовали представители 10 зарубежных стран. Несколько специальных совещаний было посвящено защите сборных шин энергетических установок.

В качестве общих положений, относящихся ко всем рассмотренным типам защит шин, отмечалось следующее:

1. Защита должна быстро отключать поврежденные шины от остальной части системы, что, как правило, диктуется требованиями устойчивой работы системы.

2. Защита должна быть чрезвычайно надежна и селективна, так как неправильное действие защиты шин может привести к тяжелым системным авариям, сопровождающимся большим недоотпуском электроэнергии потребителям.

Эти положения полностью совпадают с требованиями, которые предъявляются к защите шин в СССР. Однако в ходе дискуссии по рассмотренным ниже трем конкретным предложениям по осуществлению схем защиты шин были высказаны взгляды, несколько отличные от тех, которые считаются в СССР общепризнанными; были также приведены статистические материалы из опыта эксплуатации защит шин за несколько лет в Англии и Швеции.

Для более полного представления о дискуссии приведем краткое описание защит шин, которые рассматривались на совещании.

Защита с заземляющей шиной. Практика эксплуатации комплектных распределительных устройств показала, что почти все повреждения сборных шин этих устройств сопровождаются замыканиями на землю; для распределительных устройств с полностью разделенными фазами исключается возможность только междуфазовых повреждений. Для указанных распределительных устройств рекомендуется применение защиты шин с заземляющей шиной.

Металлические конструкции распределительного устройства должны быть изолированы от земли. В заземляющую цепь включается первичная обмотка трансформатора тока. При замыканиях на шинах, связанных с землей, защита срабатывает под воздействием тока нулевой последовательности, появляющегося в заземляющем проводе.

В качестве изоляции конструкции от земли может быть использован бетон, если в каркасе нет заземленных конструктивных и армирующих металлических частей. Если сопротивление изоляции бетонного фундамента не ниже 5..10 *ом*, то этого вполне достаточно для осуществления рассматриваемой защиты.

Учитывая тяжелые последствия, вызванные неселективной работой защит шин, целесообразно предусмотреть дополнительный пусковой орган, реагирующий на появление токов нулевой последовательности в цепях заземления нейтралей трансформаторов, приключенных к защищаемым шинам.

Дистанционная защита. На установках небольшой мощности нашли распространение полные дифференциальные защиты сборных шин генераторного напряжения. В качестве реагирующего элемента предусматривается реле сопротивления.

В целях снижения величин токов небаланса при повреждениях вне зоны защиты предлагается включение последовательно с токовой обмоткой реле в дифференциальной цепи активного сопротивления. Величина сопротивления ограничивается допустимыми значениями напряжений на вторичной обмотке трансформаторов тока при повреждениях на защищаемых шинах. Рассматриваются два варианта выполнения схемы: с применением дистанционного реле с нормально замкнутыми контактами и реле с нормально разомкнутыми контактами.

Дифференциальная защита шин с применением реле со «смещающим напряжением». Предлагается осуществление дифференциальной защиты шин с охватом всех присоединенных элементов. Реагирующее реле имеет две обмотки. Одна обмотка включается в дифференциальную

цепь и создает на подвижном элементе реле вращающий момент в сторону замыкания контактов.

Другая обмотка, обтекаемая током повреждения как при внешних повреждениях, так и при коротких замыканиях на защищаемых шинах, создает тормозной момент в сторону размыкания контактов. Исходя из принципа работы реле, защиту правильнее было бы назвать: полная дифференциальная защита шин с применением реле с тормозной характеристикой. В целях упрощения схемы и создания стабильной характеристики реле, не зависящей от токораспределения между отдельными элементами, в схеме применены сухие выпрямители. При помощи этих выпрямителей обеспечивается отбегание тормозной обмотки реле арифметической суммой токов отдельных элементов как при сквозных повреждениях, так и при коротких замыканиях в зоне защиты. На рисунке показано в качестве примера токораспределение в цепях защиты при повреждениях вне защищаемой зоны.

Принцип работы рассматриваемой схемы основан на том, что при внешних коротких замыканиях, когда рабочая обмотка реле обтекается только током небаланса, обусловленным неидентичностью трансформаторов тока, создаваемый тормозной момент обеспечивает надежное несрабатывание реле. При повреждениях в зоне через рабочую обмотку протекает вторичный ток короткого замыкания, создающий момент в сторону замыкания контактов реле, значительно превышающий тормозной момент. Указанное соотношение моментов обеспечивается соответствующим выбором числа витков рабочей и тормозной обмоток.

Из перечисленных вариантов в СССР нашла распространение только дистанционная защита шин с некоторыми изменениями по сравнению с рассмотренной схемой. Так, например, в целях экономии трансформаторов тока применяется так называемая неполная дифференциальная защита шин генераторного напряжения с включением реле на сумму токов питающих элементов. Селективность защиты при повреждениях на питаемых элементах обеспечивается соответствующим согласованием с защитами этих элементов по чувствительности и времени. Опыт эксплуатации таких защит в СССР подтвердил целесообразность этого выполнения: чувствительность остается удовлетворительной во всех возможных режимах работы, а небольшая выдержка времени защиты, как правило, не сказывается на устойчивой работе системы.

Защита с заземляющей шиной эффективна для комплектов распределительных устройств при условии полного разделения фаз и для сетей с большими токами замыкания на землю. В СССР распределительные устройства генераторных напряжений мощных станций, как правило, выполняются сборными, и сети этих напряжений работают с малыми токами замыкания на землю. Поэтому эта защита у нас в настоящее время не применяется.

Определенный интерес представляет защита на реле со «смещающим» напряжением. Если при защите шин генераторного напряжения обычно не возникает затруднений в части обеспечения достаточной чувствительности защиты, то при выполнении защит шин напряжением 35 кВ и выше иногда приходится допускать низкие коэффициенты чувстви-

тельности в минимальных режимах работы системы. Применение защиты с тормозной характеристикой в этом случае позволило бы существенно повысить чувствительность.

Однако, рассматривая это предложение по существу, необходимо отметить, что применение в схемах защиты сухих выпрямителей может вызвать затруднения, которые не отмечались на совещании: возможность длительного отсутствия отбегания током выпрямителя (например, при отключенном для ревизии элементе), как известно, сильно влияет на его характеристики и может привести к нарушению его правильной работы в дальнейшем. С этой точки зрения представляется целесообразным применение принципа магнитного торможения: создание тормозной характеристики при помощи промежуточных трансформаторов, сердечник которых подмагничивается токами питающих элементов.

В ходе последующей дискуссии были высказаны следующие заслуживающие внимания положения.

Место расположения отдельно стоящих трансформаторов тока. В цепях секционных выключателей считать целесообразным установку трансформаторов тока с двух сторон выключателя. Это обеспечивает быстрое отключение повреждения в зоне между трансформаторами тока и этим выключателем. Однако, в случае затруднения с установкой двух комплектов трансформаторов тока, считать возможным установку трансформаторов тока только с одной стороны. Для обеспечения отключения повреждений в зоне между трансформаторами тока и выключателем в этом случае предлагается заводить вторичные цепи от этих трансформаторов через блок-контакты секционного выключателя. Таким образом, после отключения рассматриваемого вида повреждения комплектом защиты одной секции нарушается баланс токов в цепях защиты шин другой секции, чем обеспечивается ее действие. На отходящих элементах, по общему мнению участников совещания, целесообразно устанавливать выносные трансформаторы тока со стороны линии, имея преимущество в их использовании при петлевании выключателя и обеспечивая работу защиты шин при повреждениях между выключателем и трансформаторами тока.

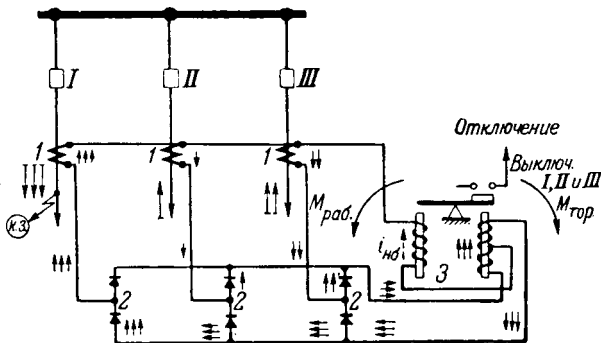
Однако представитель Англии твердо высказался за установку трансформаторов тока между выключателями и сборными шинами. Свою позицию он обосновал необходимостью частых ремонтов воздушных выключателей, когда предлагаемая им схема позволит быстрее заменить выключатель линии обходным или шиносоединительным выключателем, сохраняя при этом питание цепей защиты от тех же трансформаторов тока.

Повышение надежности отключающих цепей. Для повышения надежности защиты шин в целом предлагается выполнение в приводах выключателей отдельных отключающих катушек, на которые действует только защита шин.

Считается целесообразным применение для отключения каждой цепи от защиты шин отдельного промежуточного реле. Этим устраняется возможность отключения группы элементов при случайном срабатывании выходного промежуточного реле защиты шин.

Целесообразность установки специальной защиты шин. В ряде стран: Швеции, Норвегии, Швейцарии, Бельгии и Германии, специальные защиты шин применяются редко. Обычно функции отключения поврежденных шин возлагаются на вторые и третьи ступени защит присоединенных элементов. При этом была высказана мысль о большей целесообразности применения отдельных защит шин на низких (3...6...10 кВ) и средних (20...35 кВ) напряжениях, где более широко применяется секционирование сборных шин. Совещание сочло целесообразным выполнение защиты шин из двух комплектов: от междуфазных коротких замыканий и замыканий, связанных с землей. При этом учитывалось, что комплект защиты от замыканий на землю в некоторых случаях может быть выполнен с меньшей выдержкой времени, чем защита от междуфазных повреждений, например, если защита выполнена с охватом только питающих элементов.

Статистические данные о повреждениях на сборных шинах. Приводятся статистические данные по различным видам повреждений на сборных шинах в Англии и Швеции (табл. 1 и 2). Анализ этих данных показывает, что повреждения воздушных выключателей представляют основной вид повреждения на сборных шинах (до 44% от общего числа



Токораспределение в цепях защиты шин с использованием реле со «смещающим» напряжением при повреждении вне зоны защиты.

1 — трансформаторы тока; 2 — твердые выпрямители; 3 — реле с тормозной характеристикой; $I_{нб}$ — ток небаланса, обусловленный неидентичностью характеристик трансформаторов тока.

Таблица 1

Статистика повреждений на сборных шинах одной из энергосистем Англии

Причина замыкания на шинах	Вид замыкания						Всего по данной причине, %
	Между фазой и землей	Между двумя фазами и землей	Между тремя фазами и землей	Трехфазные	Различные	Всего	
Перекрытие (из-за разных причин)	19	5	1	—	—	25	29,4
Повреждение изоляции распределительного устройства	13	2	—	—	1	16	18,8
Забывшие или неправильно переставленные заземления	3	1	7	—	—	11	12,9
Отключения разъединителей под нагрузкой	4	1	3	1	—	9	10,6
Пробой изоляции (не в распределительном устройстве)	3	1	1	3	—	8	9,4
Случайное прикосновение (человека)	5	—	2	—	—	7	8,3
Падение посторонних предметов	4	1	—	1	—	6	7,1
От прочих и неизвестных причин	—	1	—	1	1	3	3,5
Всего по каждому виду замыкания	51	12	14	6	2	85	
Всего по каждому виду замыкания, %	60	14	16,6	7,1	2,3	100	

Таблица 2

Статистика повреждений на сборных шинах в шведских сетях 220 и 130 кВ за период 1946—1952 гг.

Причина замыкания на шинах	Сеть 200 кВ						Сеть 130 кВ						Всего				Всего по данной причине, %
	X			D			X			D			1+2+3				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Перекрытие	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	2	5
Повреждение выключателя	2	1	1	5	1	1	5	—	—	4	—	—	16	2	2	20	44
Повреждение трансформатора тока	—	—	—	—	—	—	2	—	—	1	—	—	3	—	—	3	7
Пробой изоляции распределительных устройств	2	—	—	—	—	—	3	—	—	1	—	—	6	—	—	6	14
Повреждение изоляции	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	1	—	—	1	2
Забывшие или неправильно переставленные заземления	—	—	—	3	—	1	—	—	—	—	—	—	3	—	1	4	9
Отключение разъединителей под нагрузкой	1	—	—	—	—	1	3	—	1	—	—	—	4	—	2	6	14
Разные причины	—	—	—	—	—	—	1	—	—	1	—	—	2	—	—	2	5
Всего по каждому виду замыкания	5	1	1	8	1	3	15	1	1	8	0	0	36	3	5	44	
Всего по каждому виду замыкания, %	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	82	7	11	100	

Примечания: X — нейтраль заземлена через реактивное сопротивление; D — нейтраль заземлена наглухо; 1 — однофазное замыкание; 2 — двухфазное замыкание; 3 — трехфазное замыкание.

повреждений). В связи с этим небезинтересно отметить высказывания некоторых делегатов о целесообразности изменения конструкции воздушных выключателей. В частности, делегат Бельгии предлагал исключить из конструкции выключателя разъединяющий нож.

Большой процент повреждений (до 14%) дают аварии, связанные с отключением разъединителей под нагрузкой. Около 10% повреждений от общего их числа составляют

включения на неснятые после ремонта закорачивающие устройства на сборных шинах. Высокий процент (около 14%) падает на повреждения изоляции распределительных устройств. Оставшийся процент коротких замыканий составляют различные редкие виды повреждений: порча трансформаторов тока, падение посторонних предметов и т. п.

(CIGRE, докл. 325, 1954).

Инж. Н. Е. Рибель

ПРОЕКТ СОЕДИНЕНИЯ АНГЛИЙСКИХ И ФРАНЦУЗСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Как уже сообщалось в журнале «Электричество» [Л. 1 и 2], в течение нескольких лет в Англии и во Франции ведутся проектные и исследовательские работы по подводным кабелям, целью которых является осуществление постоянной электрической связи между французской и английской энергосистемами путем прокладки подводного силового кабеля через Ламанш [Л. 3]. Прежде всего был изучен опыт эксплуатации подводных кабелей связи, применяемых уже более века, а также силовых подводных кабелей. Основные данные некоторых подводных кабельных линий, представляющих интерес по напряжению, передаваемой мощности или другим показателям, приведены в табл. 1.

Применяются различные конструкции подводных силовых кабелей. Так, в Голландии применен одножильный освинцованный бронированный кабель на 50 кВ с медными проволоками, расположенными под свинцовой оболочкой для уменьшения потерь от вихревых токов в броне и оболочке [Л. 4]. Проложенный в Канаде кабель 69 кВ имеет жилу овального сечения, причем для уменьшения температурного перепада в изоляции для жилы кабеля принята значительно более низкая температура, чем принимается обычно для подземных кабелей. Для проектируемой в Канаде подводной линии на о. Ванкувер намечено применить кабель 138 кВ с полым проводником и с подачей газа под давлением, причем давление газа выбрано равным 21 ата, так как давление воды в самой глубокой точке трассы составляет 20 ата [Л. 5]. Для шведской линии 100 кВ постоянного тока первоначально предполагалось использовать одножильный освинцованный кабель с возвратом тока через свинцовую оболочку кабеля, но затем из опасения коррозии от этой мысли отказались. Для использования морской воды в качестве обратного провода устроены специальные электроды, расположенные на расстоянии 10... 12 км от кабеля.

Рассмотрены два варианта кабельных линий между Францией и Англией на напряжения 132 и 275 кВ при мощности соответственно 100 тыс. кВт и 400 тыс. кВт. Стоимость всей передачи при варианте 132 кВ оценивается в 4 300 тыс. фунт. стерл., при капиталовложениях на 1 передатный киловатт 43 фунта стерл.; для 275 кВ получены соответственно суммы 11 500 тыс. фунт. стерл. и 29 фунт. стерл.

Учитывая соотношение капиталовложений, а также меньший объем исследований, необходимых для осуществления линии 132 кВ, было выбрано это напряжение. Кабель предполагается проложить по самой короткой трассе, длиной (от берега до берега) 38,4 км; самая глубокая точка трассы (66 м) расположена приблизительно в середине. Наибольшая амплитуда прилива составляет 6,2 м; максимальная скорость течения прилива 3,6 узла. Средняя температура воды в Па-де-Кале: зимняя 7°С, летняя 17°С.

Условия прокладки и работы кабеля заставили претерпеть изготовителям кабеля следующие основные требова-

ния: минимальное количество соединений, которые придется выполнять в море во время прокладки; конструкция эластичной муфты, которая ни по диаметру, ни по электрическим и механическим свойствам практически не отличалась бы от самого кабеля; для соединения кабеля в море после возможной аварии должна применяться жесткая муфта, обеспечивающая быстрое и надежное выполнение соединений даже в плохую погоду; броня кабеля должна надежно защищать его от истирания и механических повреждений во время укладки и подъема; повреждение в любом месте оболочки не должно приводить к проникновению значительного количества воды в изоляцию и др.

Английскими и французскими заводами были представлены предложения на несколько типов кабелей. Данные о семи типах одножильных кабелей приведены в табл. 2.

По английским данным кабели, приведенные в первых четырех столбцах табл. 2, могут на постоянном токе пропустить по 430..450 тыс. кВт (по двум кабелям) при снижении максимальной температуры жилы с 85°С (при переменном токе) до 60°С.

Для проведения испытаний на опытном участке в море у английского берега, в 3 км от Дувра было изготовлено три отрезка кабеля на 132 кВ с внешним давлением газа (два — английскими и один — французским заводом), общей длиной 2 км, которые были соединены муфтами, уложены на дно и испытаны в июле — сентябре 1953 г. Эти кабели имеют медную жилу 323 мм², окруженную пропитанной бумагой общей толщиной 12,7 мм. Далее располагаются: обмотка из медной ленты; зазор для газа шириной 1,2 мм; оболочка толщиной 3,5 мм из сплава свинца с 0,4% олова и 0,2% сурьмы; три слоя ленты из луженой бронзы; обмотка из двух слоев гудронированной хлопчатобумажной ленты с прослойкой из вулканизированной резины между ними; джутовая подкладка под броню, проволоочная броня из алюминиевого сплава и двухслойная обмотка из джута. Наружный диаметр кабеля 91,5 мм.

Соединение отдельных отрезков кабелей в море было выполнено в первый раз за 56, во второй — за 34, в третий — за 26 час при хорошей погоде. В бурную погоду выполнить соединение не удалось; конец кабеля был заделан и опущен в воду с привязанным к нему буюм. Попытки использовать телевидение под водой для обнаружения кабеля оказались неудачными из-за плохого освещения и сложности настройки оптики. Кабель испытывался напряжением 300 кВ, а затем 400 кВ постоянного тока.

Опасность истирания брони настолько серьезна, что следует рекомендовать применение стальной проволоки вместо проволоки из алюминиевого сплава, несмотря на увеличение потерь, так как сталь изнашивается в 6 раз медленнее. На заводах-изготовителях в Англии опытные отрезки кабелей и соединительные муфты подвергались полному испытанию и дополнительным исследованиям. Гибкая соединительная муфта, имеющая тот же диаметр, что и кабель, была выполнена путем сваривания как отдельных проводников жилы, так и свинцовой оболочки. Импульсная прочность такого соединения оказалась равной

Таблица 1

Некоторые подводные силовые кабельные линии

Местоположение кабельной линии	Тип кабеля	Год прокладки	Напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВА	Длина подводного участка, км	Сечение жилы, мм ²	Вес 1 пог. м, кг
Швеция — Дания	Трехжильный плоский маслянонаполненный	1951	120...132	65 000	5,5	185	40,5
Швеция — о. Готланд	Одножильный с вязкой пропиткой в двойной свинцовой оболочке	1953	100 (постоянный ток)	20 000	96	90	8,6
Дания (Алссунд)	Трехжильный плоский маслянонаполненный	1951	60...66	37 000	2,2	150	22,7
Канада, р. Св. Лаврентия (строится)	Одножильный с вязкой пропиткой	1954	69	75 000	51	251	—
Швеция — Дания	Трехжильный с вязкой пропиткой	1929 1931	50	2×17 000	5,5	95	39
Голландия, устье р. Шельды	Одножильный с вязкой пропиткой	1950	50	25 000	5,7	120	17

Таблица 2

Данные некоторых одножильных кабелей 132 кв

Наименование величины	Английские				Французские			
	с внешним давлением газа	пропитанный, с внутренним давлением газа	маслонаполненный	с внутренним давлением газа	с внешним давлением газа	пропитанный, с внутренним давлением газа	маслонаполненный	
Сечение жилы, мм ²	485	470	387	516	123	155	542*	
Броня	Проволока из алюминиевого сплава Ø 5,9 мм				Стальная проволока Ø 8 мм			
Наружный диаметр, мм	100	89,2	96	91,5	80	89,6	108	
Вес, кг/м	23,7	18	19,5	18,6	19	20,4	35	
Число кабелей	3	3	3	3	3	3	3	
Максимальная напряженность поля, кв/см	100	100	100	100	125	85	120	
Номинальный ток, а	1 110	1 095	1 090	1 095	470	500	1 140	
Номинальная мощность, мгва	254	250	250	250	107	114	250	
Длина, км	42	42	42	42	45	45	45	
Потери при полной нагрузке, квт	в жиле	6 900	7 200	8 800	6 480	5 370	4 680	7 420
	в изоляции	330	260	440	340	160	150	460
	в оболочке	3 740	5 080	3 840	4 810	3 320	3 450	14 020
Полные потери, квт	10 970	12 540	13 080	11 630	8 850	8 280	21 900	
Зарядный ток, а	358	280	455	354	230	166	670	
Реактивная мощность, мгвар	82	64	104	81	52,5	38	153	

* Изготовление кабеля такой конструкции при меньшем сечении затруднительно из-за наличия центрального канала.

550 кв, что несколько ниже обычного уровня для сетей 132 кв, составляющего 640 кв.

Во Франции, помимо испытаний на заводах, также предусматривается проведение испытаний на опытном участке в море, в районе Булони, и, кроме того, на исследовательской установке высокого напряжения в Фонтене. Опытный отрезок подводного кабеля длиной 440 м был уложен на дно в декабре 1953 г.; результаты его исследования еще не опубликованы.

Конструкция опытных кабелей 132 кв, изготавливаемых и исследуемых во Франции, в основном не отличается от английской, за исключением применения брони из стальной, а не алюминиевой проволоки, карбонизированной бумаги вместо металлизированной и прокладки в толще свинцовой оболочки нескольких пар для сигнализации, в связи с чем жила кабеля приобретает овальное сечение. Кабель для испытаний в море имеет сечение 123 мм² и наружный диаметр 87 мм; в Фонтене испытывается кабель сечением 380 мм².

Предварительные результаты исследований на французских кабельных заводах показывают возможность изготовления кабеля, имеющего в лабораторных условиях повышенную электрическую прочность, пробой изоляции которого происходит при напряжениях порядка 400 кв/см. Для двух типов кабелей оказалось возможным изготовление гибких соединений, электрическая прочность которых практически равнялась прочности самого кабеля.

Испытания в Фонтене имеют целью дополнить заводские испытания и произвести сопоставление кабелей различных заводов в строго одинаковых условиях. Электрические испытания выполняются как при включении образцов кабелей в сеть 225 кв, так и при подаче напряжения от испытательных установок. Для определения срока службы кабеля опытный отрезок подводного кабеля 132 кв включен в сеть 225 кв, что дает повышение напряженности поля по сравнению с номинальной в 1,7 раза. Испытания подземных кабелей обычно проводятся с коэффициентом запаса 1,5; для подводного кабеля, естественно, необходима повышенная надежность. Некоторые образцы длительно включены на трехкратное напряжение между жилой и оболочкой кабеля, равное 225 кв. Отрезки кабелей включаются в сеть через концевые муфты на 225 кв, так как считается, что концевые муфты на 132 кв исследованы настолько детально, что нет необходимости подвергать их новым исследованиям.

Импульсные испытания охватывают как сами кабели, так и гибкие соединения. При механических испытаниях кабели многократно подвергаются воздействиям, имитирующим условия перевозок, прокладки и эксплуатации кабелей. В частности, предусмотрено растяжение прямых отрезков кабелей при усилиях до 10 т и навивание кабелей на барабаны диаметром 2...2,8 м. После нескольких циклов механических испытаний будет детально исследоваться состояние поверхностной брони и промежуточных слоев металлической ленты, свинцовой оболочки, а также изоляции кабеля. Испытания в Фонтене начались в октябре 1953 г. и должны продолжаться до лета 1954 г.

Проложенный в море опытный участок кабеля был успешно испытан напряжением 400 кв постоянного тока. Предусмотрено также испытание на нагрев при пониженном напряжении.

Проводятся исследования условий параллельной работы, целью которых является установление для каждой страны соотношения между мощностью и частотой при различных условиях генерирования энергии и нагрузки, а также определение связи между значениями обменной мощности при соединении сетей и отклонением частоты при их разделении.

Для этих опытов сеть в каждой стране разделялась на две части, связанные между собой только одной линией. Предварительные результаты показывают, что отклонению частоты на 0,1 гц в Англии соответствует изменение мощности на 300 тыс. квт, а во Франции — на 100 тыс. квт. Для поддержания нормальной параллельной работы понадобится автоматическое регулирование обменной мощности. В качестве одного из возможных решений рассматривался также вариант отделения от общеанглийской сети юго-восточного района, связанного с французской сетью.

Считают, что с точки зрения изготовления кабеля линия могла бы быть построена уже к 1957 г. Однако проблему выполнения соединений отдельных отрезков кабеля как при прокладке, так и при ремонте, еще нельзя считать решенной, тем более, что в зимние месяцы море почти не бывает спокойным. Повидимому, может оказаться необходимой предполагаемая прокладка четвертого резервного кабеля.

Литература

1. А. И. Гершенгорн. Электричество, стр. 89, № 6, 1954.
2. Я. М. Червоненкис. Электричество, стр. 88, № 7, 1954.
3. D. P. Sayers, M. Laborde, E. J. Lane. Bull. SFE, стр. 153, т. IV, 1954.
4. El. Times, т. 122, стр. 310, № 3172, 1952.
5. El. Times, т. 125, стр. 510, № 3257, 1954.

Инж. Н. Н. Антошин

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Увеличение передаваемых мощностей и дальности передачи электрической энергии потребовало повышения напряжения линий электропередачи, так как их пропускная способность пропорциональна квадрату рабочего напряжения. При этом стоимость линейного и подстанционного оборудования растет вместе с ростом напряжения несколько быстрее, чем в первой степени. Поэтому при увеличении напряжения экономически целесообразно предельное использование линий по пропускной способности.

Эти обстоятельства вызвали необходимость применения для линий весьма высоких напряжений проводов большой пропускной способности по току. Наряду с этим необходимо ограничение потерь на корону в самих линиях и помех, причиняемых ими радиоприемным устройствам, вызвали более интенсивный рост диаметра провода, чем это требуется для обеспечения экономического сечения. Это привело к разработке специальных конструкций проводов с увеличенным внешним диаметром: с бумажным заполнением и полых. Весьма эффективным оказалось также применение расщепленных фаз из проводов обычной конструкции.

Полые провода изготавливаются только из меди, так как распространению полых проводов из алюминия препятствует их недостаточная прочность. Несмотря на высокую стоимость полых медных проводов, их применение может оказаться целесообразным при тяжелых атмосферных условиях, так как благодаря их гладкой внешней поверхности потери на корону для таких проводов сравнительно невелики.

Провода с бумажным заполнением обычно изготавливаются с алюминиевыми жилами и стальным сердечником. Сконструирован такой провод без стального сердечника. Диаметр его равен 51,5 мм, прочность на разрыв составляет 18 600 кг.

В настоящее время наиболее экономичным проводниковым материалом для линий весьма высокого напряжения является алюминий. Поэтому представляет интерес сравнение характеристик и стоимостей одиночных и расщепленных сталеалюминиевых проводов.

Применение одиночных проводов большого диаметра требует разработки специальной линейной арматуры. Для транспортировки таких проводов требуются большие и тяжелые барабаны. С другой стороны, стоимость опор при расщепленных проводах выше и поэтому общая стоимость сооружения линии оказывается на 18...30% больше, чем при одиночных проводах. Несмотря на это, преимущество оказывается на стороне расщепленных проводов, так как натуральная мощность линии с расщепленными проводами превышает натуральную мощность линии с одиночными проводами равного сечения на 20...43%.

Произведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить размеры и характеристики одиночных и расщепленных проводов для линий 400 кВ, при которых потери на корону достаточно малы по сравнению с общими потерями. Обычно потери на корону составляют 10...25% от общих потерь энергии в линии. Дальнейшее их снижение не дает существенных экономических выгод. Поэтому в настоящее время потери на корону не оказывают заметного влияния на выбор сечения проводов для линий весьма высокого напряжения.

Сравнение расщепленных проводов с одиночными проводами равного сечения дает следующие результаты. При расщеплении фазы на 2...4 провода индуктивность линии на 25...30% меньше, предельная передаваемая мощность на 25...30% больше. Емкость линии при расщеплении на 2 части больше на 20...23%, при расщеплении на 3 части больше на 23...31%, при расщеплении на 4 части больше на 32...38%. Увеличение емкости линий при расщеплении проводов позволяет уменьшить установленную мощность синхронных компенсаторов в электрической системе, необходимую для выдачи реактивной мощности. Пропускная способность расщепленных проводов по нагреву благодаря большей поверхности излучения на 30...47% больше, чем у одиночных.

Соотношение между потерями на корону в плохую и хорошую погоду равно 10...20 для расщепленных проводов

и 30...60 для одиночных. Удельные потери на корону для трехфазных линий 380...440 кВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Удельные потери на корону для трехфазных линий сверхвысокого напряжения

Погода	Напря- жение, кВ	Удельные потери, <i>квт/км</i> , при диаметре провода, <i>мм</i>		
		42	50	4×25
Хорошая	380	1,1—3,2	0,8—2,4	0,8—2,4
"	400	1,6—4,8	1,1—3,2	1,1—3,2
"	440	4—11,2	2,4—7,2	1,9—5,6
Туман	440	8—12,8	8—12,8	4,8—8
Дождь	440	240—720	240—720	48—160

Для линий напряжением выше 220 кВ с расщепленными фазами существенную роль играет расстояние между проводами. При увеличении расстояния между проводами от 20 до 40 см изменение потерь на корону незначительно. При дальнейшем увеличении расстояния потери на корону растут быстрее и при расстояниях более 80 см в несколько раз превышают величину потерь при расстоянии 20 см.

Выбор расстояния между проводами расщепленной фазы зависит и от местных условий. При интенсивной гололедной нагрузке для устранения скручивания и касания проводов целесообразно провода расщепленной фазы располагать по горизонтали.

Для расщепленных проводов диаметром 26 мм при расстояниях 40...45 см потери на корону близки к минимуму. В то же время при таких расстояниях удается избежать чрезмерного количества расщеплений между проводами фазы. На шведской линии 380 кВ при расстоянии между проводами фазы 45 см выбирается следующее количество расщеплений на пролет:

при длине пролета	0—130 м	0
"	130—260 "	1
"	250—390 "	2
"	390—520 "	3

Автор статьи считает, что для линий 220...287 кВ в некоторых случаях целесообразно расщепление проводов на 2 части. По мнению автора, для линий 380...440 кВ целесообразно расщепление проводов на 4 части.

Представляют интерес приведенные в табл. 2 результаты предварительной оценки потерь на корону для проектируемых и сооруженных линий электропередачи, полученные в различных странах на основе измерений на опытных пролетах линий. При этом следует отметить хорошее совпадение значений потерь на корону по различным источникам.

В табл. 3 приведены относительная мощность потерь и потери энергии на корону для линий с различными проводами.

Помехи радиоприему возникают в непосредственной близости от коронирующей линии электропередачи и обусловлены главным образом высокочастотным разрядом, происходящим на шероховатой поверхности провода во время положительной полуволны напряжения. Отрицательные разряды, являющиеся источником потерь, так же как и положительные, оказывают меньшие помехи приему радио.

Измерение радиопомех более затруднительно, чем измерение потерь на корону, так как помехи еще более неустойчивы. Уровень помех зависит не только от погоды и напряжения линий электропередачи, но и от частоты, расстояния от линии до приемной антенны, типа антенны и приемного устройства. Проблема радиопомех не может рассматриваться в настоящее время как вполне решенная и заслуживает дальнейшего исследования. Однако проведенные исследования позволяют установить некоторые приближенные соотношения. Средние помехи в радиовещательном диапазоне при изменении погоды могут изменяться в пределах 1:5, но отдельные значения могут существенно превышать эти пределы.

Таблица 2

Потери на корону для линий электропередачи сверхвысокого напряжения

Наименование линии	Шевилье (Франция)		Харспренгет—Халлсберг (Швеция)		Экспериментальная линия Тидд (США)	
	Напряжение, кв	400		380		400
Длина, км	400		960		—	
Тип провода	Сталеалюминиевый, 2×413 мм ² , Ø 26,4 мм		Сталеалюминиевый Ø 48,3 мм	Сталеалюминиевый 2×413 мм ² , Ø 31,8 мм	Медный полый Ø 42 мм	Сталеалюминиевый Ø 51 мм
Расстояние между фазами, м	14,5	14,5	14,5	12	13,7	13,7
Расстояние между проводами в фазе, см	40	60	—	45	—	—
Годовые потери энергии, млн. квт-ч	8	16	16	19	—	—
Средняя мощность потерь, квт/км	2,5	5	5	2,5	3	2,5

Таблица 3

Относительная мощность потерь и потери энергии на корону

	Франция			Швеция	Америка	
	Количество проводов в фазе и диаметр провода, мм	2×26,4	2×26,4	1×48	1×32,3	1×42
Материал провода	Сталеалюминий	Сталеалюминий	Сталеалюминий	Сталеалюминий	Медный полый	Сталеалюминий
Расстояние между проводами расщепленной фазы, см	40,7	56	—	45,7	—	—
Натуральная мощность, мвт	450	505	405	485	385	395
$\frac{\text{Мощность потерь на корону}}{\text{Натуральная мощность}}$, %	0,2	0,4	0,5	0,2	0,5	0,25
$\frac{\text{Мощность нагрузочных потерь}}{\text{Натуральная мощность}}$, %	5,5	5,6	4,5	3,4	3,8	4,7
$\frac{\text{Потери энергии на корону}}{\text{Передаваемая энергия}}$, %	0,4	0,8	1,0	0,4	1,0	0,5
$\frac{\text{Нагрузочные потери энергии}}{\text{Передаваемая энергия}}$, %	3,7	3,8	3,0	2,3	2,5	3,1

В первом приближении радиопомехи обратно пропорциональны частоте. Приближенная зависимость относительных радиопомех k от расстояния между линией электропередачи и приемной антенной l следующая:

l	k
0 м	100
30 "	15
60 "	5

Уровень помех порядка 50 мкв/м, соответствующий средним значениям, измеренным вблизи линий 220 кв, может рассматриваться как приемлемый. Такой уровень помех может быть достигнут на линиях 380...400 кв на рас-

стоянии 60 м от оси линии при подвеске расщепленных проводов диаметром 40,5 мм или одиночных проводов диаметром 51 мм. При плохой погоде эти условия меняются мало. Интенсивное поле помех обнаруживается только в непосредственной близости от линии или под линией.

Можно считать, что в настоящее время могут быть сооружены линии 400 кв с приемлемым уровнем радиопомех. Однако в некоторых случаях при определении предела рабочего напряжения радиопомехи могут иметь большое значение.

(R. G. Wolff. Modern Power Engineering, т. 47, № 2, 1953)

Инж. В. А. Волькенану и инж. А. И. Гершенгорн

ДУГА В НИЗКОВОЛЬТНЫХ УСТАНОВКАХ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДАХ

Поводом к проведению исследования послужили возникшие во время гроз пожары, вызванные дуговыми разрядами во вводах сети низкого напряжения, проходящих через крышу по стропилам зданий.

Исследованное устройство присоединялось к параллельно включенным трансформатору 70 *кВА* на напряжение 250 или 380 *В* (через линию длиной 1 *км*) и импульсному генератору. Трансформатор защищался соответствующим разрядником. Электронными осциллографами регистрировались напряжение на дуге, импульсный ток и сопровождающий ток дуги 50 *Гц*. При напряжении 380 *В* ток составлял около 300 *А*, при 250 *В* — около 200 *А* (отстающий $\cos \varphi \approx 0,6$). Импульсный ток 1 600...4 100 *А* соответствовал условиям прямого удара в линию на некотором расстоянии от дома. При всех описанных ниже исследованиях сечение медных проводов составляло 6 *мм*².

Условия возникновения дуги между двумя медными голыми проводами на открытом воздухе. При напряжении сети 380 *В* и импульсном токе 1 600 *А* длительностью 7 *мксек* было найдено, что если импульс происходит вблизи перехода кривой напряжения 50 *Гц* через нуль, то дуга не возникает. Если же зажигающий импульс происходит вблизи амплитуды синусоиды напряжения, то при расстоянии между проводами до 30 *мм*, независимо от соотношения полярностей полуволны напряжения сети и импульса, возникает дуга 50 *Гц*. При исследованном опытным устройстве, в котором провода питались снизу и шли почти параллельно вверх на 100 *мм*, слегка расходясь кверху и загибаясь наверху в виде рогов, дуга горела 1..6 полупериодов и сама гасла. На проводах оставались слабые следы ожога. При расстоянии между проводами 50 *мм* при отрицательном импульсе в отрицательный полупериод сетевого напряжения дуга не загоралась. В положительный же полупериод дуга возникала при 60% импульсных разрядов только близ амплитуды синусоиды; из них в 40% случаях дуга горела один полупериод и в 20% — 2...3 полупериода. Автор считает, что и при промежутках свыше 50 *мм* возможно зажигание дуги. Увеличение импульсного тока до 3 000 *А* и длительности импульса до 40 *мксек* вызывало небольшое увеличение вероятности возникновения дуги 50 *Гц* при промежутке 50 *мм*. При напряжении сети 250 *В* возникновение дуги длительностью больше полупериода уже при искровом промежутке 1 *мм* происходило только в 50% случаев, а при искровых промежутках 4 и 16 *мм* — только в 10% случаев. При искровом промежутке 30 *мм* дуга возникала длительностью не больше полупериода только на амплитуде синусоиды при разных полярностях импульса и полуволны синусоиды. При опытах между голыми проводами исследовалось влияние подключения параллельно дуге активного сопротивления 14 *Ом*, соответствующего нагрузке 10 *кВт*, и емкости 1 000 *нФ*, соответствующей средней емкости проводки до-

ма. Емкость не оказала заметного влияния на исследуемый процесс. При активной нагрузке дуга гасла в большинстве случаев в первый полупериод, так как вследствие сильного уменьшения амплитуды и скорости восстановления напряжения на исследуемом промежутке после погасания дуги повторные зажигания дуги затруднялись.

При разрядах между торцами медных проводов дуга устойчиво горела 10...35 периодов при напряжениях 250 и 380 *В*, пока концы проводов не отгорали настолько, что дуга выдувалась, образовывала петлю и гасла.

Разряд между изолированным медным проводом с поврежденной изоляцией и стальной трубой. При напряжении сети 380 *В* и повреждении изоляции в виде 8-мм отверстия между проводом и неоцинкованной трубой возникала дуга длительностью 20...30 периодов, пока голый провод не расплавлялся. При этом дуга гасла из-за дугогасящих свойств изоляции. В стенке трубы толщиной 3 *мм* выжигалось отверстие. Оцинковка трубы несколько уменьшала вероятность зажигания дуги, но не исключала возможность ее развития в полной мере, как описано выше. При напряжении сети 250 *В* при неоцинкованной трубе большей частью возникал только кратковременный ток (один полупериод); при очень малом расстоянии от провода до трубы иногда наблюдалось сваривание провода и трубы. Оцинковка трубы исключала возникновение дуги длительностью больше одного полупериода.

Разряды между параллельными проводами с поврежденной изоляцией. (Расстояние между проводами 1 *мм*.) При повреждении в виде пореза длительность тока дуги 50 *Гц* не превосходила одного полупериода (при напряжении 380 *В*). При повреждении в виде 8-мм отверстия дуга горела до тех пор, пока голый участок провода не расплавлялся, после чего она гасла дугогасящими свойствами изоляции. Длительность дуги при резиновой изоляции достигала 11 периодов, при термопласте — 2 1/2 периода.

Разряды между голыми медными проводами через узкие щели в изолирующем материале. В этих опытах использовалась четырехканальная изолирующая труба, как это рекомендуется швейцарскими пожарными органами в последней модели ввода сети низкого напряжения в дом. Если ширина щели в изолирующем материале не превосходила 1,5 *мм*, длительность дуги при 380 *В* не превосходила полупериода. При большем размере щели дуга горела длительно.

Исследование разрядов между рядом предохранителей. При перекрытиях между рядом стоящими предохранителями открытого типа возникла дуга длительностью 5..6 периодов при 380 *В*. При предохранителях, снабженных изолирующими кожухами, узкие щели гасили дугу за полупериод.

(W. Вагманн. Bull. ASE, т. 45, стр. 465, № 12, 1954)

Кандидат техн. наук Е. В. Калинин

Заметки и письма

К ВЫРАЖЕНИЮ ЗАКОНА БИО И САВАРА

В журнале „Электричество“ № 8, 1954 г. напечатана статья „К выражению закона Био и Савара“ кандидата физико-матем. наук В. М. Южакова. В аннотации к ней сказано: „Дается математическое выражение закона Био и Савара в виде формулы, отличной от принятой“. Она записана так:

$$d\vec{H} = \frac{IdS}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}. \quad (1)$$

Кстати, заметим, что левая часть ее дается в векторной, а правая — в скалярной форме записи.

Происхождение этой формулы можно легко объяснить. В курсе физики „Электричество и магнетизм“ Е. А. Штрауфа [Л. 1] в разделе электростатики подобного рода формула

(стр. 319) выводится, а в разделе электромагнетизма устанавливается по аналогии следующее выражение (в системе CGSM):

$$H = \frac{M_m}{\mu r^2} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}. \quad (2)$$

Как пишет автор [Л. 1]: „Эта же формула может служить для расчетов поля и в том случае, когда магнитным моментом обладает каждая единица объема какой-либо среды или каждая единица какой-либо поверхности. В последнем случае будет иметься так называемый магнитный листок“.

«В случае контура с током, — пишут С. Э. Фриш и А. В. Тиморева [Л. 2], — его магнитный момент определяется его током *I* и площадью *S*».

Согласно теореме Ампера об эквивалентности магнитного поля плоского контура тока и внешнего магнитного

поля „магнитного листа“, вырезанного по форме взятого контура тока, имеем:

$$M_m = IS.$$

Следовательно, формула (1) давно известна как в физике так и в электротехнике. Кроме того, она выводится из расчета напряженности магнитного поля на оси элементарного кругового тока с применением первого и второго положений Гаусса. Поэтому она является следствием, а не „отличной от принятой“ формой закона Био и Савара.

В практическом применении эта формула тоже не дает преимуществ перед общепринятым методом расчета. Она сводит дело в принципе к двойному интегрированию и требует надлежащего выбора сетки элементарных контуров токов. Общего метода выбора этих сеток автор не указывает. Примеры ее применения, рассмотренные автором статьи, являются простейшими случаями расчетов,

когда $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha = 0$. При этих условиях получается ординарный интеграл, но с более чем обычно сложным подинтегральным выражением. Автор статьи убедил бы читателей в целесообразности „нового метода“ расчета, если бы он дал рациональное решение более сложных задач.

Литература

1. Е. А. Штрауф. Электричество и магнетизм. Госиздат технико-теоретической литературы, стр. 319, 1950.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева. Курс общей физики. т. II, Госиздат технико-теоретической литературы, стр. 351, 1951.

А. Ф. Метелкин и М. А. Любимов

Ивановский энергетический институт им. Ленина



Хроника

XI СЕССИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОМИССИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАДИОВЕЩАНИЯ (ОИР)

С 30 ноября по 10 декабря 1954 г. в Праге происходила XI сессия Технической комиссии ОИР. В работах сессии приняли участие представители радиовещательных организаций 19 стран Европы и Азии, а также представитель Международного союза электросвязи.

Сессия рассмотрела и обсудила 20 вопросов, в том числе ряд научно-технических докладов, освещающих обширный круг проблем телевидения, студийно-аппаратного комплекса, проводного вещания, передающих устройств и распространения ультракоротких волн. Был также заслушан ряд сообщений об итогах работы некоторых международных технических конференций, в которых ОИР приняла участие. Следует особо отметить некоторые доклады, посвященные стандартизации характеристик телевизионной передачи, нормам допускаемых линейных искажений в телевизионном тракте, развертке при помощи бегущего луча и передаче эпидиаскопических изображений, техническому оснащению нового радиодома в Бухаресте, звукорассеянию в концертных залах, измерению искажений в трактах радиовещания и звукозаписи, дистанционным измерением в трактах проводного вещания, улучшению качественных показателей усилителей проводного вещания, теории сверхдальнего распространения УКВ и др.

Доклады, рассмотренные на сессии, свидетельствуют о быстром развитии теоретической мысли и прогрессе в области техники вещания и телевидения в странах, объединяемых ОИР. Состоявшийся широкий обмен мнениями внес много ценного в теорию и практику техники вещания и телевидения.

Работам XI сессии ОИР предшествовали работы трех групп, изучавших вопросы проводного вещания, студийно-аппаратного комплекса и телевидения при участии известных специалистов.

Результаты работы XI сессии Технической комиссии представляют большой практический интерес для членов ОИР. Работа Комиссии содействует делу дальнейшего развития международного сотрудничества ОИР в области техники радиовещания и телевидения, прогрессу радиотехники в целом и ее служению делу мира.

К. Шталь

*Председатель Технической комиссии ОИР
г. Прага*

КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ В ХАРЬКОВЕ

20 января с. г. Харьковским отделением Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков совместно с редакцией журнала «Электричество» была проведена в г. Харькове конференция читателей журнала.

Доклад о работе журнала в 1950—1954 гг. сделал член редакционной коллегии журнала проф. А. М. Федосеев. Он подробно остановился на мероприятиях, осуществленных редакцией с целью улучшения журнала, и на задачах, стоящих перед журналом в данное время. Главной из них является приближение тематики и формы изложения содержания журнала к широким кругам читателей — научным работникам и работникам промышленности; журнал должен содействовать обмену мнений научных работников и работников практики по актуальным проблемам электротехники, связанным с запросами народного хозяйства. Докладчик остановился на недостатках, имеющихся еще в работе журнала, отметив, в частности, отвлеченность изложения отдельных статей, превалирование в некоторых статьях математического аппарата над физической трактовкой темы, недостаточность в ряде статей практических выводов, которыми могли бы воспользоваться работники практики.

В обсуждении доклада участвовали многие читатели, присутствовавшие на конференции. Выступавшие отмечали положительную роль журнала в электрификации страны, развитии электротехники и науки об электричестве, установлении вопросов приоритета. Были указаны некоторые еще неизжитые недостатки в работе журнала.

Инж. М. В. Жадановский (Теплоэлектропроект) указал на то, что у читателей, активно работающих в области энергетики, но не соприкасающихся в своей повседневной работе с теоретическими вопросами, иногда остается от статей, напечатанных в журнале, чувство неудовлетворенности из-за трудной формы изложения материала. Конечно, журнал и впредь должен поддерживать свой высокий теоретический уровень, но и теоретические вопросы можно и должно излагать языком, более доступным широкому кругу читателей.

Инж. М. М. Русаковская (Укрэнергометаллургпром), отметив несомненный прогресс в тематике журнала в смысле удовлетворения читателей разнообразных отраслей электротехники, поддержала необходимость упрощения изложения теоретических статей. Следует увеличить число обзорных статей. Желательно организовать в журнале справочно-консультационный отдел.

Кандидат техн. наук. И. М. Динабургский (Институт механизации и электрификации сельского хозяйства) считает правильным, что в журнале печатаются статьи, рассматривающие проблемы, имеющие широкое значение. Однако наряду с такими статьями должны печататься и статьи, рассчитанные хотя и на меньший круг читателей, но представляющие определенную научную или практическую ценность. Многие статьи все еще являются труднодоступными.

Кандидат техн. наук Л. Л. Рожанский (Харьковский политехнический институт) отметил улучшение содержания журнала за последние годы за счет ограничения статей, представляющих интерес лишь для очень узкого круга читателей. Объем отдельных статей в журнале еще велик. Следует довести размер статьи до 4—5 страниц на машинке. Это откроет новые возможности в смысле разнооб-

разия каждого номера и отражения большего числа актуальных материалов. Желательно помещать авторефераты оригинальных работ, а также перечни кандидатских и докторских диссертаций с краткой аннотацией. Некоторые статьи, помещаемые в журнале «Электричество», по своему содержанию скорее подходят для журнала «Электрические станции» и других, имеющих более прикладной характер изданий. Весьма желательно систематическое печатание обзорных статей, например по вопросам передачи электроэнергии постоянным током, электромашиностроению и другим вопросам.

Инж. **Б. З. Зильберман** (Укрэнергокомунпроект) также высказал пожелание об увеличении числа обзорных статей.

Инж. **А. И. Баранов** (Теплоэлектропроект) указал, что у работников ТЭП имеется много ценных для опубликования материалов, но некоторые авторы не в состоянии удовлетворить довольно жесткие требования, предъявляемые редакцией к составлению статей. Поэтому организация корреспондентских постов журнала в ряде городов, в том числе в Харькове, способствовала бы продвижению статей работников периферии и в частности отделений Теплоэлектропроекта.

Инж. **О. Г. Вексельман** высказал мнение в пользу отказа от правила анонимности для авторов заключений ре-

цензентов по статьям. Непонятно, почему инженер или ученый, высказывающий свое мнение в рецензии по статье, должен скрывать свое имя от автора.

Инж. **Д. П. Лобковский** (Укрэнергометаллургпром) выразил пожелание, чтобы в журнале было уделено больше места вопросам электропривода и другим вопросам применения электроэнергии.

Инж. **А. Я. Розенталь** (Харьковэнерго) отметил недостаточную связь читателей журнала с редакцией.

В заключительном слове проф. **А. М. Федосеев** остановился на вопросах, затронутых участниками конференции, указав, что критические замечания о работе журнала и пожелания, высказанные на конференции, будут рассмотрены редакционной коллегией, которая постоянно занимается вопросами улучшения журнала. Важно, чтобы читатели, не дожидаясь созыва конференций, реагировали на положительные и особенно отрицательные места в очередных номерах журнала сразу по прочтении путем систематической переписки с редакцией. Редакция надеется, что читатели журнала — харьковчане активно включатся в работу журнала «Электричество».

В принятом конференцией решении получили отражение состоявшееся обсуждение и внесенные читателями рекомендации.

*Инж. А. Я. Розенталь
г. Харьков*

ПРОФЕССОР В. И. ВЕЙЦ

К 50-летию со дня рождения и 30-летию научно-педагогической деятельности

На расширенном заседании энергетической секции Ученого совета Энергетического института им. Кржижановского АН СССР 9 февраля с. г. было отмечено 50-летие со дня рождения и 30-летие научной и педагогической деятельности чл.-корр. Академии наук СССР Вениамина Исааковича Вейца, одного из видных ученых-энергетиков. Чествование было проведено совместно с энергетическим факультетом МИЭИ им. Орджоникидзе и ВНИТЭО.

В. И. Вейц по окончании I Московского государственного университета и Московского высшего технического училища им. Баумана (1925 г.) в течение нескольких лет разрабатывал научные основы советской энергетической статистики, получившие применение в практике. С 1932 г. В. И. Вейц в Энергетическом институте им. Кржижановского беспрерывно руководит исследованиями по общим вопросам энергетики и электрификации. За выдающиеся научные заслуги В. И. Вейц в 1933 г. был избран членом-корреспондентом АН СССР.

В довоенные годы наряду с исследованиями, посвященными обобщению путей развития советской и зарубежной энергетики, им был разработан круг вопросов по энергетическому балансу, развитию энергетических систем и энергетики отраслей народного хозяйства. В годы Великой Отечественной войны В. И. Вейц выполнил ряд важных работ по мобилизации энергетических ресурсов восточных районов страны на нужды обороны. В 1942 г. ему была присуждена Сталинская премия I-й степени.

В послевоенные годы под научным руководством В. И. Вейца в ЭНИИ выполнен ряд научных исследований по вопросам дальнейшего развития советской энергетики: «Комплексная энергетическая схема Москвы», «Единая энергетическая система Европейской части СССР», «Разви-



тие энергетических систем Сибири», «Основы промышленной энергетики», «Основы электрификации социалистического сельского хозяйства» и др.

В. И. Вейц принимал активное участие в экспертизе по многим энергетическим стройкам страны.

Перу В. И. Вейца принадлежит 150 работ. Из числа научных трудов, выполненных им в последние годы, могут быть названы: «Структура энергетического баланса и основы электрификации, газификации и теплофикации промышленности» (1947 г.), «Энерготехнологическое комбинирование и энергетический коэффициент полезного действия промышленного производства» (1948 г.), «Технический прогресс советской энергетики» (1950 г.), «Единая энергетическая система СССР» (1954 г.) и др. С работами В. И. Вейца связано развитие комплексного направления энергетических исследований.

В. И. Вейц ведет с 1925 г. педагогическую работу в области энергетики; в 1930—1941 гг. он заведывал кафедрой в МЭИ им. Молотова, с 1944 г. — кафедрой на энергетическом факультете МИЭИ им. Орджоникидзе. Он систематически оказывает научную помощь энергетическим институтам филиалов Академии наук СССР и республиканских академий наук. В. И. Вейц был участником делегаций СССР в нескольких международных энергетических конференциях. Ряд его работ переведен и издан за рубежом.

За выдающиеся заслуги в области развития советской энергетики ученый-коммунист В. И. Вейц награжден орденом Трудового Красного Знамени и медалями.

*Г. М. Кржижановский, А. В. Винтер,
В. И. Попков, К. Г. Марквардт,
Н. А. Караулов, В. И. Михайлов и др.*

Библиография

А. А. ВОРОНОВ. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
Издание второе, переработанное и дополненное. 471 стр., ц. 16 руб. Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1954.

Два последних десятилетия характеризуются особенно интенсивным развитием теории автоматического регулирования в связи с широким внедрением новой техники во все отрасли народного хозяйства. За эти годы общая теория автоматического регулирования формируется в самостоятельную научную дисциплину и обогащается рядом новых методов исследования, расчета и построения систем автоматического регулирования.

В книгах, вышедших до 1950 г., посвященных автоматическому регулированию отдельных частных объектов, как правило, не освещались новые методы; специалисты, работавшие в этой области, могли изучать новую теорию лишь по разрозненным источникам в периодической печати. Рассматриваемая книга, первое издание которой вышло в 1950 г., является, пожалуй, первым трудом по общей линейной теории автоматического регулирования, стоящим на уровне современных достижений теории автоматического регулирования. В сравнении с первым изданием автор учел в новом издании большинство критических замечаний читателей и в значительной мере пополнил книгу новыми материалами.

Автором проделана большая работа прежде всего по систематизации и сравнительному анализу разрозненных, часто неотреботанных и даже дискуссионных или противоречивых материалов. Не ограничившись лишь подведением итогов и систематизацией уже известных фактов, автор включил в книгу также ряд научных результатов своей исследовательской работы, из которых прежде всего можно отметить общие методы исследования статики сложных систем регулирования и метод приближенного построения переходного процесса по треугольным вещественным частотным характеристикам.

Во введении к книге автор освещает роль автоматизации и, в частности, автоматического регулирования в социальной технике и приводит исторический очерк развития теории и техники автоматического регулирования в России и СССР.

В гл. I даются общие понятия о задачах и свойствах систем автоматического регулирования, приводятся основные определения и описываются основные виды систем автоматического регулирования и их элементов.

Глава заканчивается тремя примерами достаточно сложных по конструкции систем автоматического регулирования. Для облегчения усвоения предшествующего материала эти схемы следовало бы упростить в еще большей степени, чем это сделал автор, убрав ряд вспомогательных деталей. Так, например, вспомогательный сервомотор в схеме регулятора скорости турбины лучше было убрать вовсе, чем давать его схематизацию, отличающуюся от действительной схемы; в электронном регуляторе следовало бы исключить элемент токовой компенсации. В воспроизводимых схемах, кроме того, имеются опечатки. На рис. 28 между муфтой маятника и золотником показана лишняя опора. На рис. 30 и 36 имеются опечатки, отмеченные автором в приложении.

Глава II содержит основные сведения о статике регулирования. Следует отметить, что до последнего времени в печатных работах вопросы общей статики не формулировались, и авторы этих работ ограничивались рассмотрением узко частных примеров статического расчета отдельных конкретных регуляторов. Автор рецензируемой книги впервые формулирует в печати общие положения статики как первого этапа анализа и расчета систем автоматического регулирования и излагает как существовавшие, так и разработанные им методы расчета статических характеристик частей системы и системы в целом на базе заданных характеристик отдельных звеньев. Эти методы, распространенные на системы с нелинейными элементами и нелинейными обратными связями, включая перекрестные, дают возможность рассчитывать статические характеристики многообразных систем регулирования сложной структуры.

Введение главы о статике как самостоятельном этапе общего анализа систем, безусловно, следует приветствовать. Вместе с этим можно высказать сожаление, что автор ограничился лишь одним примером расчета статических характеристик системы.

Глава III посвящена рассмотрению дифференциальных

уравнений некоторых объектов и элементов систем автоматического регулирования. Показаны способы линеаризации уравнений.

Автор рассмотрел довольно много самых разнообразных элементов: генераторы и двигатели постоянного тока; двухфазный асинхронный двигатель; обобщенную машину-двигатель; самолет; центральный регулятор скорости; угловой регулятор напряжения; гироскоп; гидравлический сервомотор; электронный, электромашинный и магнитный усилители, а также ряд средств стабилизации — механические и электрические жесткие обратные связи, скоростную обратную связь для электрических машин, гидравлическую и электрическую гибкие обратные связи, гидравлические и гироскопические дифференцирующие элементы, пассивные электрические четырехполюсники для дифференцирования и интегрирования. При таком многообразии рассмотренных элементов не могло и не должно было быть глубоким и детальным. Автор стремился отмечать общие динамические черты различных по конструкции элементов, но не везде выдержал это с достаточной последовательностью. Детализация отдельных элементов получалась не вполне равномерной. Генератор постоянного тока дан излишне сложно. С другой стороны, электронный усилитель трактуется чрезмерно упрощенно. Следовало бы рассмотреть двухтактную двухкаскадную схему, более часто используемую в практике. В электромашинном усилителе с самовозбуждением следовало учесть взаимную индукцию обмоток.

Глава IV содержит общие указания о составлении дифференциальных уравнений систем автоматического регулирования и включает некоторые сведения из математики. Далее дается определение передаточной функции и рассматриваются передаточные функции типовых элементарных динамических звеньев и их соединений. Глава заканчивается описанием основных частотных характеристик звеньев и систем и примерами их вычисления.

Этот раздел книги развит и улучшен в сравнении с первым изданием. Ясным языком изложен раздел о логарифмических характеристиках.

Вместе с тем автор еще неполностью устранил некоторую пестроту и перегруженность этой главы. В частности, было бы лучше вынести сведения из математики в приложения. Вводя читателя в широкий круг новых понятий, было бы целесообразно в этой же главе кратко пояснить, какую роль в последующем будут играть передаточные функции, частотные характеристики, теоремы о последовательном и параллельном соединениях звеньев. Нельзя не упомянуть о досадных опечатках, которые хотя и отмечены в списке опечаток, затрудняют проработку материала. (На рис. 123,а и 124,б вместо $\omega = 0$ следует читать $\omega = \infty$) Кстати, в списке опечаток не указано, что исправление следует внести только в рис. 124,б, но не 124,а.

В гл. V рассматриваются основные критерии устойчивости линейных динамических систем (Раута, Гурвица, Михайлова, Найквиста, Неймарка и др.). Автор улучшил данную главу, придав ей большую стройность. Он правильно отказался от изложения нескольких вариантов доказательств критерия Найквиста, оставив одно, наиболее простое.

Заслуживает одобрения, что автор обратил внимание читателя на несправедливо забытый критерий Раута, который в сложных задачах оказывается гораздо эффективнее метода Гурвица в том виде, в каком последний обычно излагался в руководствах по теории регулирования.

Из недостатков главы можно указать на чрезмерно краткое рассмотрение правил штриховки осей прямых. Не указано, как штриховать прямую $a_0 = 0$. Случай, когда прямая не штрихуется, определен неточно (в этом случае ω в исключительной точке должна равняться нулю). На стр. 247 в 4-й строке снизу имеется неотмеченная автором опечатка (в определителе вместо a_2 должно быть a_1).

В гл. VI приведены примеры исследования устойчивости систем регулирования различных структур и рассмотрены некоторые способы стабилизации. В общих чертах рассмотрены способы исследования устойчивости частотным методом систем, содержащих запаздывающие звенья и звенья с распределенными параметрами.

Введение в книгу специальной главы, посвященной примерам применения методов, безусловно, облегчает работу над книгой и его следует считать положительным.

Однако сам подбор примеров было бы целесообразно несколько усовершенствовать. В данной главе преобладают примеры неэлектрического характера (классические схемы регулирования турбин, трубопровод) и абстрактные структурные схемы. Было бы лучше, если бы в этой главе число примеров было уменьшено и показаны были бы способы полного исследования систем, а не только устойчивости.

В примере на стр. 325, где исследуется устойчивость системы с запаздыванием, начиная с 5-й строки сверху, автором упущен член, содержащий ω^3 , поэтому окончательное решение оказалось неверным.

В гл. VII, посвященной качеству процесса регулирования, формулируется понятие качества и приводятся сведения об интеграле Фурье и интегральных вычетах, способы составления изображений дифференциальных уравнений при произвольных начальных условиях и нахождения оригиналов методом вычетов. Приводятся свойства частотных вещественных характеристик, позволяющие делать предварительные оценки качества, методы построения вещественных характеристик по другим характеристикам и приближенные методы построения переходных процессов (метод трапеций и метод треугольников, предложенный автором). Кратко изложены методы оценки качества по степени устойчивости и интегральные оценки. Глава заканчивается параграфом, излагающим метод синтеза последовательных и параллельных корректирующих устройств по логарифмическим характеристикам. Подробное изложение методов оценки качества, расширенное во втором издании, составляет одну из положительных особенностей книги, отличающую ее от работ, выходящих до 1950 г.

Говоря о недостатках главы, следует отметить, что автор отдал явное предпочтение частотным методам, изложив их гораздо обстоятельнее остальных методов. Очень жгато представлены «корневые» методы; из них рассмотрена только степень устойчивости.

Так же как и в гл. IV, математические сведения следовало бы перенести из основного текста в приложения. Метод интегральных вычетов можно было бы вообще исключить. Параграфы, посвященные учету начальных условий, улучшены по сравнению с первым изданием, но еще не доведены до надлежащей ясности.

К книге даны три приложения. Первое из них (метод построения частотной характеристики по кривой переходного процесса) более уместно было бы дать в тексте, а не в приложении.

То же можно сказать и о втором приложении (метод гармонического баланса). Изложение метода превратилось по существу в большой самостоятельный параграф. Было бы более логично или совсем не помещать этого раздела, поскольку книга посвящена линейным методам, или, что было бы лучше, ввести главу о нелинейных системах, собрав в ней отрывочные сведения о нелинейностях, рассеянные по отдельным главам, и расширив ее объем за счет сокращения других глав и изъятия сведений из математики.

Переходя к общим выводам, можно сказать следующее. К числу общих недостатков книги следует отнести недостаточное освещение нелинейной теории регулирования и недостаточное количество электротехнических примеров.

Общие же положительные качества книги — это удачная методика построения и стройность изложения материала, ясность языка, высокий теоретический уровень книги, наличие значительного числа примеров.

Книга представляет собой ценное учебное пособие, уже нашедшее широкое применение при обучении студентов и слушателей факультетов усовершенствования инженеров. В книге изложено современное состояние теории автоматического регулирования линейных систем.

Она допущена Главным управлением высшего образования Министерства культуры СССР в 1954 г. в качестве учебного пособия для высших учебных заведений по специальности «Автоматические и измерительные устройства» и «Электромеханические приборы и автоматы».

В случае переиздания книги необходимо учесть дополнения и изменения, указанные в данной рецензии, и материалы II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования.

Настоящая рецензия обсуждена и одобрена кафедрой автоматического контроля и регулирования ВЗЭИ.

Проф. Н. А. Бабаков, проф. Я. З. Цыпкин, проф. Н. Н. Шумиловский, кандидат техн. наук С. Л. Ратин, кандидат техн. наук С. Л. Попков, инж. Б. Н. Наумов и др.



НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Архипов Н. К. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. 132 стр., ц. 4 руб. 15 коп. Коммунистат.

Беркович М. А. и Семенов В. А. ОСНОВЫ ТЕХНИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ. 240 стр., ц. 5 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Брон О. Б. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В АППАРАТАХ УПРАВЛЕНИЯ. 532 стр., ц. 20 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

Вавилов С. И. СОБРАНИЕ СОЧИНЕНИЙ. т. I. РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ. 1914—1936 гг. Отв. ред. В. Л. Левшин. 451 стр., ц. 23 руб. Академиздат.

Гинзбург С. Г. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ. Под ред. И. И. Теумина. 252 стр., ц. 7 руб. 90 коп. Изд. «Сов. радио».

ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИЗОЛЯТОРЫ. СБОРНИК ПЕРЕВОДОВ ПОД РЕД. Т. М. Рывкина. 280 стр., ц. 12 руб. 70 коп. Изд. иностр. лит.

Евреинов М. Г. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА. 20 стр., ц. 35 коп. Госкультпросветиздат.

Попов В. С., Мансуров Н. Н. и Николаев С. А. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА (УЧЕБНИК ДЛЯ НЕЭЛЕКТРОТЕХНИЧ. ТЕХНИКУМОВ). Изд. 3-е, стереотип. 528 стр., ц. 11 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Сааков Э. О. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ РС СИСТЕМ. РС-ГЕНЕРАТОРЫ И ФИЛЬТРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ. 239 стр., ц. 7 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

Сазонов Н. А. РУКОВОДСТВО ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРОМОНТЕРА. Пер. с 2-го перераб. изд. 400 стр., ц. 8 руб. Госсельхозиздат УССР, На укр. яз.

Сарычев Б. М. МОНТАЖНЫЕ ТАБЛИЦЫ ПРИВодОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ. 128 стр., ц. 4 руб. 75 коп. Коммунистат. СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ. Ред.

Р. А. Нилендер. Вып. 6, 64 стр., ц. 1 руб. 85 коп. Госэнергоиздат. Синельников Н. и Карабихин Н. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В КОЛХОЗЕ. 20 стр., ц. 25 коп. Ростов н/Д. Кн. изд-во.

ТЕРМИНОЛОГИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ АВТОМАТИКИ. 24 стр., ц. 90 коп. Комитет техн. терминологии АН СССР. Академиздат.

ПОПРАВКА

В журнале „Электричество“ № 3, 1955 г. в статье Б. А. Ханова на стр. 72, формулу (1) следует читать:

$$\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z_0 = \frac{R_1 (R_2^2 + X_2^2) + R_2 (R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} + j \frac{X_1 (R_2^2 + X_2^2) + X_2 (R_1^2 + X_1^2)}{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}. \quad (1)$$

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор), **Е. Г. Комар, М. П. Костенко, И. А. Сыромятников** (зам. главного редактора), **А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, М. А. Шателен.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗЕМЛИ ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

Кажущееся удельное сопротивление земли переменному току может быть определено на основании результатов измерений взаимной индуктивности между двумя однопроводными цепями по формуле Полячекки. Этот метод является точным, но чрезвычайно громоздким и трудоемким. Существующие методы определения кажущегося удельного сопротивления земли переменному току по результатам измерений на постоянном токе отличаются простотой, но не дают достаточной точности при сложной структуре.

Предлагаемый метод, сохраняя простоту измерений, дает возможность значительно повысить точность определения кажущегося удельного сопротивления.

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем:

В. М. Горнштейн

2

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ СО СЛАБЫМИ СВЯЗЯМИ

В статье приведены результаты теоретического исследования предложенного автором в 1951 г. устройства, изменяющего открытие регулирующих органов турбины в зависимости от угла сдвига э. д. с. генератора и напряжения системы, а также скорости и ускорения агрегата.

Показано, что при правильном выборе параметров элементов этого устройства оно может обеспечить устойчивую работу тепловых электростанций при любых заданных углах сдвига э. д. с., в том числе при углах, значительно превышающих 90°. Одновременно может быть достигнута неограниченная устойчивость, т. е. сохранение устойчивости после любых возмущений (например, трехфазные короткие замыкания любой длительности).

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В США И КАНАДЕ ЗА 1953 г.

2

Дается статистический обзор по следующим разделам:

1. Состав капиталовложений на строительство тепловых и гидроэлектростанций, линий передачи и распределительных сетей и вспомогательных сооружений за период с 1937 по 1953 г.

Показывается территориальное размещение капиталовложений на строительство энергетических объектов с указанием распределения сумм по видам объектов.

2. Приводятся суммарные длины линий электропередачи и распределительных сетей на различные напряжения, построенных в 1951—1953 гг., и планы на 1954 г. Указываются мощности понижающих подстанций. Дается территориальное размещение линий электропередачи (в длинах) и мощностей трансформаторов подстанций.

Р. Л. Райнес

2

ПРИНЦИП СИСТЕМЫ ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ НА СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Замена в современных устройствах телеуправления релейно-контактных элементов бесконтактными статическими элементами, не требующими постоянного обслуживания и обладающими большим сроком службы, является одним из условий создания быстродействующих устройств.

В опытном устройстве, разработанном в ЦНИЭЛ МЭС, узлы генерации импульсов, передачи их в линию и прием из линии, а также узлы образования и фиксации импульсного признака выполнены на статических элементах. В устройстве используется ток частоты 50 гц. Применяя статический делитель, можно получить частоту 25 гц, что создаст лучшие условия как прохождения импульсов по каналу, так и работы отдельных элементов схемы.

H. Roser

2

ПЕРЕВОД СЕТИ 220 кВ НА РАБОТУ С ГЛУХИМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Первоначально сеть 220 кВ Рейнско-Вестфальской электрической системы (Западная Германия) работала с компенсированной нейтралью. В первые годы эксплуатации около 85% замыканий на землю ликвидировалось без отключения линий. Увеличение протяженности сети вызвало снижение надежности работы системы. Число многофазных замыканий, приходящихся на единицу длины линии, после того, как длина сети возросла с 2 000 до 3 500 км, увеличилось в 3,5 раза. При этом число самоликвидирующихся однофазных замыканий на землю значительно уменьшилось. Благодаря возникновению дуговых перенапряжений были случаи дополнительных перекрестий изоляции в других точках сети, приводивших к многофазным или сложным коротким замыканиям.

С. П. Красивский

2

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В статье уточняются объем и степень автоматизации и телемеханизации, а также определяются условия применения четырех основных видов автоматических гидроэлектростанций: 1) автоматических с дистанционным управлением; 2) автоматических с телеуправлением; 3) полностью автоматических и 4) полуавтоматических. Для первых трех видов приводится составленная автором таблица с перечнем автоматизируемых процессов на приютинных и деривационных гидроэлектростанциях. Указывается на незначительную разницу в объеме автоматизации гидроэлектростанций различных видов и возможность легкого перехода от одного вида к другому.

В другой таблице приведен перечень гидромеханических контрольно-защитных устройств на автоматических гидроэлектростанциях, из которого видно, что

J. M. Beskine

2

СООРУЖЕНИЕ ЛИНИИ 275 кВ

Сооружаемая в Англии двухцепная линия Тилбери—Элстри длиной 78 км является вторым участком проектируемой сети 275 кВ. Построенная ранее одноцепная линия 275 кВ Стейпхорп—Вест Милтон длиной 66 км в настоящее время уже находится в эксплуатации. На обеих линиях применено расщепление фаз на два провода.

На линии Тилбери—Элстри устанавливаются двухцепные металлические опоры, на которых подвешиваются облегченные сталеалюминиевые провода сечением 260 мм² (по два на фазу) и грозозащитный стальной трос. Габариты опор выбраны с учетом возможности повышения рабочего напряжения линии до 380 кВ.

Для сборки опор применяется передвижная подъемная стрела грузоподъемностью 1,5 т. Стрела устанавливается непосредственно на монтируемой опоре и по мере увеличения высоты опоры перемещается выше. Для

3. Даны суммарные эксплуатационные расходы на энергохозяйство различных районов страны.

4. Приводятся статистические данные за период с 1937 по 1953 г. по общей выработке электроэнергии и ее потреблению.

5. Анализируется финансовая сторона энергетики.

6. Рассматривается изменение установленной энергетической мощности по годам, начиная с 1937 и кончая 1953 г., для различных районов страны.

7. Даются технико-экономические показатели работы тепловых и гидростанций.

8. Рассматриваются тенденции развития энергопромышленности.

9. Дается распределение потребляемой мощности между различными категориями потребителей.

10. Дается краткий обзор энергетики Канады.

El. World, т. 141, стр. 147, № 4, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

Первоначально вводится только одна из двух установок (Дьюрмо), расположенная примерно в 150 км от конца линии. Так как линия Мидског — Халлсберг работает параллельно с существующей сетью 220 кВ, обладающей более высоким соотношением $\frac{r}{x}$, чем линия 380 кВ, применение продольной компенсации позволяет передавать по линии 380 кВ большую часть нагрузки, что обеспечивает снижение общих потерь в системе.

Четырехлетний опыт эксплуатации продольной компенсации на линии 220 кВ подтвердил результаты теоретических исследований о целесообразности ее применения. В дальнейшем все основные линии 380 кВ будут снабжены 40...60-процентной продольной компенсацией. Применение продольной компенсации дает снижение стоимости передачи энергии на 15%.

CIGRE, доклад № 322, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

Для улучшения условий работы сети было решено перевести сеть 220 кВ на работу с глухим заземлением нейтрали. Переход осуществляется тремя очередями в течение трех лет. Осуществление первой очереди вызвало улучшение устойчивости системы и снижение числа многофазных замыканий на землю за год эксплуатации на 15%. Обе части системы работают в параллель, но при замыканиях на землю в части сети с компенсированной нейтралью связь между обеими частями прерывается. При переходе на глухое заземление для ограничения токов замыкания на землю часть нейтралей трансформаторов остается изолированной. Для быстрой ликвидации коротких замыканий в сети 220 кВ устанавливаются выключатели, снабженные устройствами быстрого действия трехфазного АПВ. Применение АПВ не вызывает затруднений, так как все линии 220-кВ сети двухцепные.

CIGRE, доклад № 302, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

монтажа опоры достаточна небольшая площадка, так как при этом не требуется внешних оттяжек.

Для выравнивания стрел провеса проводов и уменьшения прогиба траверз анкерных опор подвес всех четырех проводов на каждой траверзе совершается одновременно при помощи 6-тонных тракторных лебедок. Применение мощных лебедок, установленных на гусеничных или колесных тракторах, облегчает протаскивание проводов через засеянные поля и пространства, занятые оранжевыми. Раскатка всех проводов и троса производится одновременно. При раскатке проводов обеспечена возможность самоторможения барабанов.

El. Review, т. 155, стр. 469, № 13, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

1) Путем вертикального электрического зондирования при помощи симметричной четырехэлектродной установки с использованием постоянного тока (можно воспользоваться прибором МС-07) находят удельное сопротивление верхнего слоя (строение земли принимается двухслойным) ρ_1 , удельное сопротивление нижнего слоя ρ_2 и толщину верхнего слоя h .

2) Из теоретических кривых зависимости кажущегося удельного сопротивления ρ_k земли при двухслойном строении от толщины верхнего слоя h , удельных сопротивлений ρ_1 и ρ_2 и частоты тока f , определяют величину ρ_k .

Проведенные измерения показали, что погрешность определения кажущегося удельного сопротивления предлагаемым методом не превышает 10..15%.

Электричество, № 5, 1955.

Рассмотрены условия достижения неограниченной устойчивости с учетом нелинейности дифференциальных уравнений движения, а также процесс регулирования после сбросов нагрузки и коротких замыканий.

Показано, что при малой местной нагрузке целесообразно дополнительно к устройству, действующему на регулирование турбины, применить устройство автоматического повторного включения, отключающее линию при переходе угла через 180° и включающее ее при углах, близких к 0° .

Исследованием установлено, что эффективность устройства тем выше, чем слабее электрические связи между электростанциями. Поэтому областью его применения являются слабые связи между электростанциями и энергосистемами (в особенности межсистемные связи), при которых обычные методы повышения устойчивости недостаточны.

Электричество, № 5, 1955.

Импульсный признак характеризуется отсутствием тока в канале связи в течение фиксированного числа периодов переменного тока, что отсчитывается специальным счетчиком. Такая форма образования импульсного признака позволяет на приемной стороне фиксировать его не по длительности интервала, а по факту прекращения питания из линии. Поэтому органом фиксации является обычное токовое реле. При образовании импульсного признака на передающей стороне источник тока переключается на балластную нагрузку, что обеспечивает ему постоянный режим работы. Связь линии с местными цепями достигнута трансформаторная — бесконтактная.

В образце устройства время передачи одного приказа было 0,42 сек и образец был первым быстродействующим устройством телеуправления циркулярного типа. За 1,5 года опытной эксплуатации было осуществлено около 4 000 телепередач.

Электричество, № 5, 1955.

большинство этих устройств действует на предупредительную сигнализацию.

Определяются основные задачи в деле дальнейшего развития работ по автоматизации гидроэлектростанций. Эти задачи заключаются в необходимости более широкого применения на гидроэлектростанциях автоматических регуляторов мощности по водотоку, внедрения автооператоров, соединяющих в себе функции группового регулирования мощности и группового управления агрегатами, внедрения дистанционно управляемых и автоматических затворов, применения сифонов, более совершенных шугосигнализаторов, устройств автоматической защиты при разрыве напорных трубопроводов, устройств для измерения горизонтов воды и т. п.

Электричество, № 5, 1955.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БОЛЬШИХ ЗДАНИЙ

При проектировании крупного административного здания должно быть предусмотрено соответствующее подвальное помещение для высоковольтной подстанции, а иногда и машинное помещение для аварийного резервного агрегата. При выборе конфигурации сети для электрооборудования здания первым требованием должна быть надежность; поэтому постепенно переходили от радиальной сети к кольцевой, а в особо ответственных установках — к «сетке» со многими глухими узлами. Одновременно должна обеспечиваться селективность отключения отдельных участков. Новые системы освещения, в том числе с газосветными лампами, накладывают свой отпечаток и на распределение энергии. Для устранения стробоскопического эффекта газосветных ламп приходится распределять их присоединение

2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Мощность солнечного излучения на 1 м^2 поверхности земли составляет примерно $1,3 \text{ кВт}$, из которых непосредственно на землю попадает около $\frac{3}{4}$, т. е. 1 кВт/м^2 . Недавно был изготовлен кремниевый фотоэлемент, способный преобразовывать энергию солнца в электрическую с повышенным к. п. д. — около 6%. Фотоэлемент имеет следующую конструкцию: на поверхности тонкой полосы кремния нанесен распыленным паром металла проводящий слой толщиной $0,01 \text{ мм}$. Этот слой является одним полюсом фотоэлемента, другим полюсом служит кремний. Электродвижущая сила фотоэлемента составляет около $0,5 \text{ в}$. При нагрузке фотоэлемента током с плотностью 24 ма/см^2 напряжение падает до $0,3 \text{ в}$. Путем надлежащей схемы последовательно-параллельного включения многих фотоэлементов

3

Н. А. Поляк

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСКУССТВЕННОЙ УСПОКОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАМЫКАЮЩИМИ КОЛЬЦАМИ

Современные синхронные машины с явно выражеными полюсами (гидрогенераторы, синхронные двигатели, синхронные компенсаторы) выполняются в настоящее время с полной продольно-поперечной успокоительной системой. Асинхронные характеристики таких машин, весьма важные для оценки эксплуатационных их свойств, в значительной мере определяются сверхпереходными активными и реактивными сопротивлениями машины по обеим ее электрическим осям.

При проектировании машины весьма важно правильно рассчитывать эти сопротивления, что в свою очередь связано с подсчетами электрических параметров собственно успокоительной системы. Такими параметрами являются реактивные сопротивления рассеяния

О. В. Сулов и С. М. Филин

3

УПРОЩЕНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ СХЕМЫ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Описан опыт упрощения и усовершенствования схемы управления и защиты синхронных электродвигателей типа ОМВ-19А7-16 $6,3 \text{ кв}$, 1200 квт , служащих для привода циркуляционных насосов вертикального исполнения.

По проекту пуск электродвигателей производился через реактор с ротором, включенным на пусковое сопротивление при отключенном возбудителе и закрытой задвижке на водоводе.

При скольжении 3...5% реактор автоматически шунтировался, после чего включался АГП и на ротор подавалось полное напряжение возбудителя.

В статье показано, что такие электродвигатели должны иметь прямой пуск от полного напряжения сети с жестким подключением возбудителя к ротору

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Применение автотрансформаторов для связи сетей высокого напряжения дает существенные экономические выгоды. Однако осуществление регулирования напряжения автотрансформаторов связано с некоторыми трудностями из-за опасности непосредственного воздействия набегающих волн перенапряжений на регулировочную обмотку и устройство для переключения ответвлений. Поэтому регулирование напряжения автотрансформаторов обычно производится при помощи специального регулировочного трансформатора. В этой схеме регулировочное устройство не связано с линейным выводом и не подвергается воздействиям перенапряжений. Несмотря на это, применение автотрансформатора с регулированием оказывается более выгодным, так как для

E. Stumpp

3

К СТАНДАРТИЗАЦИИ РАСЧЕТА ВЕНТИЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Вентиляционные устройства электрической машины представляют собой сумму элементов (каналы, их расширение и сужение, колена, решетки, диафрагмы и т. д.), характеристики которых практически достаточно хорошо изучены в аэро- и гидродинамике. Задачей электромашиностроения является использовать эти данные для разработки соответствующих схем расчета типовых устройств вентиляции электрических машин. Автор ставит своей целью показать, что с введением в электромашиностроение понятий, применяемых в вентиляторостроении, могут быть найдены экспериментальные методы, способствующие расширению наших знаний в области вентиляции электрических машин. Электрическая машина рассматривается как разветвленная

Н. А. Татарникова

ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Исследование волновых процессов в обмотках трансформаторов значительно облегчается при использовании электроннолучевого прибора, заключающего в себе осциллограф, миниатюрный низковольтный импульсный генератор и схему синхронизации.

Прибор позволяет выполнять непосредственно на моделях или реальных трансформаторах измерения потенциалов и градиентов, возникающих при импульсных воздействиях.

Разработанный в ВЭИ прибор состоит из блоков: синхронизации, временной развертки, временной градуировки, генератора импульсных волн и блока для измерения небольших градиентов.

H. W. Lensner

4

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ЗАЩИТА НА ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Рассматривается применение дифференциально-фазной защиты типа НКВ на линиях с ответвлениями. Дополнительно разбирается метод повышения чувствительности защиты путем применения фильтров различных симметричных составляющих тока.

Приводятся рекомендации по применению обычной дифференциально-фазной защиты на линиях с ответвлениями в различных частных случаях. Так, например, разбирается вариант защиты линии, на ответвлении от которой установлен трансформатор малой мощности.

Даны числовые соотношения токов короткого замыкания и токов нагрузки, а также рекомендации по выбору уставок пусковых органов защиты типа НКВ на линиях с ответвлениями для общего случая такой линии.

трех однофазных автотрансформаторов достаточно одной резервной фазы, в то время как для резервирования трехфазного регулировочного трансформатора необходим второй. Общий вес, стоимость и мощность потерь в случае автотрансформатора с добавочным регулировочным трансформатором больше, чем у автотрансформатора с регулированием.

Изучение характеристик автотрансформатора на модели в $\frac{1}{4}$ натуральной величины показало, что если автотрансформатор отключен от сети высшего напряжения при приложении импульсного напряжения к зажимам низшего напряжения автотрансформатора, в частях обмотки вблизи высоковольтных выводов могут появиться опасные перенапряжения, для снижения которых необходимо устанавливать разрядники.

CIGRE, доклад № 123, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

решетка вентиляционной установки. Приведено исходное уравнение для расчета дутья вентиляторов. Автор вводит следующие понятия и соответствующие математические выражения для них из области вентиляторостроения: 1) сопротивление воздушного тракта и 2) эквивалентное сопло, т. е. замещение вентиляционной сети электрической машины идеальным соплом, полностью преобразовывающим статическое давление в динамическое. Приведена формула для расчета эффективного дутья вентилятора. Обсуждаются экспериментальные методы определения эквивалентного сопла и коэффициента давления вентилятора. Сделан критический анализ применяемой на практике формулы для расчета меридианной скорости воздуха на периферии лопастного колеса вентилятора.

Deutsche Elektrotechnik, т. 8, стр. 387, № 11, 1954. (Э-во, 5, 1955)

Прибор генерирует с частотой сети апериодические волны длиной 30...100 мксек с фронтом 0,2 мксек, которые можно срезать с различными временами запаздывания. Исследуемую кривую потенциала или градиента прибор позволяет развернуть по экрану электроннолучевой трубки за 3,5...250 мксек. Временная калибровка имеет масштаб времени 0,5 и 5 мксек. Блок для измерения небольших градиентов обеспечивает измерение градиентов, составляющих 5% амплитуды действующей волны.

Прибор дает неподвижную картину исследуемого явления, которую можно наблюдать визуально или фотографировать.

Несколько таких приборов изготовлено в ВЭИ для трансформаторных заводов.

Электричество, № 5, 1955.

Приведены схемы включения защиты НКВ на линиях с ответвлениями, векторные диаграммы фильтров симметричных составляющих тока и различные варианты схем линий с ответвлениями.

Гг. АИЕЕ, т. 72, ч. III, стр. 697, 1953. (Э-во, 5, 1955).

равномерно на две или три фазы; из-за низкого соэф, создаваемого пусковыми дросселями этих ламп, необходимо применять специальные средства групповой или централизованной компенсации, в связи с чем должно усиливаться сечение стоек. Большие присоединенные мощности источников света и разных электробытовых и вспомогательных приборов заставляют прибегать к системе распределения энергии посредством шинных сборок, от которых отходят короткие ответвления к потребителям.

Появились новые материалы и методы монтажа электрической проводки и арматуры. Большое применение в проводке крупных зданий имеют трубчатые провода с оболочкой из синтетического материала.

ETZ-B, т. 6, стр. 341, № 9, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

можно получить необходимые напряжение и ток. Первым практическим применением описанной «солнечной батареи» было питание радиотелефонного передатчика с транзисторами.

Elektro-Anzeiger, стр. 7, № 45, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

и активные сопротивления успокоительных систем по обеим осям.

В статье описаны результаты аналитического исследования расчетных формул, применяемых в настоящее время для подсчета электрических параметров успокоительных систем с замыкающими кольцами. Автор показывает неудовлетворительность применяемых в настоящее время расчетных формул и необходимость их пересмотра и предлагает новые расчетные формулы, позволяющие более правильно учитывать действительное расположение стержней по ширине полюсного наконечника и общее число стержней на полюс.

Предлагаемые автором формулы приводятся в статье в нескольких видах, включая и такой, который является удобным при учебном изложении вопроса о параметрах искусственной успокоительной системы.

Приведены два примера, иллюстрирующие влияние относительного расположения стержней по ширине полюсного наконечника на параметры успокоительной системы.

Электричество, № 5, 1955.

двигателя и открытой задвижкой (при наличии на водоводе обратного клапана).

Эти мероприятия радикально упрощают схему управления электродвигателем, а также повышают надежность и эффективность АВР.

При пуске и посадке напряжения в сети должна осуществляться форсировка возбуждения посредством закорачивания шунтового реостата в цепи возбуждения возбuditеля.

Гашение поля должно производиться введением сопротивления в цепь возбуждения возбuditеля путем его дещунтирования блок-шайбой выключателя при отключении последнего.

Защита от падения напряжения на статоре и тепловая защита двигателя должны быть демонтированы. В статье приводятся осциллограммы, подтверждающие правильность сделанных выводов.

Электричество, № 5, 1955.

ПРИМЕНЕНИЕ ШУНТИРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ

Компенсация $\cos \varphi$ в распределительных сетях низкого напряжения позволяет снизить токовую нагрузку трансформаторов и кабелей и увеличить, таким образом, пропускную способность сети. Экономически наиболее целесообразно осуществление компенсации реактивной мощности путем непосредственного присоединения конденсаторов к зажимам сетевых трансформаторов.

Конденсаторная батарея мощностью 80 *квар*, присоединенная к зажимам трансформатора 500 *квар*, работающего при максимальной нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$, обеспечивает повышение пропускной способности установок на 12...13%. Усовершенствования в технологии изготовления бумажной изоляции конденсаторов позволили

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассматриваются общий принцип действия магнитных усилителей и применение этого принципа для объяснения электромагнитных явлений в схемах магнитных усилителей с независимым возбуждением и самовозбуждением. Кроме того, рассматриваются влияния колебаний напряжения сети и частоты переменного тока на характеристики магнитных усилителей.

В разделе «Динамические свойства магнитных усилителей» указано, что минимальное значение постоянной времени магнитного усилителя при питании его напряжением с частотой 50 *Гц* составляет 0,01 *сек*. Показаны способы снижения значения постоянной времени магнитных усилителей. Рассмотрены возможности применения магнитных усилителей в различных промышленных электросхемах.

СХЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОМОЩИ ДРОССЕЛЕЙ НАСЫЩЕНИЯ

Для управления сетками ионных выпрямителей и инверторов требуются периодические импульсы напряжения с крутым фронтом, фазу которых можно плавно регулировать. Для получения подобных импульсов разработан ряд схем, основанных на свойствах дросселей насыщения с прямоугольной петлей намагничивания.

Простейшие схемы для получения управляющих импульсов предусматривают последовательное включение линейного и нелинейного (насыщающегося) дросселей на синусоидальное напряжение питания. Цепь нагрузки включается параллельно дросселю насыщения. В этом виде схема пригодна лишь для получения маломощных импульсов.

ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ МАШИН, ДЕЙСТВУЮЩАЯ ПРИ ПОТЕРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Описывается защита, разработанная фирмой Вестингауз, предназначенная для отключения и аварийной сигнализации при потере возбуждения в синхронных машинах. Защита применима как в синхронных генераторах, так и в синхронных двигателях и синхронных компенсаторах.

В схему защиты входят: дистанционное реле сопротивления, реле направления мощности и реле напряжения. Небольшая задержка в цепи действия защиты на отключение осуществляется промежуточным реле, замедленным на отпадание.

Отмечается, что отключение синхронных машин при потере возбуждения должно производиться при определенных балансах реактивной мощности в системе, по-

ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ И КАРУСЕЛЬНЫХ СТАНКОВ И ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

За последние несколько лет в Советском Союзе разработан и изготовлен ряд новых моделей тяжелых металлорежущих станков. Среди них имеются уникальные токарные, карусельные, фрезерные и другие станки, предназначенные для обработки изделий весом до 200...500 *т*, необходимых для создания тяжелых машин металлургической промышленности, агрегатов крупных гидростанций и т. п.

Одной из весьма существенных черт современных тяжелых станков является применение на них электроприводов с глубоким и точным регулированием скорости, применение электрических регуляторов скорости резания, величины подачи, момента вращения электродвигателей и т. п.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНЫМ ПРОКАТНЫМ СТАНОМ

В статье приведен анализ одной из разработанных ЦКБ треста «Электропривод» систем управления и на ее примере показана методика расчета основных параметров схем управления главными приводами реверсивных горячепрокатных станов.

Показано, что применение машин с многоходовыми обмотками якорей привело к существенному увеличению электромагнитных постоянных времени и демпфирующего действия вихревых токов, а также уменьшению потерь на возбуждение.

Изложена методика построения статических характеристик основных узлов системы, при помощи которых произведен качественный анализ режимов управления, обоснована целесообразность построения рас-

РУДНИЧНЫЙ ЭЛЕКТРОВОЗ С МЕХАНИЧЕСКИМ ИНЕРЦИОННЫМ АККУМУЛЯТОРОМ

Механический инерционный аккумулятор представляет собой стальной маховик, разгоняемый до большой скорости на остановках электровоза. Маховик вращается в герметическом корпусе, наполненном водородом, на общем вертикальном валу с трехфазной короткозамкнутой асинхронной машиной.

При зарядке аккумулятора асинхронная машина работает в режиме двигателя и разгоняет маховик до скорости около 3000 *об/мин*. Период разгона длится около 3 *мин*. При движении электровоза маховик отдает кинетическую энергию асинхронной машине, работающей в режиме генератора с возбуждением от конденсаторной батареи.

Минимальная рабочая скорость маховика принимается равной 1500 *об/мин*. Оптимальные параметры

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕВОДА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ С ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ТРЕХФАЗНЫЕ

Широкая электрификация морских судов на переменном токе тормозится трудностями, которые встречаются при электрооборудовании некоторых типов регулируемых приводов. В качестве примеров таких приводов автор рассматривает электроприводы лебедок и вентиляторов. В первом случае на постоянном токе применяются либо система генератор-двигатель, либо двигатель постоянного тока с включаемым параллельно якорю сопротивлением. Оба эти решения отличаются плохим эксплуатационным к. п. д. Для привода 2-тонных лебедок на переменном токе сконструирован специальный тип асинхронного двигателя 16 *л. с.* с тремя обмотками на роторе: 1) 16-полюсной короткозамкнутой на 375 *об/мин*; 2) 4-полюсной фазовой с контакт-

Развитие станочного электропривода позволило по-новому решить некоторые вопросы конструирования и эксплуатации тяжелых станков. При этом в их конструкцию были внесены новые принципы, позволяющие, с одной стороны, уменьшить вес и упростить изготовление станков, а с другой, — повысить их эксплуатационные характеристики.

В статье приводится ряд принципиальных схем, отражающих современные тенденции в области проектирования станочного электропривода, и дается краткое обоснование их применения.

Рассматриваются перспективы применения ионного электропривода, электромагнитных усилителей и систем электрического вала.

Электричество, № 5, 1955.

достигнуть удвоения номинальной мощности конденсаторов 230 в при увеличении объема всего лишь на 20%.

Условия работы конденсаторов в низковольтных кабельных сетях выявили специфические требования к изоляции и конструкции конденсаторов. Ограниченное пространство и трудность отвода излучаемого тепла в подземных трансформаторных помещениях вызывают необходимость повышения верхнего предела температуры окружающей среды с 40 ... 50 до 55° С.

Для защиты стального корпуса конденсатора от коррозии применяются покрытие слоем цинка толщиной около 0,2 мм и последующая окраска специальным органическим красителем.

Защита конденсатора от коротких замыканий при пробое его изоляции осуществляется при помощи предохранителей, устанавливаемых на выводах конденсаторов.

El. Eng., стр. 609, № 7, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

смазываемых узлов и определены предельно возможные форсировки переходных процессов.

Произведен расчет параметров стабилизации из условия обеспечения возбудителем генератора достаточной форсировки и компенсации омического падения напряжения в цепи возбуждения генератора.

Получены сравнительно простые формулы, позволяющие определить сопротивления в цепи первичных обмоток стабилизирующих трансформаторов, причем принятые допущения носят обычный характер и не приводят к недопустимым погрешностям.

Разработана методика расчета переходных процессов управления потоком возбуждения прокатного двигателя с учетом действия вихревых токов возбудителя и двигателя.

Основные положения разработанной методики являются общими и могут быть применены при расчете других систем управления.

Электричество, № 5, 1955.

Магнитный усилитель может быть использован в системах автоматического регулирования, где требования к быстрдействию системы снижены. Разбирается вопрос о суммарной постоянной времени нескольких каскадов магнитных усилителей.

Приводится описание типового ряда однофазных магнитных усилителей мощностью 30 ... 12 000 ва (коэффициент ряда $1:\sqrt{3}$). Магнитопровод этих магнитных усилителей набран из П-образной листовой электростали толщиной 0,35 мм.

В зависимости от типоразмера магнитного усилителя коэффициенты усиления по мощности находятся в пределах 300 ... 500 000. Показаны конструкция магнитопровода и расположение обмоток в типовых магнитных усилителях.

ETZ-A, стр. 753, № 22, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

маховика зависят от потребной величины кинетической энергии. В шахтных условиях диаметр маховика не должен превышать 1,3 м.

Статор асинхронной машины можно выполнить с одной или двумя полюсопереключаемыми обмотками. Возможно применение обычной двухполюсной обмотки. В качестве регулируемого тягового двигателя применим трех- или четырехскоростной трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель.

При маховике весом 1,2 т и диаметром 1,25 м электровоз может перевозить состав из восьми вагонов грузоподъемностью 1 т на расстояние 1 км.

Новый электровоз целесообразно испытывать в тех горных выработках, где аккумуляторные электровозы не допускаются по условиям безопасности.

Электричество, № 5, 1955.

Мощные управляющие импульсы могут быть получены в такой же схеме, если включить последовательно с нагрузкой дополнительный конденсатор. В начале полупериода нелинейный дроссель насыщен и замыкает цепь нагрузки накоротко. Когда напряжение питания близко к амплитудному значению, нелинейный дроссель перемагничивается и практически перестает пропускать ток. Одновременно конденсатор заряжается через линейный дроссель до напряжения, близкого к удвоенной амплитуде напряжения питания. Когда нелинейный дроссель вновь насыщается, конденсатор разряжается через него на цепь нагрузки. Ток разряда имеет форму полуинусоиды большой амплитуды и малой длительности.

Е и М, стр. 281, № 11, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

ными кольцами и 3) 2-полюсной короткозамкнутой, что позволяет получить широкую гамму скоростей и характеристик двигателя при к. п. д., лучшим, чем в обеих системах постоянного тока. Другой вариант привода лебедки на переменном токе — асинхронный короткозамкнутой двигатель в сочетании с регулируемой гидромuftой. Для привода вентиляторов, требующих в зависимости от времени года и климатических условий регулирования скорости, хотя и в небольшом диапазоне, предлагается применять либо двухскоростные двигатели с переключением полюсов в отношении 1:1,25, т. е. 8- и 10-полюсные, либо обыкновенные короткозамкнутые двигатели с питанием их от общего асинхронного преобразователя частоты током с частотой $50 \pm 6,3$ гц, что дает три ступени скорости. Наконец, не исключается возможность обходиться нерегулируемым двигателем, применяя для регулирования количества воздуха задвижки.

ETZ-A, т. 75, стр. 576, № 18, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

этому рекомендуется в некоторых случаях ограничиваться аварийной сигнализацией. Аварийный сигнал подается при срабатывании дистанционного реле и реле направления мощности.

В тех случаях, когда необходимо произвести отключение синхронной машины при потере возбуждения, вводится дополнительный контроль с использованием реле напряжения. Приводится схема включения защиты.

Все перечисленные элементы, входящие в защиту, встроены в общий кожух.

El. Eng., т. 73, стр. 1008, № 11, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

НЕКОТОРЫЕ ИНТЕРЕСНЫЕ СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВАЛА

Системы электрического вала трехфазного тока получают все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Описываются приводы, выполненные с системами электрического вала для порталных кранов, вибрационных сепараторов, загрузочных устройств печей, кардочесальных и бумагоделательных машин, прессов и металлорежущих станков. В последних системы электрического вала применяются для связи главного привода с приводом подач при нарезании резьбы (в тяжелых токарно-винторезных станках) и привода поперечины (в тяжелых карусельных станках). Особенный интерес представляет собой система электрического вала в токарно-винторезном станке. Главный привод станка питается по системе генератор-двигатель. На одном из валов коробки скоростей уста-

ПЛЕНКОЭЛЕКТРОКАРТОН — НОВЫЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

В электродвигателях с изоляцией класса А для изоляции обмотки относительно корпуса применяют лакоткань, располагаемую между двумя слоями электрокартона. Наличие трех слоев изоляции в пазу служит причиной образования дополнительных воздушных прослоек между обмоткой и пакетом статора, которые приводят к ухудшению теплопроводности и влагостойкости изоляции, несмотря на пропитку ее лаком.

Для повышения теплостойкости и влагостойкости пазовой изоляции в электродвигателях класса А разработан новый материал — пленкокартон — электрокартон, оклеенный триацетатной пленкой.

Для склейки картона и пленки использованы лаки типа полиакрилата или смеси масляноглицеральных и

ВЛИЯНИЕ ПОЛУПРОВОДЯЩЕЙ ГЛАЗУРИ НА РАЗРЯДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ВОДЛЬ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФАРФОРА

Метод плавного подъема напряжения как способ приложения напряжения к образцу, который применяется при испытании обычных изоляторов, неприменим при изучении разрядных явлений по поверхности твердых диэлектриков, покрытых полупроводником. В этом случае единственно правильным способом приложения напряжения к образцу является метод внезапного приложения напряжения в виде импульса. При внезапном приложении напряжения к образцу необходимо исключить возможность возникновения перенапряжения на образце. В статье анализируется явление возникновения перенапряжения на объекте испытания и предлагается схема электронного выключателя с регулировкой момента приложения напряжения.

КАБЕЛИ 220 ... 400 кв

Испытания опытных конструкций кабелей с маслом или газом под давлением позволили усовершенствовать конструкции кабелей для напряжений 220 ... 400 кв.

Уменьшение толщины бумаги, применяемой для изоляции кабелей высокого напряжения, с 0,1 до 0,015 мм увеличивает пробивную напряженность изоляции при промышленной частоте на 70%. Уменьшение толщины изоляции, обусловленное применением более тонкой бумаги, в кабелях, прокладываемых в стальных трубах, позволяет уменьшить диаметр труб. Так, диаметр трубы для трехжильного кабеля 400 кв сечением 1 000 мм² не превысит 300 мм.

При испытаниях было установлено, что увеличение рабочего давления в кабелях выше 20 кг/см² не оказывает заметного влияния на электрическую прочность кабелей. Замена свинцовой оболочки полиэтиленовой,

ИСПЫТАНИЕ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Электростанции ежегодно в порядке профилактики проводят планово-предупредительный осмотр и ремонт электродвигателей собственных нужд. Подобные же осмотры и ремонты электродвигателей производят и многие другие предприятия. Важно во время этих осмотров и ремонтов выявить слабые места витковой изоляции и устранить поврежденные секции.

В статье описываются метод и аппарат для испытания витковой изоляции обмоток электродвигателей в условиях эксплуатации, позволяющие подвергать секции импульсным испытаниям.

При помощи мощного электромагнита, питаемого тиратронным импульсным генератором, индуктируется

МЕХАНИЗМ ИМПУЛЬСНОЙ КОРОНЫ И ПРОБОЯ В МАСЛЕ

Масло широко применяется в качестве изолирующей среды в электрических аппаратах. Исследование механизма пробоя масла проводится обычно в однородном поле с медленным изменением напряжения. Однако электрические аппараты часто работают в импульсном режиме в условиях неоднородного поля. В статье приводятся результаты опытов по изучению короны и пробоя в масле в импульсном режиме.

Для исследований был выбран 77-миллиметровый разрядник с электродами острие — плоскость. К разряднику подводились положительная и отрицательная стандартные волны импульсного напряжения 1,5/40 мксек с амплитудой 190 и 240 кв. Это напряжение было немного выше критического напряжения пробоя разряд-

ИОНИЗАЦИЯ БУМАЖНОЙ МАСЛОПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Ионизация, возникающая в маслопропитанной изоляции при постепенном повышении периодически изменяющегося напряжения, сначала носит неустойчивый, случайный характер и имеет сравнительно небольшую интенсивность. По мере роста напряжения интенсивность резко увеличивается и ионизация принимает устойчивый характер, воспроизводящийся от образца к образцу (характеристическая ионизация). На процесс образования и развития характеристической ионизации существенное влияние оказывает поле пространственных зарядов внутри диэлектрика. На выпрямленном напряжении эта ионизация не возникает. При относительно быстро изменяющихся непериодических переходных напряжениях возникает аналогичная ионизация, не носящая устойчивого характера — х а р а к-

СТАЛЬНЫЕ ЛЕНТЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КАБЕЛЕЙ ОТ ИНДУКТИВНОГО ВЛИЯНИЯ

Одним из эффективных средств защиты кабелей связи от индуктивного влияния линий электропередачи является бронирование кабелей стальными лентами. Экранирующее действие брони тем лучше, чем выше ее магнитная проницаемость. В связи с этим проводились опыты с целью повышения магнитной проницаемости материала брони и улучшения защитного коэффициента, т. е. отношения э. д. с., индуктируемой в жиле кабеля, к э. д. с., индуктируемой в его металлической оболочке.

В качестве материала брони были исследованы: Армо-железо, томасовская сталь и кремнистая сталь. Результаты исследования показали максимальную магнитную проницаемость в 1 600 при 50 гц и 1 800 при 16 $\frac{2}{3}$ гц для кремнистой стали и Армо-железа,

триэтилглицольфталевых. Лаки применяются 75—80-процентной концентрации, что способствует устранению коробления картона, вызываемого избытком растворителя.

Изготовление пленкокартона производят на машине конвейерного типа, в которой совмещены операции лакировки, сушки и склейки триацетатной пленки с подложкой. Электродвигатели с изоляцией из пленкокартона имеют более высокое сопротивление изоляции при относительной влажности 95% и температуре 125°С, чем электродвигатели с изоляцией из лакоткани и картона. Применение пазовой изоляции из пленкокартона исключает необходимость использования более дорогих материалов, как лакошелк и лакоткань.

Электричество, № 5, 1955.

играющей роль мембраны, снижает вес кабеля и устраняет возможность излома оболочки при изменении механических напряжений.

Для снижения потерь целесообразно применение изоляционной бумаги и масла с низкими удельными потерями. Диэлектрические потери в кабелях 380 кВ сечением 350 ... 1 000 мм² при толщине изоляции 22 мм составляют 12 ... 17 вт/км.

Благодаря лучшей теплоотдаче кабели в свинцовой оболочке имеют значительно большую пропускную способность, чем кабели, прокладываемые в стальных трубах. Прокладка кабелей 220 ... 400 кВ в вентилируемых туннелях дает возможность увеличения передаваемой мощности на 40% по сравнению с кабелями, прокладываемыми в траншее

СІГКЕ, доклад № 217, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

ника. При большинстве измерений плоский электрод был покрыт изолирующим слоем для уменьшения влияния отраженного света при пробое на фотографический процесс. В связи с тем, что разряд начинался с острия, этот слой никак не влиял на пробой. Механизм пробоя регистрировался одновременно быстро вращающейся и неподвижной камерами и фотоэлементом; кроме того, снимались осциллограммы тока. Снимки показывают распространение положительного и отрицательного стримеров и разрядный ток. Явление пробоя может быть разделено на четыре периода для каждой полярности: начальный стример с острия, последовательное распространение стримера в масле, возникновение канала и сокращение разряда. Механизм пробоя при отрицательной полярности на острие похож на разряд молнии, происходящий в естественных условиях. Общая скорость распространения стримера равна около 0,3 см/мксек, что в 50 раз меньше скорости распространения молнии.

El. Eng., т. 73, стр. 637, № 7, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

отожженного при температуре ниже 700°С и в 2 500 при 50 гц и 2 900 при 16²/₃ гц для Армко-железа, отожженного при температуре 1 000°С.

Приведены зависимости магнитной проницаемости различных сортов стали от частоты, напряженности поля и пластической деформации материала. Установлено, что Армко-железо особенно пригодно в качестве материала для брони кабелей связи, расположенных близко от высоковольтных линий или в непосредственной близости от железных дорог и подверженных сильному индуктивному воздействию при коротких замыканиях в линиях высокого напряжения.

ETZ-A, стр. 814, № 24, 1954.

(Э-во, 5, 1955)

новлен электродвигатель с фазным ротором (датчик). При переключении коробки скоростей одновременно должно производиться переключение скорости вращения датчика. Аналогичный двигатель (приемник) осуществляет подачу. Оба двигателя работают в системе электрического вала, вращаясь против поля. Особенностью системы электрического вала является сохранение согласованного движения главного привода и поддачи при аварийном отключении напряжения сети. Это достигается возбуждением асинхронного гоного двигателя преобразовательного агрегата главного привода при помощи статических конденсаторов с питанием от этой цепи датчика и приемника системы электрического вала.

В тяжелых токарно-карусельных станках с приводом перемещения поперечины от двух электродвигателей применяется система электрического вала с уравнительными машинами.

Brown Boveri Mitteilungen, стр. 153, № 5, 1954. (Э-во, 5, 1955)

Исследования на базе предложенной схемы показали, что наличие полупроводящей глазури значительно улучшает разрядные характеристики загрязненной поверхности фарфора, причем это влияние сильно зависит от отношения сопротивления полупроводящей глазури на единицу поверхности к сопротивлению слоя загрязнения на том же участке. С уменьшением значения этого соотношения возрастают напряжения перекрытия и время от момента приключения напряжения к образцу до возникновения перекрытия. Такое улучшение наблюдалось и в тех случаях, когда сопротивление полупроводящей глазури значительно больше, чем сопротивление слоев загрязнения

Результаты исследования позволяют утверждать, что одним из главных факторов, снижающих напряженные перекрытия загрязненной поверхности твердых диэлектриков, является возникновение сильного неравномерного распределения напряженности по поверхности.

Электричество, № 5, 1955.

высокое напряжение в витках испытываемой секции, лежащей в пазу, над которым установлен электромагнит. Величина наводимого напряжения регулируется при помощи автотрансформатора. При отсутствии пробоя между испытываемыми витками ток по ним протекать не будет. Если в пазу, над которым расположена середина (ось) электромагнита, произойдет пробой витковой изоляции и образуются короткозамкнутые витки, то наведенная в них потоком электромагнита э. д. с. вызовет импульсный ток, который создаст вокруг короткозамкнутых витков другой магнитный поток, распределенный по всей их длине. Часть этого потока замкнется через контрольный электромагнит, установленный над тем же пазом, и наведет в его обмотке э. д. с. Присоединенная к этой обмотке сигнальная неоновая лампа загорится. Вместо лампы можно применить в качестве индикатора пробоя микроамперметр или электронулучевую трубку аппарата СМ-1.

Электричество, № 5, 1955.

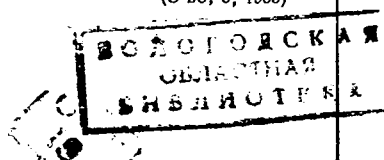
теристическая переходная ионизация. Устойчивая ионизация также не возникает, если промежутки времени между двумя скачками напряжения настолько велики, что пространственный заряд в диэлектрике, образовавшийся при скачке, успевает стечь.

Напряжение возникновения ионизации в газовой полости не зависит от диаметра пузыря, толщины диэлектрика, рода диэлектрика и места возникновения пузыря — у электрода или внутри диэлектрика. Напряженность зажигания зависит от толщины пузыря.

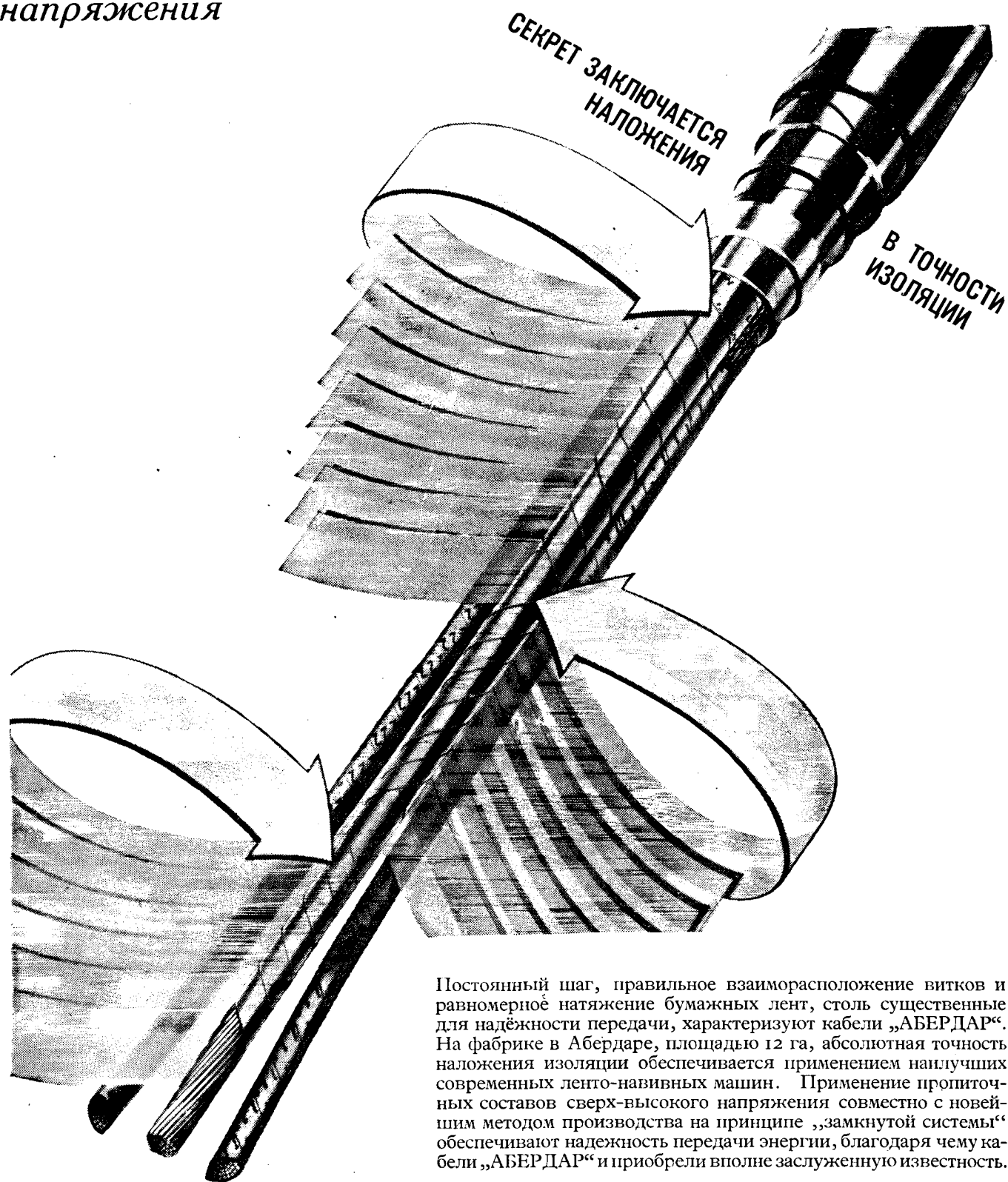
Найдено, что в одинаковых условиях конденсаторы, пропитанные пентахлордифенилом, оказались значительно более устойчивыми в эксплуатации, чем конденсаторы, пропитанные минеральным маслом.

Наиболее высокие допустимые напряженности достигаются в конденсаторах, собранных из секций, изготовленных из возможно тонкой бумаги и содержащих по 5—6 слоев между обкладками.

Электричество, № 5, 1955.



Безукоризненная изоляция для кабелей высокого напряжения



Постоянный шаг, правильное взаиморасположение витков и равномерное натяжение бумажных лент, столь существенные для надёжности передачи, характеризуют кабели „АБЕРДАР“. На фабрике в Абердаре, площадью 12 га, абсолютная точность наложения изоляции обеспечивается применением наилучших современных ленто-навивных машин. Применение пропиточных составов сверх-высокого напряжения совместно с новейшим методом производства на принципе „замкнутой системы“ обеспечивают надёжность передачи энергии, благодаря чему кабели „АБЕРДАР“ и приобрели вполне заслуженную известность.

Aberdare Cables

ABERDARE CABLES LIMITED · NINETEEN WOBURN PLACE · LONDON · АНГЛИЯ

Фабрика: Aberdare, Glam., South Wales.



Измерительные приборы

DAWE



в промышленности



Стробоскопы

Тип — Серия № 1200

для контроля высокоскоростных процессов и наблюдения быстродвижущихся объектов.

Непосредственный отсчёт в пределах 150 — 18 000 об/мин.

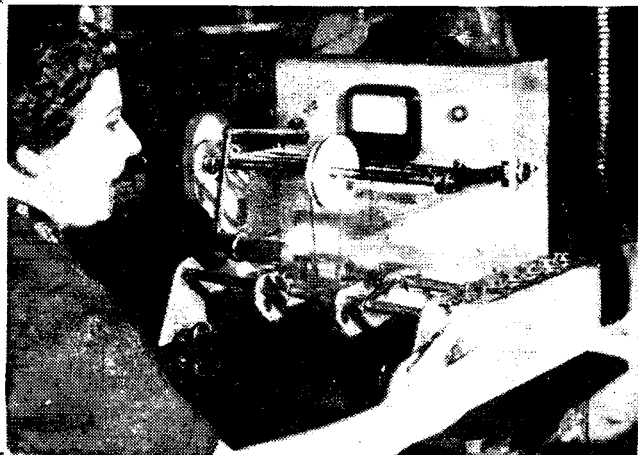
Проверка вращающегося анода рентгеновской трубки на ускорение и плавность действия в течении нескольких минут посредством СТРОБОФЛАША „DAWE“
(С любезного разрешения фирмы Муллард Лтд.)

Машины для динамического уравновешивания

Тип 1250

для роторов весом от 28 г до 4,5 кг.

Балансировка якорей ручных электрических сверл.
(С любезного разрешения фирмы Бляк и Деккер Лтд.)



Ультра-акустический прибор для измерения толщины

Тип 1101 и 1101/1

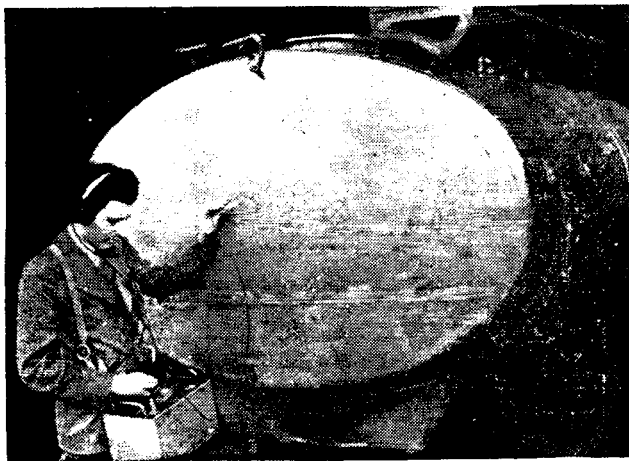
для измерения толщины материалов в случаях, где доступ имеется лишь к одной поверхности.

Диапазон измерений:

1101 от 1,5 мм до 300 мм стали.

1101/1 от 0,5 мм до 100 мм стали.

Измерение толщины материала на выпуклом конце кислотной цистерны во время капитального ремонта. После сварки подобного рода измерения механическим путём фактически невозможны.



* Вышеприведенные и прочие применения измерительных приборов „Dawe“ подробно описаны в брошюре „Измерительные приборы „Dawe“ в промышленности“, которую мы охотно вышлем Вам по запросу — бесплатно.

Также полные технические данные от:

DAWE INSTRUMENTS LTD.

99 UXBRIDGE ROAD, EALING, LONDON, W.5 · АНГЛИЯ