

Новая схема управления полем двигателя блуминга

Инж. В. И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Москва

Минимальные времена управления электроприводом при регулировании скорости двигателя путем изменения его поля возбуждения могут быть получены при условии протекания переходных процессов изменения поля по определенному оптимальному закону. Поскольку применяемые в настоящее время схемы управления не позволяют получить характер изменения поля двигателя во времени, удовлетворяющий условиям оптимальности, то была разработана и исследована новая, более совершенная схема, позволяющая существенно увеличить темп разгона и замедления прокатного двигателя при управлении в диапазоне выше основной скорости.

Условия получения минимального времени разгона и замедления двигателя при управлении его полем возбуждения. Из уравнения движения электропривода

$$M = k_1 \Phi I = M_c + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

следует, что для получения наибольших возможных ускорений необходимо, чтобы ток якоря двигателя в переходных режимах поддерживался на максимально допустимом уровне.

Предельная величина нагрузки машины постоянного тока в динамических режимах определяется условиями надежной коммутации тока на коллекторе, характеризуемыми значением постоянной коммутации

$$c = \alpha n I, \quad (2)$$

где α — постоянный коэффициент, определяемый конструктивными данными машины.

Эта величина при толчках тока в якоре на любых скоростях не должна превосходить некоторого предельного значения c_m . Для поддержания постоянства величины c_m в режимах ослабления и усиления поля двигателя максимальное значение тока якоря должно изменяться по закону

$$I_m = \frac{c_m}{\alpha n} \quad (2a)$$

Из уравнения

$$U_z = RI + k_2 \Phi n,$$

пренебрегая величиной падения напряжения в главной цепи, имеем:

$$n = \frac{U_z}{k_2 \Phi}, \quad (3)$$

где U_z — напряжение генератора;

R — сопротивление главной цепи.

Подставив это выражение в формулу (2a), получим:

$$I_m = m_1 \Phi, \quad (4)$$

где

$$m_1 = \frac{c_m k_2}{\alpha U_z}.$$

Из последнего выражения следует, что для надежной коммутации в режимах управления полем двигателя максимальное значение тока в якоре должно изменяться приблизительно по тому же закону, что и поток.

С учетом этого условия выражение для момента двигателя принимает вид:

$$M = k_1 m_1 \Phi^2, \quad (5)$$

согласно которому для типового реверсивного двигателя МП-7000-50, 7 000 л. с., 50/120 об/мин блуминга ослабление поля в 2,4 раза должно привести к снижению максимального момента в 5,8 раза. Если допустимый максимальный момент двигателя при работе на основной скорости (50 об/мин) $M = 2,5 M_n$, то при максимальной скорости он снизится до 0,43 номинального. Завод «Электросила» принимает уменьшение максимального тока двигателя при переходе от основной к максимальной скорости в пределах 250 ... 190% номинального по прямолинейному закону, чему соответствует снижение вращающего момента от 250 до 80% номинального (кривые I на рис. 1). При этом условии коммутация ухудшается, так как постоянная коммутации возрастает с ослаблением поля почти вдвое. Указанно-

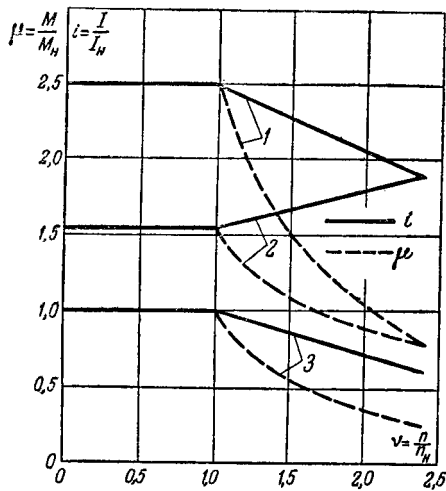


Рис. 1. Характеристики реверсивного двигателя МП-7000-50.

1 — кратковременно допускаемые пики тока якоря и момента двигателя в зависимости от скорости вращения; 2 — кривые изменения тока якоря и момента двигателя при разгоне его с $\mu_c = 0,55 \mu_n$ и $\mu_{дин} = \mu_n$ при полном поле; 3 — кривые изменения динамического тока якоря и момента, обеспечивающие при работе двигателя с моментом статической нагрузки $\mu_c = 0,55 \mu_n$ характеристики 2.

му закону изменения максимального тока соответствует уравнение

$$I_m = I_{mo} - m_2 \left(\frac{n}{n_n} - 1 \right), \quad (6)$$

где I_{mo} — максимально допустимый ток в якоре при полном потоке двигателя;
 n_n — номинальная скорость вращения двигателя.

Для определения оптимального закона изменения поля двигателя воспользуемся уравнениями (1), (3) и (6). Их совместное решение дает:

$$\frac{GD^2}{375} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = (M_c + k_1 m_2 \Phi_n) \Phi^2 - k_1 (I_{mo} + m_2) \Phi^3, \quad (7)$$

где Φ_n — номинальный поток возбуждения двигателя; или в относительных единицах:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = a_1 \varphi^2 - a_2 \varphi^3, \quad (8)$$

где

$$a_1 = (\mu_c + m) s; \quad \varphi = \frac{\Phi}{\Phi_n}; \quad \tau = \frac{t}{T_\theta};$$

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_n};$$

$$a_2 = (i_{mo} + m) s; \quad i_{mo} = \frac{I_{mo}}{I_n}; \quad m = \frac{m_2}{I_n}; \quad s = \frac{n_0 - n_n}{n_0};$$

T_θ — электромеханическая постоянная времени привода.

Решение дифференциального уравнения (8) имеет вид:

$$\tau = \frac{a_2}{a_1^2} \ln \frac{a_2 \varphi}{a_1 - a_2 \varphi} - \frac{1}{a_1 \varphi} + A. \quad (9)$$

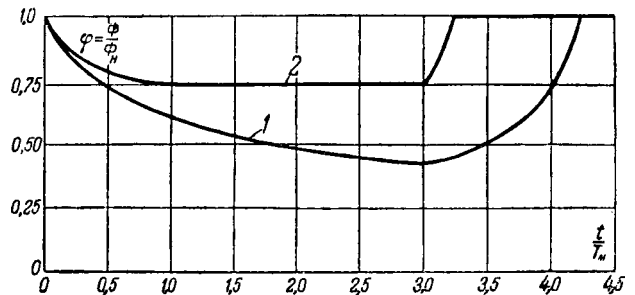


Рис. 2. Кривые ослабления и усиления поля двигателя МП-7000-50 по оптимальному закону.

Определяя постоянную интегрирования из условия, что при $\tau = 0$ $\varphi = \varphi_0 = 1$, получим:

$$\tau = \frac{a_2}{a_1^2} \ln \frac{(a_1 - a_2) \varphi}{a_1 - a_2 \varphi} - \frac{1}{a_1} \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right). \quad (10)$$

Подставив значения a_1 и a_2 в последнее уравнение, получим для режима ослабления поля:

$$\tau = \frac{1}{s} \frac{i_{mo} + m}{(\mu_c + m)^2} \ln \frac{(i_{mo} - \mu_c) \varphi}{(i_{mo} + m) \varphi - (\mu_c + m)} - \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{\mu_c + m} \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi} \right). \quad (10a)$$

Для режима усиления поля

$$\tau = \frac{1}{s} \frac{1}{\mu_c - m} \left(\frac{\varphi - 1}{\varphi} \right) - \frac{1}{s} \frac{i_{mo} + m}{(\mu_c - m)^2} \ln \frac{(i_{mo} + \mu_c) \varphi}{(\mu_c - m) + (i_{mo} + m) \varphi}. \quad (10б)$$

На рис. 2 приведены кривые ослабления и усиления поля двигателя¹ $\varphi = f\left(\frac{t}{T_m}\right)$, где $T_m = \frac{T_\theta}{s}$: кривая 1 построена для диапазона изменения скорости $n \dots 2,4n_n$; кривая 2 — для диапазона $n_n \dots 1,4n_n$.

Кривая 1 удовлетворяет законам изменения тока в главной цепи и момента двигателя, изображенным на рис. 1 кривыми 3 для случая разгона вхолостую или кривыми 2 при разгоне с моментом статической нагрузки $\mu_c = 0,55 \mu_n$.

Для обоих случаев динамическая составляющая момента двигателя при полном поле равна номинальному моменту. Величина момента статической нагрузки, при которой прокатка ведется с выходом на максимальную скорость, выбрана из условия, чтобы при ослабленном поле динамическая составляющая момента была не ниже $0,25 \mu_n$.

Кривая 2 рис. 2 соответствует моменту двигателя $\mu = \mu_{суч} + \mu_c = 1 + 1,5 = 2,5$, при котором возможен меньший диапазон увеличения скорости за счет ослабления поля. Усиление поля рассчитано для режимов замедления с постоянной величиной тока якоря, равной 1,9 номинального, и статическим моментом, равным нулю.

¹ Расчет и построение графиков к данной работе выполнены И. М. Шенброт под руководством автора.

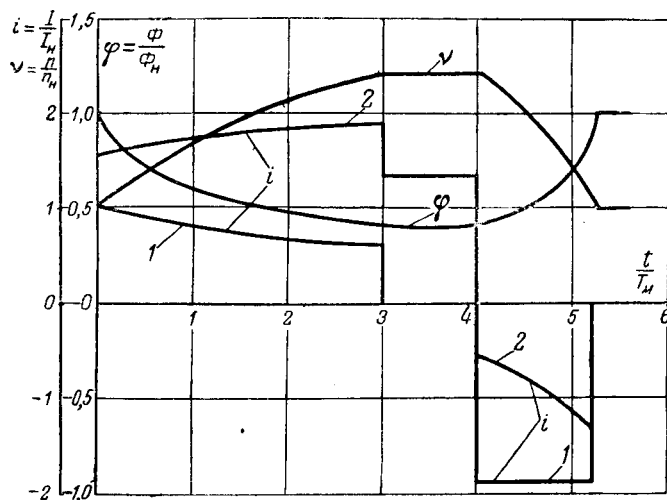


Рис. 3. Расчетные осциллограммы оптимальных переходных процессов при разгоне и замедлении двигателя МП-7000-50.

Расчетная осциллограмма оптимального переходного процесса при разгоне и замедлении двигателя при управлении его полем приведена на рис. 3. Кривая тока I соответствует работе вхолостую, кривая 2 — работе с моментом статической нагрузки $\mu_c = 0,55\mu_n$. Закон изменения поля двигателя во времени в обоих режимах одинаков; скорость v также изменяется приблизительно по одному и тому же закону.

Динамические характеристики. Если в переходном режиме н. с. электромашинного усилителя в схеме управления полем двигателя (рис. 4) изменяется во времени по закону $F_{y, \partial} = \psi_1(\tau)$, а ток возбуждения двигателя $i_{\partial} = \psi_2(\tau)$, то динамической характеристикой будем называть зависимость $i_{\partial} = \psi(F_{y, \partial})$.

В зависимости от структуры схемы управления, характера применяемых в ней обратных связей, нелинейных элементов, а также величин постоянных времени отдельных звеньев зависимость $i_{\partial} = \psi(F_{y, \partial})$ может быть весьма разнообразной. Зная эту зависимость для оптимального переходного режима, можно путем соответствующего подбора параметров и разработки схемы управления полем обеспечить удовлетворение поставленным требованиям.

Для цепи обмотки возбуждения двигателя имеем:

$$\sigma \omega \frac{d\Phi}{dt} + r_{\partial} i_{\partial} = E_{\partial}, \quad (11)$$

где σ — коэффициент рассеяния;
 r_{∂}, ω — сопротивление и число витков обмотки возбуждения двигателя;
 E_{∂} — э. д. с. возбудителя двигателя.

При соединении полюсов возбудителя ВД в две параллельные ветви и наличии в цепи якоря УД добавочного сопротивления постоянная времени цепи возбуждения возбудителя будет

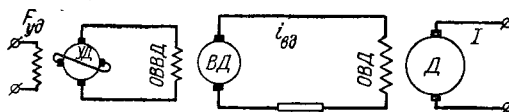


Рис. 4. Принципиальная схема возбуждения прокатного двигателя.
Д — двигатель; ВД — возбудитель двигателя; УД — подвозбудитель.

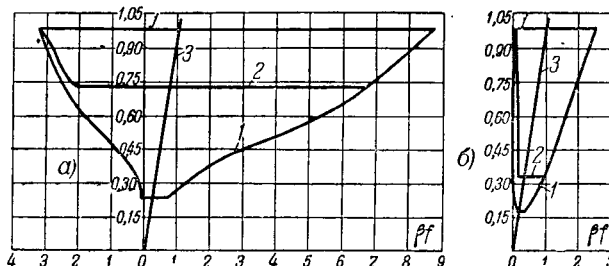


Рис. 5. Динамические характеристики при управлении полем двигателя МП-7000-50 (а) и двигателя мощностью 3400 л. с., 115/175 об/мин (б).

1 — соответствует кривой изменения поля 1 рис. 2; 2 — соответствует кривой изменения поля 2 рис. 2; 3 — характеристика намагничивания.

весьма мала, и поэтому ею наряду с постоянной времени УД мы пренебрежем. Тогда, принимая характеристики намагничивания УД и ВД прямолинейными, можно считать, что э. д. с. E_{∂} пропорциональна $F_{y, \partial}$:

$$E_{\partial} \approx \beta_1 F_{y, \partial}. \quad (12)$$

Подставляя выражение E_{∂} из (12) в (11) и записывая последнее в относительных единицах, получим:

$$\sigma \theta \cdot \frac{d\varphi}{d\tau} + j = \beta f, \quad (13)$$

где

$$\theta = \frac{T_s}{T_{\partial}}; \quad \beta = \beta_1 \frac{F_{y, \partial, n}}{U_{\partial, \partial, n}}; \quad f = \frac{F_{y, \partial}}{F_{y, \partial, n}}; \quad j = \frac{i_{\partial}}{i_{\partial, n}}$$

T_s — электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения двигателя.

Или с учетом уравнения (8):

$$j + (a_1 \varphi^2 - a_2 \varphi^3) \sigma \theta = \beta f. \quad (14)$$

Совместное решение последнего уравнения с уравнением $\varphi = \psi_3(j)$, выражающим кривую намагничивания двигателя, позволяет найти динамические характеристики для ослабления и усиления поля двигателя, удовлетворяющие оптимальным условиям. Расчет зависимости $j = \psi(f)$ удобнее производить графоаналитически, пользуясь непосредственно кривой намагничивания.

На рис. 5 приведены динамические характеристики при управлении полем двигателя МП-7000-50 и двигателя мощностью 3400 л. с., 115/175 об/мин. Динамическим параметром, характеризующим величины требующихся форсировок изменения тока возбуждения двигателя в переходных режимах, является отношение электромагнитной

постоянной времени к электромеханической

$$\theta = \frac{T_s}{T_0}$$

Средние значения θ примерно таковы:

а) для электропривода с двигателем МП-7000-50 $\theta \approx 100$;

б) для электропривода с двигателем 3400 л. с., 115/175 об/мин $\theta \approx 20$.

Сравнение характеристик рис. 5 показывает, что с увеличением θ происходит значительное возрастание требующихся форсировок возбуждения. Из этих кривых могут быть сделаны также следующие выводы:

1. При усилении поля двигателя форсировка должна возрастать постепенно, причем при большом θ кратность увеличения форсировки значительна (рис. 5, а).

2. Начальная форсировка при усилении поля должна быть тем ниже, чем больше было ослаблено поле.

3. При ослаблении поля начальная форсировка должна быть наибольшей, а затем по мере уменьшения тока возбуждения она должна постепенно снижаться.

4. Требуемые величины форсировок в режимах ослабления поля менее значительны, чем при усилении поля. Объясняется это тем, что принятые в расчетах динамические токи имеют меньшую величину при ослаблении поля ($i = i_n$) и большую — в режиме усиления поля ($i = 1,9i_n$).

Следует отметить, что сделанное предположение о прямолинейности характеристик намагничивания УД и ВД справедливо лишь для последнего. Что касается УД, то при больших форсировках его работа происходит в области криволинейной части характеристики намагничивания. Поэтому для обеспечения переходных процессов, соответствующих рис. 5, н. с. УД должна изменяться в более значительных пределах. Его результирующая н. с.

$$f = f_s - f_y \pm f_c, \quad (15)$$

где f_s — н. с. задающей обмотки;

f_y — н. с. дифференциальной обмотки, создающей обратную связь по току возбуждения двигателя;

f_c — н. с. стабилизирующей обмотки.

В первом приближении полагаем $f_c = 0$, т. е. считаем, что система лишена гибких обратных связей. Тогда статические и динамические характеристики системы будут практически одинаковы, т. е. величина f в зависимости от j будет изменяться как в статике, так и в динамике по одному и тому же закону (рис. 5). Следовательно, схема управления полем двигателя должна быть построена таким образом, чтобы разность $f_s - f_y$ при усилении поля постепенно возрастала, а при ослаблении соответственно снижалась по заданным характеристикам. Это может быть достигнуто различными путями.

Ниже приведено краткое описание широко распространенной схемы управления полем про-

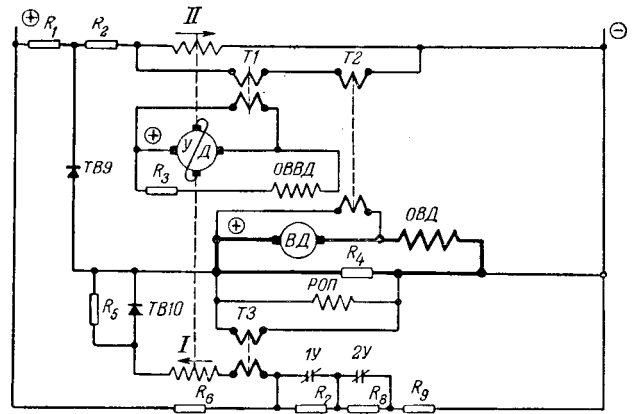


Рис. 6. Существующая схема управления полем двигателя.

катного двигателя, а также предложенной схемы и дана оценка их характеристик с точки зрения сформулированных требований.

Существующая схема электромашинного управления полем прокатного двигателя. Применяемая в настоящее время схема управления полем двигателя (рис. 6) состоит из возбуждателя ВД и электромашинного усилителя УД, служащего подвозбудителем. Управляющая обмотка I усилителя УД выполняет одновременно функции задающей и дифференциальной обмоток. Она включена на разность двух напряжений: падения напряжения (задающего), снимаемого с части делителя $R_6 - R_9$, и падения напряжения на сопротивлении R_4 (отрицательная обратная связь), пропорционального величине тока возбуждения прокатного двигателя. Дифференциальная обмотка II независимого возбуждения усилителя питается от сети неизменного напряжения через сопротивление R_1 и R_2 ; ее можно назвать обмоткой смещения. Не показанные на схеме управляющие обмотки III и IV усилителя соединены последовательно и включены в схему регулятора нагрузки. Их воздействие на характер протекания переходных процессов при управлении полем двигателя здесь не учитывается.

В схеме имеются три трансформаторные связи со стабилизирующими трансформаторами T1, T2 и T3. Благодаря наличию в цепи управляющей обмотки I вентилей TV10, включенного параллельно с сопротивлением R_5 , н. с. этой обмотки нелинейна и величина ее зависит от направления тока в обмотке. Примененный в схеме контур с вентилем TV9 предназначался для ограничения возрастания тока возбуждения выше номинального. Однако его действие мало эффективно.

Для изменения тока возбуждения двигателя служат контакторы 1Y и 2Y. При полном поле возбуждения двигателя сопротивления R_7 и R_8 введены, а при ослабленном поле — закорочены.

Результирующая н. с. усилителя УД в динамических режимах управления полем

$$f = f_{I,s} - f_{I,d} - f_{II,o} - \psi_4(f_{II,1}; f_{II,2}; f_{I,3}), \quad (16)$$

где $f_{I,s}$ — задающая н. с., создаваемая обмоткой I;

- $f_{1,0}$ — дифференциальная н. с. обмотки I от обратной связи по току возбуждения двигателя;
- $f_{11,0}$ — н. с. смещения, создаваемая обмоткой II;
- $f_{11,1}; f_{11,2}$ — н. с. стабилизации, обусловленные действием трансформаторов T1 и T2;
- $f_{1,3}$ — н. с., обусловленная действием противорегулировочного трансформатора T3.

Вследствие того что в схеме несколько связей осуществляется посредством одной управляющей обмотки усилителя, каждая из них искажается другими, и поэтому уравнение (16) является приближенным.

В установившемся режиме последнее слагаемое в уравнении (16) обращается в нуль и статические характеристики описываются уравнением

$$f = f_{1,3} - f_{1,0} - f_{11,0} \quad (16a)$$

Если ток в делителе напряжения $R_5 - R_9$ составляет 1,5... 2*a*, то можно считать

$$f_{1,3} = \text{const} \text{ и } f_{1,0} = \beta_T \cdot j.$$

Тогда уравнение статической характеристики примет вид:

$$f = f_{1,3} - f_{11,0} - \beta_T j. \quad (17)$$

Коэффициент β_T без учета нелинейности вентилей TB10 и TB9 постоянен, но на различных участках диапазона изменения *f* имеет разные значения:

а) при $f_{1,3} - \beta_T j > 0$ ток в обмотке I протекает в направлении, указанном стрелкой. Сопротивление вентиля TB10 прямому току мало, и β_T имеет максимальное значение;

б) при $f_{1,3} - \beta_T j < 0$ ток в обмотке I меняет направление и протекает в основном по сопротивлению R_5 . При этом β_T будет тем меньше, чем большую величину имеет сопротивление R_5 .

Статические характеристики системы приведены на рис. 7.

Сравнивая статические характеристики рассмотренной системы с динамическими характеристиками рис. 5, можно сделать следующие выводы:

1. Максимально возможная форсировка при ослаблении поля будет получена спрямлением характеристики во втором квадранте (пунктирная прямая) за счет исключения из схемы вентиля TB10. Дальнейшее увеличение форсировки невозможно, так как это потребовало бы изменения наклона характеристик и тем самым повышения форсировки усиления поля. Следовательно, первый серьезный недостаток схемы состоит в том, что исключена возможность раздельного и независимого регулирования величин форсировок в режимах ослабления и усиления поля двигателя.

2. При усилении поля имеет место наибольшая форсировка в начале процесса, т. е. при ма-

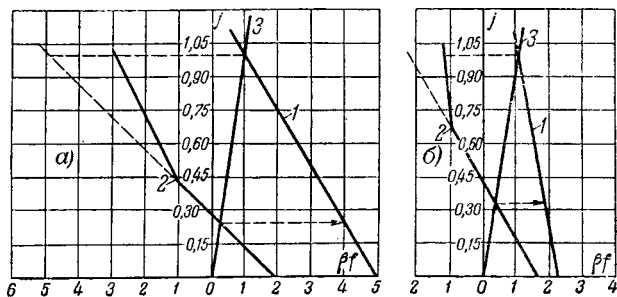


Рис. 7. Статические характеристики при управлении полем двигателя МП-7000-50 (а) и двигателя мощностью 3 400 л. с., 115/175 об/мин (б) по схеме рис. 6.

1 — при полном поле возбуждения; 2 — при ослабленном поле возбуждения; 3 — характеристика намагничивания.

ксимальной скорости двигателя, а затем форсировка по прямолинейному закону снижается до нуля. Это означает, что в начале процесса торможения будет иметь место большой толчок тока в главной цепи с последующим его затуханием, что противоречит требованиям оптимального протекания переходных процессов.

Выводы, вытекающие из анализа характеристик рис. 7, полностью согласуются с данными экспериментального исследования работы схемы рис. 6. Практика показала, что при управлении полем двигателя блуминга ослабление поля протекает с малыми форсировками, причем повышение их встречает указанные выше препятствия. Часто для некоторого улучшения динамических характеристик схемы усиливают трансформаторные обратные связи T1 и T2. При этом, однако, происходит лишь незначительное улучшение характера усиления поля за счет дальнейшего снижения форсировок при его ослаблении.

Новая схема электромашиного управления полем двигателя (рис. 8). Разработанная Центрометаллургавтоматикой схема оптимального управления полем двигателя² содержит те же машины, что и схема рис. 6. Однако структура новой схемы и функции, выполняемые управляющими обмотками усилителя, существенно отличны.

Управляющая обмотка I усилителя УД выполняет функции задающей и стабилизирующей обмоток. Обмотка II создает только дифференциальную н. с. обратной связи по току возбуждения прокатного двигателя. Она питается от разности падений напряжения на сопротивлениях R_4 и части делителя $R_6 - R_{11}$. Напряжение, снимаемое с сопротивлений $R_7 - R_9$ делителя, является напряжением сравнения.

Направления токов в обмотках I и II в установившемся режиме показаны стрелками. Величина н. с. задающей обмотки I в установившемся режиме при любом токе возбуждения двигателя должна поддерживаться приблизительно постоянной. Для соблюдения указанного условия при замыкании контактов IY, шунтирующих сопротивление R_7 , взамен последнего вводится эквивалентное сопротивление R_{10} . Сопротивление R_8 ма-

² Схема предложена автором и И. М. Шенброт.

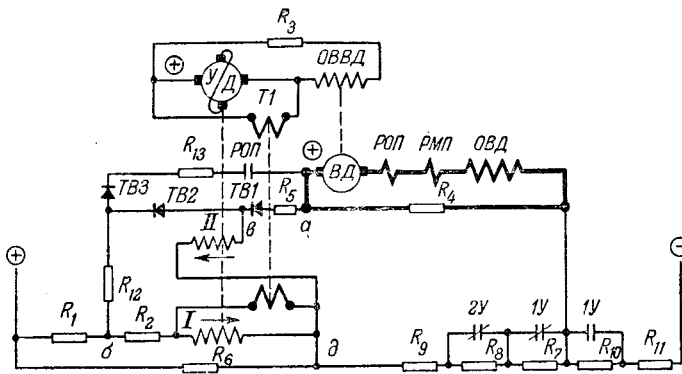


Рис. 8. Новая схема управления полем двигателя.

ло, и поэтому для него не предусматривается эквивалентная ступень. Управляющие обмотки усилителя, включенные в схему регулятора нагрузки, на рис. 8 не показаны.

Важнейшим узлом схемы, обеспечивающим получение заданных оптимальных динамических и статических характеристик при изменении тока возбуждения двигателя в режимах ослабления и усиления поля, является формирующий контур $R_5 - ТВ1 - ТВ2 - ТВ3 - R_{13} - РОП$, а также ветвь с сопротивлением R_{12} . Ветвь $ТВ2 - R_{12}$ служит для независимого регулирования форсировки и формы характеристики в режиме ослабления поля. Ветвь $R_{12} - ТВ3 - R_{13} - РОП$ позволяет осуществлять независимое задание требуемой формы характеристики при усилении поля. Рассмотренный контур участвует в работе схемы только в динамических режимах. В установившемся состоянии при любом токе возбуждения двигателя его ветви обесточены, так как потенциалы точек a , $б$ и $в$ находятся в следующем соотношении: $U_a > U_б > U_в$.

Построение этого контура основано на использовании идеи совмещения в одной управляющей обмотке усилителя двух функций: образования н. с. за счет протекающего в обмотке тока и функции создания напряжения сравнения за счет падения напряжения в сопротивлении этой обмотки.

В схеме показан только один стабилизирующий трансформатор $T1$. Экспериментальное исследование показало, что в ряде случаев (при достаточно большом сопротивлении R_3 и правильно выбранном напряжении $UД$ в установившемся режиме) трансформаторы $T2$ и $T3$ не требуются. Если же в них выявится необходимость, они могут быть добавлены в схему без какого-либо нарушения статических характеристик.

Рассмотрим работу схемы при управлении полем двигателя. Результирующая н. с. усилителя в переходных режимах

$$f = f_I - f_{II} - f_{I,1} \pm f_{I,y}, \quad (18)$$

где f_I — задающая н. с. управляющей обмотки I ; f_{II} — н. с. обратной связи по току возбуждения двигателя;

$f_{I,1}$ — н. с. стабилизации, обусловленная действием трансформатора $T1$;

$f_{I,y}$ — н. с. обмотки I , возникающая за счет уравнивающих токов формирующего контура.

Для простоты рассмотрения работы схемы исключим вначале влияние трансформаторной обратной связи, т. е. полагаем $f_{I,1} = 0$. Тогда уравнение (18) примет вид:

$$f = f_I - \beta_T j \pm f_{I,y}, \quad (18a)$$

где

$$\beta_T j = f_{II}.$$

Усиление поля. Для усиления поля включаются контакторы $1У$ и $2У$, вводящие в контур дифференциальной обмотки II сопротивления R_7 и R_8 . Напряжение сравнения U_c (падение напряжения на сопротивлениях $R_7 - R_9$) становится выше падения напряжения U_j на сопротивлении R_4 , и благодаря вентилю $ТВ1$ ток в обмотке II становится равным нулю. Полагая, что контакты реле $РОП$ разомкнуты, имеем: $f = f_I$, т. е. процесс усиления поля будет протекать под воздействием только задающей н. с., не изменяющейся во времени. В момент, когда ток возбуждения двигателя станет приближаться к новому установившемуся значению, напряжение U_j превысит величину напряжения сравнения U_c и возникнет н. с. обратной связи. В этом случае результирующая н. с. $УД$ будет равна $f = f_I - \beta_T j$. Описанная статическая характеристика приведена на рис. 9 (кривая $1a$).

При замкнутых контактах реле $РОП$ в момент включения контакторов $1У$ и $2У$, когда потенциал точки $д$ становится выше потенциала точки a , по ветви $R_{12} - ТВ3 - R_{13} - РОП$ потечет ток. Это вызовет снижение разности потенциалов $U_{бд}$ и уменьшение начальной величины задающей н. с. ($A'B'$ на рис. 9). Далее, с ростом тока возбуждения двигателя потенциал в точке a увеличивается и н. с. обмотки I постепенно возрастает. Путем

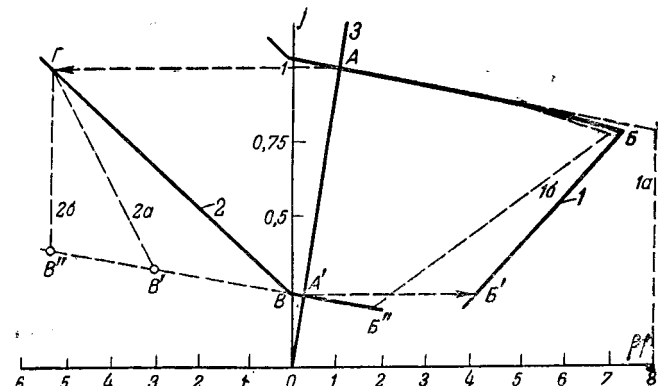


Рис. 9. Статические характеристики при управлении полем двигателя МП-7000-50 по схеме рис. 8.

1, $1a$ и $1б$ — при усилении поля возбуждения; 2, $2a$ и $2б$ — при ослаблении поля возбуждения; 3 — характеристика намагничивания.

подбора сопротивления R_{13} может быть задан требуемый наклон характеристики.

В переходном режиме н. с. стабилизации дает дополнительное существенное снижение результирующей н. с. усилителя в начальной стадии процесса. Это необходимо учитывать при выборе сопротивления R_{13} , с тем чтобы полное снижение результирующей н. с. отвечало заданной динамической характеристике рис. 5.

Ослабление поля. Ослабление поля двигателя начинается в момент отключения контакторов $1У$ и $2У$, шунтирующих сопротивления R_7 и R_8 , уменьшая тем самым величину напряжения U_c . Вследствие значительного возрастания положительной разности потенциалов U_{ad} между точками a и d н. с. дифференциальной обмотки II скачкообразно увеличивается, напряжение усилителя меняет знак и начинается форсированное снижение тока возбуждения двигателя.

При управлении по данной схеме кратность н. с., создаваемой обмоткой II , превышает кратность требуемых форсировок, так как параметры контура обмотки II выбираются из условия заданного наклона характеристики AB рис. 9. Для получения требуемых начальной и конечной форсировок (соответственно AG и $A'B$ на рис. 9) в схеме служит ветвь $TB2 - R_{12}$. В переходном режиме, когда имеет место повышенная разность потенциалов U_{ad} , потенциал точки v становится выше потенциала точки b и через задающую обмотку I устремляется дополнительный ток по ветви $TB2 - R_{12}$. Вследствие этого н. с. обмотки I увеличивается, снижая результирующую н. с. усилителя $УД$, равную

$$f = f_1 + f_{1,y} - \beta_r j,$$

где $f_{1,y}$ — н. с., создаваемая обмоткой I за счет действия уравнивающей ветви $TB2 - R_{12}$.

Параметры уравнивающей ветви оказывают существенное влияние на статические характери-

стики во втором квадранте. Путем соответствующего подбора сопротивлений R_{12} и R_2 (при неизменном суммарном сопротивлении R_1 и R_2) могут быть получены характеристики 2, 2а и 2б рис. 9. Характеристике 2 соответствуют меньшее сопротивление R_2 и более высокое сопротивление R_{12} . При увеличении сопротивления R_2 и надлежащем уменьшении сопротивления R_{12} можно перейти к характеристикам 2а или 2б, увеличивая конечную форсировку ослабления поля двигателя (точки B, B' и B''), при неизменном ее начальном значении (точка Γ).

Изменения характера прохождения кривых во втором квадранте рис. 9 не влияют на части характеристик, расположенные в первом квадранте. Диапазон возможного изменения характеристик весьма велик и позволяет путем соответствующего выбора параметров схемы удовлетворить встречающимся на практике требованиям.

Экспериментальное исследование. Было проведено экспериментальное исследование старой и новой схем электромашиного управления полем прокатного двигателя, служащего приводом реверсивной чистовой клети рельсобалочного стана. Технические данные электрических машин:

Генератор: 3 350 квт, 1 000 в, 3 350 а, 500 об/мин; прокатный двигатель: 3 400 л. с., 800 в, 3 350 а, 115/175 об/мин; $GD^2 = 120 \text{ тм}^2$.

Прокатный двигатель практически работает при ослаблении поля в диапазоне 115...155 об/мин, чему соответствует изменение тока возбуждения от 260 до 80 а.

На рис. 10 и 11 приведены осциллограммы при управлении полем двигателя по старой (рис. 6) и новой (рис. 8) схемам.

Из рассмотрения осциллограмм видно, что новая схема дает значительно большие возможности в части увеличения форсировок.

При старой схеме наибольшая форсировка при усилении поля имеет место в начале про-



Рис. 10. Осциллограмма управления полем двигателя по схеме рис. 6.

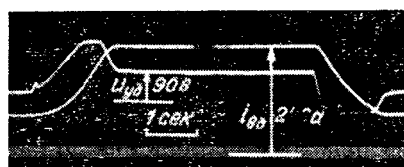


Рис. 11. Осциллограмма управления полем двигателя по схеме рис. 8.

Рис. 12. Осциллограмма разгона, реверса и торможения двигателя вхолостую при управлении полем по схеме рис. 6.

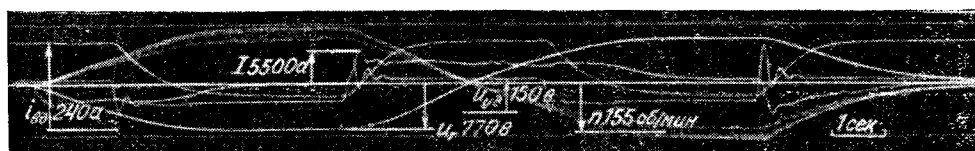


Рис. 13. Осциллограмма разгона, реверса и торможения двигателя вхолостую при управлении полем по схеме рис. 8.



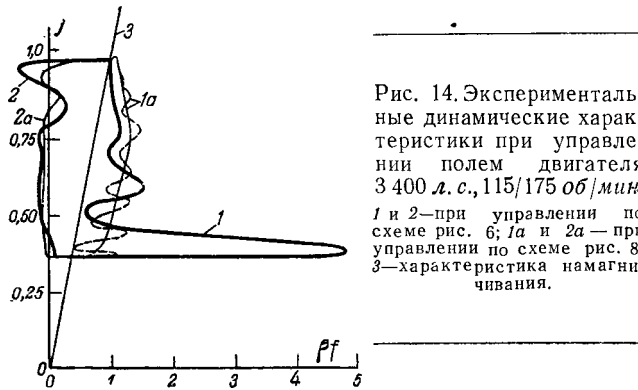


Рис. 14. Экспериментальные динамические характеристики при управлении полем двигателя 3 400 л. с., 115/175 об/мин. 1 и 2—при управлении по схеме рис. 6; 1а и 2а—при управлении по схеме рис. 8; 3—характеристика намагничивания.

цесса. Новая схема обеспечивает постепенное увеличение форсировки: $\frac{d\varphi}{d\tau}$ вначале мало, а затем плавно увеличивается.

На рис. 12 и 13 приведены осциллограммы разгона, реверса и торможения двигателя при ослаблении и усилении поля при управлении соответственно по схемам рис. 6 и 8. Осциллограмма рис. 12 наглядно иллюстрирует неблагоприятное действие высокой форсировки в начале усиления поля. Первоначальный толчок главного тока достигает 5 500 а, в то время как в дальнейшем его величина находится на уровне 3 600 а. Этот толчок вызывает искрение на коллекторах генератора и двигателя. На осциллограмме рис. 13 такой толчок отсутствует, а ток двигателя остается почти неизменным на уровне 4 000 а.

На основании осциллограмм рис. 12 и 13 были построены динамические характеристики (рис. 14). Сравнение их с расчетными оптимальными характеристиками рис. 5, б показывает, что новая схема обеспечивает переходные режимы управления полем, близкие к оптимальным.

В настоящее время новая схема управления

полем внедрена и бесперебойно работает на одном из действующих прокатных станков.

Выводы. 1. Минимальные времена изменения скорости двигателя при управлении его полем возбуждения могут быть получены при условии протекания переходных процессов по оптимальному закону:

а) при ослаблении поля начальная форсировка должна быть максимальной, а затем постепенно уменьшаться;

б) при усилении поля, наоборот, начальная форсировка должна быть ниже, а затем с ростом тока возбуждения двигателя увеличиваться.

2. Закон изменения величины форсировки в переходном процессе может быть найден посредством расчета и построения динамических характеристик.

3. На основании динамических характеристик легко могут быть построены примерные статические характеристики и сформулированы требования к схеме оптимального управления полем двигателя.

4. Сравнение статических характеристик, получаемых при существующей схеме (рис. 6) с характеристиками, удовлетворяющими условиям оптимального протекания переходного процесса, показывает, что эта схема по своей структуре не способна обеспечить оптимальных переходных режимов.

5. Разработанная Центрометаллургавтоматикой новая схема управления полем двигателя обеспечивает оптимальные статические и динамические характеристики и, кроме того, дает широкие возможности отдельного и независимого регулирования характера протекания переходного процесса как при ослаблении, так и при усилении поля. Старая схема лишена таких возможностей.

[18. 4. 1955]



Вопросы динамического падения скорости двигателей в непрерывных станах

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. ДРУЖИНИН и инж. В. К. ХОТУЛЕВ

Москва

Исходные положения. Трудность осуществления непрерывного процесса прокатки горячего металла заключается в необходимости создать условия, при которых в прокатываемом металле на участке между клетями не возникали бы значительные напряжения сжатия или растяжения.

С точки зрения электромеханических особенностей процесс непрерывной прокатки горячего металла может быть разделен на две фазы: а) процесс, когда прокатываемый металл вошел во все клетки непрерывного стана и скорости двигателей клетей достигли установившегося значения; б) процесс входа металла из одной клетки в другую, связанный с ударным приложением нагрузки к валу двигателя и изменением вследствие этого скорости вращения последнего.

Для непрерывных мелкосортных и среднесортных станков актуальными вопросами являются способы образования и поддержания петли металла и автоматическое регулирование ее величины, что решает в настоящее время успех внедрения этого типа станков. При прокатке труб и некоторых других видов проката образование петли невозможно.

Для непрерывных станков с индивидуальным приводом клетей используются двигатели постоянного тока параллельного возбуждения. В переходных режимах при ударном приложении нагрузки ток двигателя в своем изменении отстает от скорости вследствие влияния индуктивности якоря. Характер процесса изменения скорости и тока зависит от соотношения между

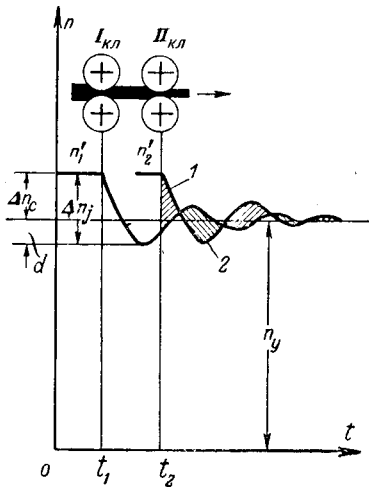


Рис. 1. Кривые изменения скорости двигателей двух смежных клетей в переходном процессе при входе металла в клеть ($\theta < 4T_0$).

электромеханической постоянной времени привода θ и электромагнитной постоянной времени цепи якоря двигателя T_0 . Так, при $\theta > 4T_0$ процесс носит аperiодический характер; при $\theta < 4T_0$ процесс становится колебательным.

На рис. 1 приведены кривые изменения скорости двигателей двух смежных клетей при $\theta < 4T_0$. Динамическое падение скорости

$$\Delta n_j = \Delta n_c + d,$$

где Δn_c — статическое падение скорости;
 d — восстановление скорости.

В установившемся режиме скорость n'_1 первого двигателя, приведенная к скорости выхода металла из валков первой клетки, равна скорости n'_2 второго двигателя, приведенной к скорости входа металла во вторую клеть. Поэтому при прокатке в металле на участке между клетями не имеют места напряжения сжатия или растяжения. Из рисунка видно, что в переходном процессе приведенные скорости двигателей не равны друг другу. Так, для заштрихованного участка 1 скорость входа металла во вторую клеть выше, чем скорость выхода металла из первой клетки. Очевидно, что на этом участке при непрерывной прокатке металл между клетями будет испытывать напряжение растяжения. На участке 2 скорость выхода металла из первой клетки оказывается больше скорости входа металла во вторую клеть, что приводит или к образованию петли, или к возникновению сжатия металла на участке между клетями. Далее, картина повторяется до затухания процесса.

Уравнение движения с учетом связи между клетями через прокатываемый металл. Рассмотрим переходный процесс изменения скорости двигателя и натяжения полосы при входе металла в клеть. Анализ будем проводить для двух смежных клетей. Примем следующие допущения:

1. Скорость двигателя (валков) первой клетки

достигает установившегося значения к моменту входа металла во вторую клеть.

2. Пренебрегаем изменением скорости двигателя первой клетки за счет уменьшения статического момента вследствие возникновения натяжения полосы между первой и второй клетями. Изменение скорости двигателя и опережения металла в первой клетке (при изменении натяжения) качественно одинаково влияют на процесс, но действие опережения значительно сильнее.

3. Пренебрегаем изменением опережения металла во второй клетке под действием заднего натяжения. С точки зрения влияния на процесс это явление аналогично опережению металла в первой клетке; поэтому оно может быть учтено соответствующим увеличением коэффициента опережения.

При выводе уравнения движения учитываются: а) изменение опережения металла в первой клетке в функции натяжения; б) упругость полосы между клетями; в) переменный статический момент второй клетки M_{c2} [Л. 1].

1-й случай. Индуктивность якоря двигателя второй клетки $L = 0$. Исходным является уравнение моментов двигателя второй клетки:

$$M_2 = \frac{GD_2^2}{375} \frac{dn_2}{dt} + M_{02} + \frac{D}{2} \frac{k}{i_2} T_{12} = \frac{(n_{02} - n_2) c_e c_m}{R}, \quad (1)$$

где M_2 — момент двигателя второй клетки;
 M_{02} — приведенный момент деформации при прокатке без натяжения;
 GD_2^2 — приведенный маховой момент привода второй клетки;
 n_{02} — скорость идеального холостого хода;
 R — сопротивление цепи якоря двигателя второй клетки;
 c_e и c_m — коэффициенты э. д. с. и момента двигателя;
 D — диаметр валков;
 i_2 — передаточное число;

$$k = \frac{h_n}{h_3};$$

h_3 и h_n — толщина полосы до и после второй клетки.

Натяжение в полосе между клетями [Л. 2]

$$T_{12} = \frac{EQ}{l} \int_0^t (v_2 - v_1) dt + T_0, \quad (2)$$

где v_1 — скорость выхода металла из валков первой клетки;
 v_2 — скорость входа металла в валки второй клетки;

l — расстояние между осями валков смежных клетей;

E — модуль Юнга прокатываемого металла;
 Q — поперечное сечение прокатываемого металла между клетями;

T_0 — начальное натяжение в полосе (в рассматриваемом случае $T_0 = 0$).

Скорости v_1 и v_2 могут быть выражены через натяжения полосы T_{12} [Л.1]:

$$v_1 = \frac{\pi D n_1}{60 i_1} (1 + s_{01} + b T_{12}); \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{\pi D n_2}{60 i_2} (1 + s_{02}) \frac{h_n}{h_3}, \quad (4)$$

где s_{01} и s_{02} — опережения в первой и второй клетях при прокатке без натяжения полосы;

b — коэффициент пропорциональности между опережением металла и натяжением.

Совместное решение уравнений (1), (2), (3) и (4) приводит после преобразований к следующему дифференциальному уравнению относительно T_{12} :

$$\frac{d^2 T_{12}}{dt^2} + A \frac{dT_{12}}{dt} + B T_{12} = D', \quad (5)$$

где

$$A = \frac{n_1 b \pi D}{60 c i_1} + \frac{1}{\theta_2};$$

$$B = \frac{n_1 b \pi D}{\theta_2 60 c i_1} + \frac{\pi D^2 (1 + s_{02}) k^2 375}{G D_2^2 \cdot 60 c i_2^2};$$

$$D' = \frac{\pi D (1 + s_{02}) h_n n_{02}}{60 c i_2 h_3 \theta_2} - \frac{\pi D (1 + s_{02}) h_n}{\theta_2 60 c i_2 h_3} \Delta n_{c2} - \frac{(1 + s_{01}) \pi D}{\theta_2 60 c i_1} n_1;$$

$$c = \frac{l}{E Q},$$

где θ_2 — электромеханическая постоянная привода второй клетки;

Δn_{c2} — статический перепад скорости двигателя второй клетки под действием момента M_{02} .

Решением дифференциального уравнения (5) для случая отрицательных действительных корней будет

$$T_{12} = C_1 e^{x_1 t} + C_2 e^{x_2 t} + C_3. \quad (6)$$

Значения x_1 и x_2 , определяемые из характеристического уравнения, равны:

$$x_{1,2} = - \left(\frac{n_1 b \pi D}{120 c i_1} + \frac{1}{2 \theta_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{n_1 b \pi D}{120 c i_1} - \frac{1}{2 \theta_2} \right)^2 - \frac{375 \pi D^2 (1 + s_{02}) k^2}{G D_2^2 120 c i_2^2}}.$$

Постоянные интегрирования находятся из граничных условий: при $t=0$ и $T_{12}=0$, $\frac{dT_{12}}{dt}$ находится из уравнения (2), в которое подставляется значение n_2 при $t=0$. Они равны

$$C_1 = -C_2 = \frac{\pi D \Delta n_{c2} h_n}{60 c i_2 (x_1 - x_2) h_3};$$

$C_3=0$ (частное решение), так как начальное соотношение скоростей выбрано таким, что при $t \rightarrow \infty$, $T_{12}=0$. Выражение для скорости двигателя второй клетки при внезапном приложении нагрузки

с учетом связи через прокатываемый металл может быть получено подстановкой значений T_{12} и $\frac{dT_{12}}{dt}$ в уравнение (2), где v_1 и v_2 заменяются через (3) и (4):

$$n_2 = \frac{i_2 h_3}{(1 + s_{02}) h_n} \left[\left(\frac{n_1 b}{i_1} - \frac{60 c}{\pi D} x_1 \right) C_1 e^{x_1 t} + \left(\frac{n_1 b}{i_1} - \frac{60 c}{\pi D} x_2 \right) C_2 e^{x_2 t} + \frac{n_1 (1 + s_{01})}{i_1} \right]. \quad (7)$$

2-й случай. Индуктивность якоря двигателя второй клетки $L \neq 0$. При наличии связи между клетями через металл исходными будут уравнения

$$E_2 = n_2 C_{e2} + R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt}; \quad (8)$$

$$I_2 c_{m2} = \frac{G D_2^2}{375} \frac{dn_2}{dt} + M_{02} + \frac{D}{2} T_{12} \frac{k}{i_2} \quad (9)$$

и выражения (2), (3) и (4). Совместное их решение относительно натяжения полосы приводит к дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned} & \theta_2 T_2 \frac{60 c}{\pi D (1 + s_{02})} \cdot \frac{d^3 T_{12}}{dt^3} + \\ & + \left[\theta_2 \frac{60 c}{\pi D (1 + s_{02})} + n_1 \theta_2 T_2 \frac{b}{i_1 (1 + s_{02})} \right] \frac{d^2 T_{12}}{dt^2} + \\ & + \left[\frac{60 c}{\pi D (1 + s_{02})} + \frac{n_1 \theta_2 b}{(1 + s_{02}) i_1} + T_2 \frac{D k^2 R_2}{i_2^2 2 c_{e2} c_{m2}} \right] \frac{dT_{12}}{dt} + \\ & + \left[n_1 \frac{b}{(1 + s_{02}) i_1} + \frac{k^2 D R_2}{c_{e2} c_{m2} i_2^2} \right] T_{12} = \frac{k}{i_2} (n_{02} - \Delta n_{c2}) - \\ & - \frac{n_1 (1 + s_{01})}{(1 + s_{02}) i_1}, \quad (10) \end{aligned}$$

где

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2}.$$

Решение этого уравнения:

а) для случая, когда все три корня вещественные,

$$T_{12} = C_1 e^{x_1 t} + C_2 e^{x_2 t} + C_3 e^{x_3 t} + T_y;$$

б) для случая, когда два корня являются сопряженными комплексными,

$$T_{12} = C_1 e^{x_1 t} + e^{\alpha t} (C_2 \sin \omega t + C_3 \cos \omega t) + T_y,$$

где α и ω — вещественная и мнимая части комплексного корня.

Для определения числового значения постоянных интегрирования используются следующие граничные условия: при $t=0$, $T_{12}=0$. Из уравнения (2) находим:

$$\frac{dT_{12}}{dt}_{t=0} = \frac{\pi D}{60 c i_1} \left[(1 + s_{02}) \frac{i_1}{i_2} k n_{02} - n_1 (1 + s_{01}) \right].$$

Из уравнения (2) определяется

$$\frac{d^2 T_{12}}{dt^2}_{t=0} = \frac{\pi D}{60 c i_1} \left[(1 + s_{02}) \frac{i_1}{i_2} k \frac{dn_2}{dt}_{t=0} - n_1 b \frac{dT_{12}}{dt}_{t=0} \right],$$

где

$$\frac{dn_2}{dt}_{t=0} = - \frac{\Delta n_{c2}}{\theta_2}.$$

Выражение для скорости двигателя n_2 может быть получено из уравнения (2). Для этого необходимо продифференцировать обе части уравнения, заменить значение v_2 через n_2 по формуле (4) и подставить значения T_{12} и $\frac{dT_{12}}{dt}$.

Анализ уравнений. Для расчета были использованы данные двигателей и технологические характеристики одного из тонколистовых станов. Расчет производился для случая вхождения металла из первой клетки во вторую и из восьмой клетки в девятую. Отправные величины и коэффициенты получили значения: $h_3=14$ мм; $h_n=10$ мм; ширина полосы 1 250 мм; $M_{02}=6 050$ кг; $n_1=360$ об/мин; установившаяся скорость двигателя второй клетки $n_{y2}=294$ об/мин; натяжение в полосе $T_{12}=0$; сопротивление цепи якоря двигателя второй клетки с учетом питания от ртутного выпрямителя $R_2=0,0228$ ом; $GD_2^2=18$ тм²; коэффициент опережения $b=2,16 \cdot 10^{-6}$, при котором удельное натяжение 3 кг/мм² вызывает приращение опережения на 3%; диаметр валков $D=500$ мм; $i_2=6$; $i_1=10,3$; $L_2=9,61 \cdot 10^{-4}$ гн; $c_{e2}=2,1$; $c_{m2}=2,04$.

Определение численных значений корней уравнения третьей степени производилось графоаналитическим методом.

На рис. 2 для различных значений параметров R_2 , GD_2^2 и θ_2 приведены кривые изменения натяжения при входе металла во вторую клетку. Индуктивность цепи якоря была принята равной нулю. При этом изменение скорости носит аperiodический характер, а динамическое падение скорости равно статическому.

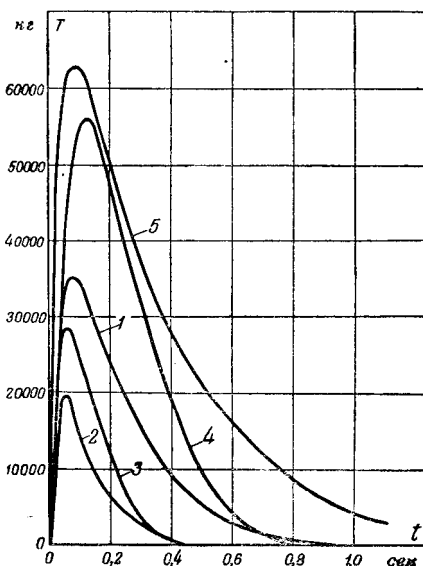


Рис. 2. Кривые изменения натяжения металла на участке между клетями в переходном процессе при входе металла в клетку ($L_2=0$).

1—при R_2 , GD_2^2 , $\theta_2=0,255$ сек; 2—при $\frac{R_2}{2}$, GD_2^2 , $\theta_2=0,127$ сек; 3—при R_2 , $\frac{GD_2^2}{2}$, $\theta_2=0,127$ сек; 4—при R_2 , GD_2^2 , $\theta_2=0,255$ сек (коэффициент опережения уменьшен в 2 раза); 5—при R_2 , GD_2^2 , $\theta_2=0,57$ сек (скорость прокатки увеличена в 1,5 раза ослаблением потока двигателя).

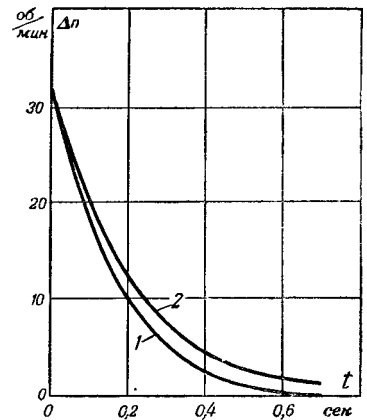


Рис. 3. Кривые изменения приращения скорости двигателя и натяжения металла между клетями в переходном процессе при входе металла в клетку ($L_2=0$).
1—с учетом связи между клетями через прокатываемый металл; 2—без учета связи.

На рис. 3 приведены кривые изменения скорости двигателя при входе металла в клетку для исходного случая при отсутствии связи через металл между клетями (кривая 2) и наличии ее (кривая 1). Для большей наглядности кривые представлены как приращение скорости относительно ее установившегося значения.

Анализ приведенных кривых позволяет сделать ряд существенных выводов:

1. Кривые изменения натяжения, возникающего при входе полосы в клетку, характеризуются наличием максимума. Время достижения максимума натяжения для построенных кривых лежит в пределах 0,067 ... 0,127 сек. К моменту наступления максимума скорость двигателя успевает снизиться на величину, равную (20 ... 30%) Δn_c .

2. Основными величинами, определяющими величину максимума натяжения, являются электромеханическая постоянная времени привода θ и статическое падение скорости Δn_c . Чем больше θ и Δn_c , тем больше пик натяжения. Последнее объясняется тем, что при больших значениях θ и Δn_c увеличивается площадь, ограничиваемая кривой скорости и осями координат, которая характеризует величину пути за время переходного режима.

3. Опережение металла является фактором самовывравнивания. Чем сильнее изменяется опережение металла при изменении натяжения, тем меньше будет пик последнего.

4. Увеличение скорости прокатки ослаблением поля двигателя привело к росту пика натяжения, так как при ослаблении поля величины θ и Δn_c увеличились. Если бы скорость прокатки была увеличена путем повышения напряжения, то пик натяжения не только не вырос бы, а стал бы меньше, так как демпфирующее действие опережения растет со скоростью.

5. Упругие свойства полосы действуют в направлении уменьшения пика натяжения в переходном процессе. Чем больше степень упругости прокатываемого материала (меньше модуль Юнга), тем меньше будет пик натяжения. Если при анализе пренебречь упругостью полосы, то в момент входа металла в клетку при $t=0$ натяжение полосы будет иметь максимальное значе-

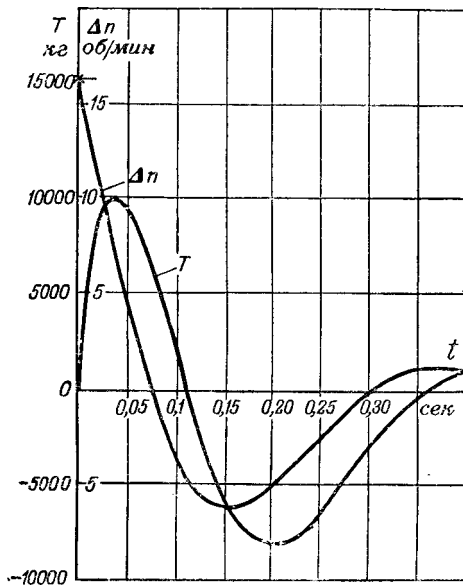


Рис. 4. Кривые изменения приращения скорости двигателя и натяжения металла на участке между первой и второй клетями при входе металла во вторую клеть $\left(\frac{R_2}{2},\right.$

$$L_2, \frac{GD_2^2}{2}, T_{s2} = 0,084 \text{ сек}, \theta_2 = 0,064 \text{ сек}, T_{s2} = 0,168 \text{ сек}, \theta_2 = 0,127 \text{ сек}, \frac{T_{s2}}{\theta_2} = 1,3 \Bigg),$$

ние. Величину максимального натяжения при $t = 0$ можно определить из формул (3) и (4), полагая $v_1 = v_2$.

Так, для исходного случая при $t = 0$, полагая полосу неупругой, нашли величину максимального натяжения $T_{12, \text{макс}} = 54 \text{ т}$. Как следует из кривой 1 рис. 2, построенной с учетом упругости полосы, пик натяжения равен 35 т .

На рис. 4—6 приведены кривые натяжения и скорости для колебательного процесса при различных значениях параметров, когда $T_s \neq 0$. При этом полагали, что петлеобразование не имеет место (трубные станы), а в прокатываемом металле на участке между клетями возникают напряжения сжатия, что характеризуется отрицательным значением натяжения.

Анализ кривых позволяет сделать следующие выводы:

1. Натяжение полосы на участке между клетями в переходном режиме изменяется по колебательному закону.

2. Кривые скорости двигателя и натяжения полосы смещены друг относительно друга по фазе. Кривая натяжения сдвинута относительно кривой скорости в сторону отставания.

3. Период колебаний натяжения совпадает с периодом колебаний скорости.

4. На рис. 3 и 6 приведены кривые скорости двигателя в переходном режиме, построенные с учетом связи между клетями через прокатываемый металл и без учета ее. Сравнение кривых указывает на одинаковую закономерность изме-

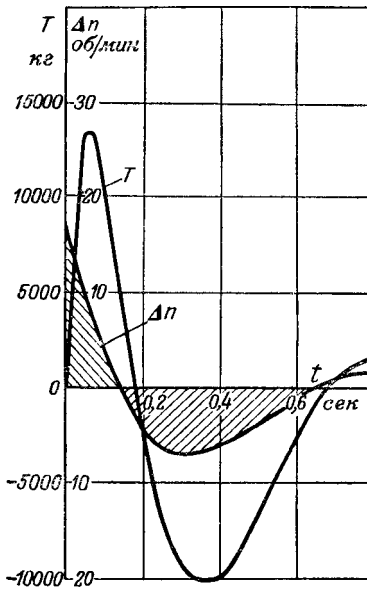


Рис. 5. Кривые изменения приращения скорости двигателя и натяжения металла на участке между первой и второй клетями при входе металла во вторую клеть $\left(\frac{R_2}{2}, 2L_2, GD_2^2,\right.$

$$\left. \frac{T_{s2}}{\theta_2} = 1,3 \right).$$

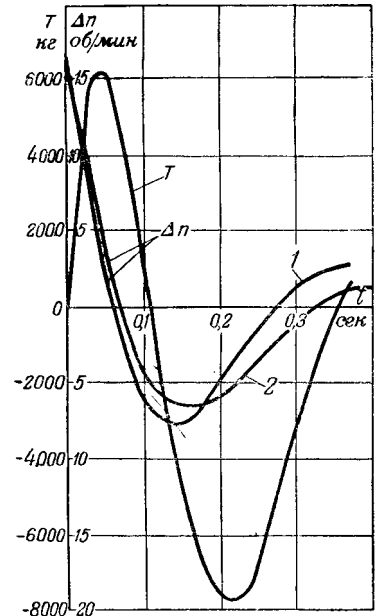


Рис. 6. Кривые изменения приращения скорости двигателя и натяжения металла на участке между восьмой и девятой клетями при входе металла в девятую клеть. 1—с учетом связи через прокатываемый металл; 2—без учета связи.

нения скорости в обоих случаях. Кривые скорости сдвинуты друг относительно друга во времени; в переходном режиме при больших значениях момента натяжения (соизмеримых с моментом деформации) может наблюдаться заметное отличие и по амплитудным значениям. Однако при этом удельные натяжения будут иметь недопустимо большую величину. Для кривых рис. 6 наибольшее удельное натяжение в переходном процессе равно $2,6 \text{ кг/мм}^2$. При этом имеет место малое расхождение кривых скорости, хотя удельное натяжение $2,6 \text{ кг/мм}^2$ при горячей прокатке является в большинстве случаев недопустимой величиной. Поэтому величина площади, ограниченная кривой скорости, построенной для свободного процесса, и ее установившимся значением, может служить одной из основных качественных характеристик натяжения полосы в переходном режиме.

5. Сравнение кривых рис. 4 и 5 показывает, что при одинаковой величине динамического и статического падения скорости в обоих случаях пики натяжения имеют различные значения. Максимальные значения натяжения больше для случая рис. 5, где частота колебаний меньше. Последнее может быть объяснено тем, что заштрихованные на рис. 5 площади, ограничиваемые кривой скорости и линией ее установившегося значения, оказываются больше, чем на рис. 4. Величины этих площадей в некоторой степени характеризуют разность пути металла, выходящего из предыдущей клетки и входящего в данную клеть. Эта разность в переходном режиме покрыв-

вается за счет деформации участка металла, находящегося между клетями стана [формула (2)].

Результаты экспериментального исследования. Экспериментальное исследование динамического падения скорости в непрерывных станах встречает значительные трудности как в отношении измерения скорости, так и главным образом в отношении измерения натяжения прокатываемого горячего металла.

Эксперименты проводились на четырехклетевом стане с диаметром валков 160 мм. Мощность двигателя каждой клетки $P_n = 32$ квт; $n_n = 700$ об/мин. Прокатывалась горячая проволока диаметром 6 мм из исходного материала сечением 10×10 мм². В процессе опыта производилось измерение скорости и токов двигателей третьей и четвертой клеток. Для двигателя четвертой клетки осуществлялась дифференциальная запись скорости. Электромеханическая постоянная времени привода четвертой клетки $\theta_4 = 0,2$ сек (в цепь якоря было включено добавочное сопротивление); для третьей клетки $\theta_3 = 0,067$ сек. Соотношение между T_{34} и θ_4 для привода четвертой клетки таково, что процесс носит апериодический характер, т. е.

$$\Delta n_j = \Delta n_c.$$

На рис. 7 приведена одна из осциллограмм, из которой следует, что при входе металла в четвертую клетку ток двигателя третьей клетки претерпевает изменения в течение переходного процесса.

Уменьшение тока двигателя третьей клетки объясняется появлением натяжения полосы между четвертой и третьей клетями вследствие падения скорости двигателя четвертой клетки при вхождении в клетку проволоки. Установившиеся значения скоростей были подобраны таким образом, что натяжение в металле между четвертой и третьей клетями после переходного процесса равно нулю. Момент двигателя третьей клетки в зависимости от величины натяжения T_{34} между третьей и четвертой клетями может быть выражен [Л. 1] как

$$M_3 = M_{03} - T_{34} \frac{D}{2i_3}, \quad (11)$$

где M_{03} и I_{03} — момент и ток двигателя при прокатке без натяжения;

D — диаметр рабочего валка;

i_3 — передаточное отношение третьей клетки.

Отсюда

$$T_{34} = \frac{(M_{03} - M_3) 2i_3}{D} = \frac{(I_{03} - I_3) 2c_{м3} i_3}{D}. \quad (12)$$

В переходном режиме изменение момента двигателя третьей клетки будет происходить с некоторым запаздыванием по сравнению с изменением натяжения вследствие инерционности системы клеть — двигатель. Чем меньше электромеханическая постоянная времени привода по сравнению с частотой процесса изменения натяжения, тем меньше смещение. В рассматриваемом слу-

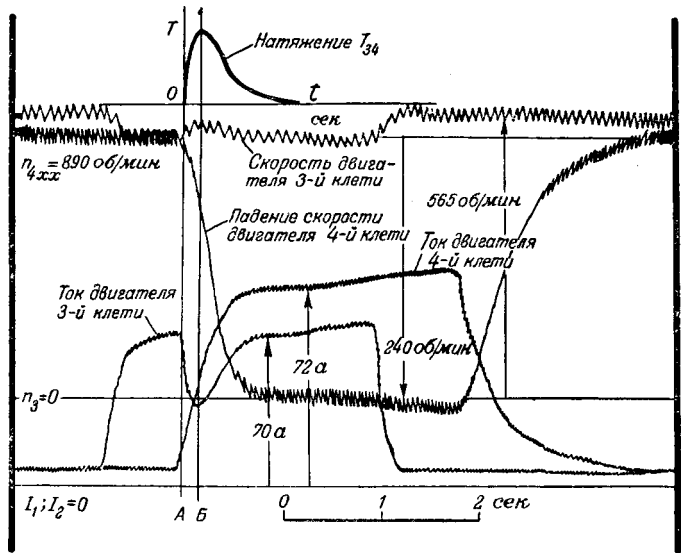


Рис. 7. Осциллограмма переходного процесса при прокатке металла в непрерывном стане.

чае процесс изменения натяжения длится около 1 сек, а постоянная времени привода третьей клетки равна 0,067 сек. Следовательно, характер изменения тока или момента двигателя третьей клетки практически повторяет закон изменения натяжения между клетями (для рассматриваемого случая $T_{34} \ll \theta_3$). Кривая изменения натяжения полосы может быть получена как зеркальное отображение кривой изменения тока двигателя третьей клетки в переходном режиме с соответствующим изменением масштаба. На осциллограмме рис. 7 сделано такое построение.

Сравнение экспериментальной кривой и кривых рис. 2 говорит о полном качественном совпадении.

Для экспериментальной кривой характерно наличие максимума, причем время его наступления и степень снижения скорости двигателя при этом согласуются с данными анализа. Это позволяет считать, что качественная картина изменения натяжения полосы при динамическом падении скорости, выявленная в результате анализа, является достоверной и надежно отображает физику процесса. Последнее дает основание использовать выводы анализа в качестве исходных при решении задач, связанных с динамическим падением скорости двигателей в непрерывных станах.

Выбор типа привода. Для двигателей непрерывных станов, где недопустимо образование петли (прокат труб и некоторых видов сортового металла), необходимо в первую очередь обеспечить заданное соотношение между θ и T_p . Опыт эксплуатации действующих установок показывает, что отношение T_p/θ должно быть не более 0,7...0,75 при величине $\Delta n_c \leq 2,5...3\%$. Выполнение этого требования обычно приводит к значительному повышению мощности приводов клеток (на 80...100%), а в ряде случаев — к установке маховиков на вал двигателя клетки с целью увеличения электромеханической посто-

янной времени привода. Однако при проектировании приводов непрерывных станов вопрос о получении оптимального соотношения между θ и T_s может быть решен в ряде случаев путем рационального выбора основной скорости двигателя нормального исполнения и величины передаточного отношения редуктора без применения специальных двигателей и маховиков.

При выборе типа привода исходными величинами являются потребляемая мощность и скорость прокатки в данной клетке. В соответствии с этим приводной двигатель мощностью P может быть выбран тихоходным или быстроходным; величина передаточного числа редуктора при заданной скорости прокатки однозначно определяется после выбора скорости двигателя. Необходимо решить вопрос, какой вариант привода в общем случае является более оптимальным с точки зрения протекания переходных процессов и соотношения между T_s и θ .

Обозначим параметры тихоходного двигателя через: $P_{1н}, U_{1н}, n_{1н}, R_1, GD_1^2, c_{e1}$; для быстроходного двигателя: $P_{2н} = P_{1н}, U_{2н} \approx U_{1н}, n_{2н}, GD_2^2, c_{e2}$.

Маховой момент двигателя, как показал Н. А. Тищенко, может быть определен из выражения

$$GD^2 = \frac{C' P_n^2}{n_n}, \quad (13)$$

где C' — коэффициент, определяемый рядом параметров машин. При равенстве мощностей обоих двигателей имеем:

$$\frac{GD_1^2}{GD_2^2} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{C'_1}{C'_2} \approx \frac{n_2}{n_1}, \quad (14)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_{1н}}{n_{2н}}, \quad (15)$$

где $i_1 = \frac{n_{1н}}{n_s}$; $i_2 = \frac{n_{2н}}{n_s}$ — передаточные отношения;

n_s — скорость вращения валков.

При равенстве напряжений двигателей

$$\frac{c_{e1}}{c_{e2}} \approx \frac{n_2}{n_1}. \quad (16)$$

С учетом формул (14) — (16) величины электромеханических постоянных времени привода могут быть выражены:

а) для тихоходного двигателя

$$\theta_1 = \frac{\left(GD_1^2 + \frac{GD_m^2}{i_1^2} \right) R_1 \cdot 1,03}{c_{e1}^2 375}; \quad (17)$$

б) для быстроходного двигателя

$$\theta_2 = \frac{\left(GD_1^2 \frac{n_2}{n_1} + \frac{GD_m^2}{i_1^2} \right) R_2 \cdot 1,03}{c_{e1}^2 375}, \quad (18)$$

где GD_m^2 — маховой момент механизма.

Сравнение выражений (17) и (18) показывает, что при равной мощности электрических машин электромеханическая постоянная времени быстроходного двигателя может оказаться значительно большей, чем тихоходного. Так как приведенный маховой момент стана обычно значительно меньше махового момента двигателя, величина θ при применении быстроходного двигателя может увеличиться примерно в отношении $\frac{n_2}{n_1}$.

Таким образом, выбор быстроходной машины нормального исполнения может обеспечить необходимое соотношение между T_s и θ без применения специальных двигателей или искусственного увеличения махового момента установкой маховика.

Литература

1. Н. Н. Дружинин. Электропривод непрерывных станов холодной прокатки. Сборник: Электропривод в черной металлургии, Металлургиздат, 1954.
2. Д. П. Морозов и Н. Н. Дружинин. Теория переходных процессов электропривода с упругой связью при переменном радиусе натяжения. Электричество, № 11, 1949.
3. В. К. Попов. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1951.
4. М. М. Брозголь. Некоторые вопросы электрооборудования трубчатых агрегатов с автоматическими станами. Сборник: Электропривод в черной металлургии, Металлургиздат, 1954.
5. Galdwell. Развитие конструкции двигателей постоянного тока для прокатных станов. Iron and Steel Engineer, декабрь 1950.

[3 6. 1955]



Расчет максимального момента и критического скольжения при динамическом торможении асинхронных двигателей

Кандидат техн. наук В. И. СТУЛЬНИКОВ

Львов

В последние годы в угольной, нефтяной и других отраслях промышленности получили широкое применение различные схемы динамического торможения асинхронных двигателей. Расчет их представляет значительные трудности из-за необходимости учета насыщения стали двигателя, непрерывно изменяющегося в процессе торможения.

При расчете динамического торможения асинхронных двигателей весьма важными величинами являются максимальный тормозной момент M_m , развиваемый двигателем, и критическое скольжение s_k , соответствующее этому моменту. Представляет также интерес зависимость этих величин от тока возбуждения в обмотке статора двигателя.

Определение текущего значения момента, скольжения и токов может быть выполнено по следующим упрощенным формулам [Л. 1]:

$$I_\mu = \frac{I_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_\mu s}{R_2}\right)^2}}; \quad (1)$$

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_\mu^2}; \quad (2)$$

$$s = \frac{R_2 I_2}{E_2}; \quad (3)$$

$$M = \frac{2,92}{n_c} E_2 I_2 = \frac{2,92}{n_c} I_2^2 \frac{R_2}{s}. \quad (4)$$

Приведенные формулы дают в области максимального момента и рабочей части тормозной характеристики вполне удовлетворительную для практических расчетов точность, так как влияние реактивного сопротивления рассеяния на величину M_m в значительной степени компенсируется потерями в стали.

Однако расчет, даже по этим упрощенным формулам, весьма затруднителен, так как значения величин E_2 , I_2 и x_μ при данном скольжении зависят от степени насыщения стали двигателя, т. е. от величины намагничивающего тока I_μ . Зависимость $E_2 = x_\mu I_\mu = f(I_\mu)$ определяется кривой намагничивания, из которой легко усмотреть, что величина x_μ может изменяться в значительных пределах, если величина тока возбуждения превышает ток холостого хода двигателя I_0 . Это обстоятельство приводит к выводу, что обычно приводимое в литературе выражение для критического намагничивающего тока $I_{\mu k} = \frac{I_1}{\sqrt{2}}$, при котором имеет место максимальный момент, не соответствует действительности. Для правильного определения величины тока $I_{\mu k}$ необходимо найти условие, определяющее максимальное значение произведения $E_2 I_2$ в формуле (4).

Принимая за переменный аргумент ток I_μ , как определяющий остальные параметры, можно написать:

$$\left[\frac{dM}{dI_\mu} \right]_{I_\mu = I_{\mu k}} = I_{2k} \left[\frac{dE_2}{dI_\mu} \right]_{I_\mu = I_{\mu k}} + E_{2k} \left[\frac{dI_2}{dI_\mu} \right]_{I_\mu = I_{\mu k}} = 0,$$

или

$$\frac{E_{2k}}{\left[\frac{dE_2}{dI_\mu} \right]_{I_\mu = I_{\mu k}}} = - \frac{I_{2k}}{\left[\frac{dI_2}{dI_\mu} \right]_{I_\mu = I_{\mu k}}}. \quad (5)$$

Отношение функции к своей производной есть ее подкасательная в данной точке. Поэтому, исходя из равенства (5), можно сказать, что значение тока $I_{\mu k}$ определяется равенством подкасательных к кривой намагничивания и к кривой тока $I_2 = \varphi(I_\mu)$ в соответствующих точках.

Если ток возбуждения $I_1 = \text{const}$, то на основании формулы (2) можно построить зависимость $I_2 = \varphi(I_\mu)$, представляющую собой окружность с центром в начале координат и радиусом, равным I_1 .

На рис. 1 представлены характеристика холостого хода двигателя (кривая OEK) и зависимость $I_2 = \varphi(I_\mu)$ (кривая FDM). Если $\overline{OB} = I_{\mu k}$, то согласно равенству (5) $\overline{AB} = \overline{BC}$, где \overline{AB} — подкасательная кривой намагничивания, а \overline{BC} — подкасательная окружности тока I_2 .

Из рис. 1 видно, что для окружности тока справедливо равенство

$$\frac{dI_2}{dI_\mu} = - \frac{I_\mu}{I_2} = - \operatorname{tg} \beta.$$

Поэтому

$$\frac{E_{2k}}{\left[\frac{dE_2}{dI_\mu} \right]_{I_\mu = I_{\mu k}}} = \frac{I_{2k}^2}{I_{\mu k}} = \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot I_{\mu k},$$

где α — угол, определяющий положение радиус-вектора \overline{OD} . Учитывая, что $\frac{E_{2k}}{I_{2k}} = \frac{R_2}{s_k}$, а $\frac{E_{2k}}{I_{\mu k}} = x_{\mu k}$, получим следующие выражения, опреде-

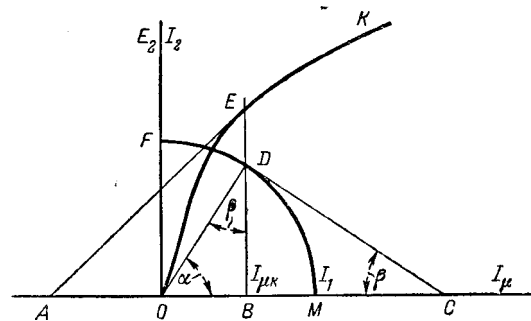


Рис. 1.

ляющие условие, при котором имеет место максимальный момент двигателя:

$$\frac{R_2}{s_{\kappa}} = \sqrt{x_{\mu\kappa} \left[\frac{dE_2}{dI_{\mu}} \right]_{I_{\mu} = I_{\mu\kappa}}} ; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\kappa} = \sqrt{\frac{x_{\mu\kappa}}{\left[\frac{dE_2}{dI_{\mu}} \right]_{I_{\mu} = I_{\mu\kappa}}} > 1. \quad (7)$$

Заменяя $\left[\frac{dE_2}{dI_{\mu}} \right]_{I_{\mu} = I_{\mu\kappa}}$ через $\psi^2 x_{\mu\kappa}$, получим:

$$\frac{R_2}{s_{\kappa}} = \psi x_{\mu\kappa}, \quad (8)$$

где

$$\psi = \sqrt{\frac{\left[\frac{dE_2}{dI_{\mu}} \right]_{I_{\mu} = I_{\mu\kappa}}}{x_{\mu\kappa}}} = \operatorname{tg} \beta_{\kappa} = \frac{I_{\mu\kappa}}{I_{2\kappa}}. \quad (9)$$

Подставляя $\frac{R_2}{s_{\kappa}}$ из формулы (8) в (1), (2) и (4), получим для токов и максимального момента следующие выражения:

$$I_{\mu\kappa} = \frac{I_1 \psi}{\sqrt{1 + \psi^2}}; \quad (10)$$

$$I_{2\kappa} = \frac{I_1}{\sqrt{1 + \psi^2}}; \quad (11)$$

$$M_m = \frac{2,92}{n_c} I_1^2 x_{\mu\kappa} \frac{\psi}{1 + \psi^2}. \quad (12)$$

При отсутствии насыщения можно считать, что $x_{\mu} = \frac{dE_2}{dI_{\mu}} = \text{const}$ и, следовательно, коэффициент $\psi = 1$. Практически величина ψ изменяется в пределах 1...0,5 в зависимости от величины тока возбуждения.

На рис. 2 представлены кривые зависимости относительных величин $I_{2\kappa}^{\partial}$, $I_{\mu\kappa}^{\partial}$, $x_{\mu\kappa}^{\partial}$ и ψ от относительной величины тока возбуждения $I_1^{\partial} = \frac{I_1}{I_0}$,

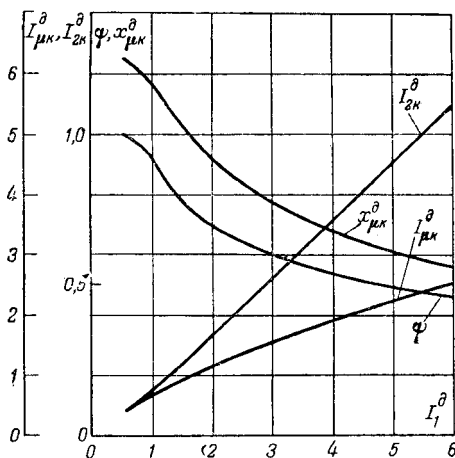


Рис. 2.

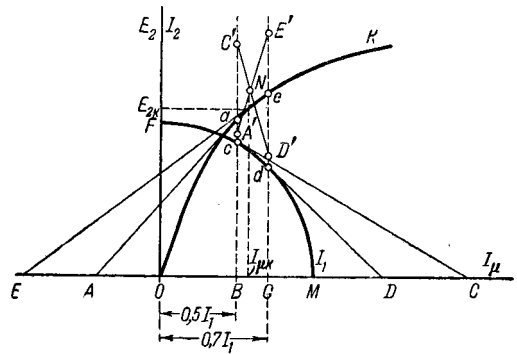


Рис. 3.

построенные для нормальной характеристики холостого хода. Из рассмотрения кривых видно, что с увеличением тока возбуждения коэффициент ψ и реактивное сопротивление $x_{\mu\kappa}$ уменьшаются; следовательно, критическое скольжение $s_{\kappa} = \frac{R_2}{x_{\mu\kappa} \psi}$ будет увеличиваться. Обращаясь к формулам (10) и (11), легко видеть, что вследствие переменного насыщения стали значение тока $I_{\mu\kappa}$ всегда меньше $\frac{I_1}{\sqrt{2}}$, а $I_{2\kappa} > \frac{I_1}{\sqrt{2}}$. Расчеты показывают, что величина тока $I_{\mu\kappa}$ обычно находится в пределах (0,5...0,7) I_1 . Эти ограниченные пределы изменений величины $I_{\mu\kappa}$ значительно облегчают задачу непосредственного определения ее. Можно показать, что кривые подкасательных

$$\frac{E_2}{\left[\frac{dE_2}{dI_{\mu}} \right]} = f_1(I_{\mu}) \quad \text{и} \quad \frac{I_2}{\left[\frac{dI_2}{dI_{\mu}} \right]} = \varphi_1(I_{\mu}) \quad \text{в области}$$

$$I_{\mu} \approx I_{\mu\kappa}$$

имеют сравнительно небольшую кривизну, направленную в одну сторону. Поэтому при рассмотрении достаточно узкой области этих кривых они могут быть с достаточной точностью аппроксимированы хордами, пересечение которых даст точку, определяющую искомое значение тока $I_{\mu\kappa}$. Для этого необходимо произвести следующие простые построения (рис. 3).

Для тока $I_{\mu} = 0,5 I_1 = OB$ определяются подкасательные \overline{AB} и \overline{BC} путем проведения касательных к кривой холостого хода в точке a и к окружности тока в точке c .

Полученные подкасательные \overline{AB} и \overline{BC} откладываются как ординаты, соответствующие абсциссе $I_{\mu} = 0,5 I_1 = OB$; при этом получают точки A' и C' . Аналогичные построения произведены и для тока $I_{\mu} = 0,7 I_1 = OG$; в результате были получены точки E' и D' . Полученные точки соединяются прямыми $A'E'$ и $C'D'$. Точка N пересечения прямых определяет величину $I_{\mu\kappa}$ и, следовательно, $E_{2\kappa}$ и $x_{\mu\kappa}$. Точность определения тока $I_{\mu\kappa}$, получаемая при таком построении,

оказывается вполне достаточной, и ошибка обычно не превышает 20%.

Зная величины $I_{\mu\kappa}$, $E_{2\kappa}$ и $x_{\mu\kappa}$, можно по формулам (8), (9) и (12) подсчитать значения ψ , s_{κ} и M_m .

Для упрощения практических расчетов и выяснения зависимости M_m и s_{κ} от тока возбуждения построены кривые коэффициентов пропорциональности k_m и k_s (рис. 4), которые определяются из следующих соотношений. Согласно (4)

$$M_m = \frac{2,92}{n_c} E_{2\kappa} I_{2\kappa} = 2,92 E_{2\kappa}^{\partial} I_{2\kappa}^{\partial} \cdot \frac{U_{н.ф} I_0}{n_c},$$

или

$$M_m = k_m \frac{U_{н.ф} I_0}{n_c}, \quad (13)$$

где $U_{н.ф}$ — номинальное фазное напряжение двигателя;

I_0 — фазный ток холостого хода двигателя.

Согласно (8)

$$s_{\kappa} = \frac{R_2}{\psi x_{\mu\kappa}} = \frac{1}{\psi x_{\mu\kappa}^{\partial}} \cdot \frac{R_2 I_0}{U_{н.ф}},$$

или

$$s_{\kappa} = k_s \cdot \frac{R_2 I_0}{U_{н.ф}}, \quad (14)$$

где

$$k_s = \frac{1}{\psi x_{\mu\kappa}^{\partial}}.$$

Апроксимируя построенные на рис. 4 кривые зависимости коэффициентов k_m и k_s от тока возбуждения $I_1^{\partial} = \frac{I_1}{I_0}$, можно получить следующие выражения для расчета максимального момента и критического скольжения:

$$M_m = \frac{2,53 (I_1^{\partial})^2}{1 + 0,505 I_1^{\partial}} \cdot \frac{U_{н.ф} I_0}{n_c}; \quad (15)$$

$$s_{\kappa} = (0,58 I_1^{\partial} + 0,4) \cdot \frac{R_2 I_0}{U_{н.ф}}. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) дают возможность легко и с достаточной точностью определить M_m и s_{κ} по каталожным данным двигателя. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показывает, что точность расчета по этим формулам для двигателей различных серий вполне удовлетворительна, так как погрешность обычно не превышает 3...4%. Значительная точность расчета по полученным формулам объясняется тем, что величина тока $I_{\mu\kappa}$ изменяется в сравнительно узких пределах и всегда находится в области, близкой к току холостого хода I_0 , где кривые намагничивания различных двигателей, выраженных в относительных единицах, совпадают с наибольшей точностью.

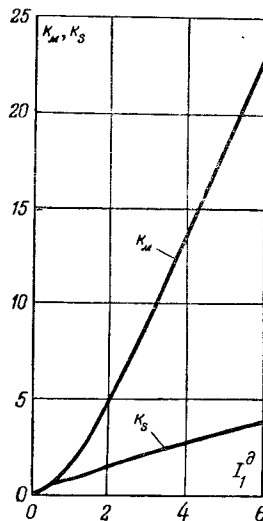


Рис. 4.

Определив значения M_m и s_{κ} , можно рассчитать и всю рабочую часть тормозной характеристики по известной формуле:

$$M = \frac{2M_m s s_{\kappa}}{s_{\kappa}^2 + s^2}. \quad (17)$$

Расчет неустойчивой части характеристики (при $s > s_{\kappa}$) следует производить, как для ненасыщенного двигателя, применяя спрямление кривой намагничивания.

Приложение. Пример 1. На двигателе типа SD-5 были проведены эксперименты при постоянном токе возбуждения $I_n = 10$ а.

Данные двигателя: $P = 3,6$ квт; $U_n = 380$ в; $I_n = 7,7$ а; $I_0 = 5,2$ а; $n_c = 1500$ об/мин; $r_2 = 1,6$ ом; обмотки статора и ротора соединены в звезду.

Коэффициент трансформации от статора к ротору $k_T = 2,26$.

Приведенный ток возбуждения

$$I_1^{\partial} = \frac{I_n}{1,23 I_0} = 1,56.$$

Сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору,

$$R_2 = r_2 k_T^2 = 8,2 \text{ ом.}$$

Пользуясь формулами (15) и (16), находим:

$$M_m = 2,62 \text{ кгм; } s_{\kappa} = 0,25.$$

Действительные значения M_m и s_{κ} , полученные экспериментально, равны:

$$M_m = 2,65 \text{ кгм; } s_{\kappa} = 0,24.$$

Пример 2. Сравнение результатов расчета с данными, взятыми из работы А. Т. Голована [Л. 4]. Данные двигателя типа МТ-31/6: $P = 5$ квт; $U_n = 380$ в; $I_n = 21,2$ а; $n_c = 1000$ об/мин;

$$\eta_n = 0,775; \cos \varphi_n = 0,46; s_n = 0,02; \frac{M_{\max}}{M_n} = 3,1; U_{2n} = 200 \text{ в;}$$

$$I_{2n} = 16 \text{ а; } I_0 = 17,2 \text{ а; } R_2 \approx 0,48 \text{ ом.}$$

Данные характеристики намагничивания двигателя сведены в таблицу.

Ж 7072

I_{μ}^{∂}	0,5	1,0	1,2	1,4	1,6	2	3	4	5
E^{∂}	0,65	1	1,07	1,12	1,16	1,25	1,34	1,4	1,425

Расчет производим для тока возбуждения $I_n = 27,7$ а. Приведенный ток возбуждения

$$I_1^{\partial} = \frac{I_n}{1,23I_0} = 1,31.$$

После выполнения графических построений, аналогичных построениям на рис. 3, были получены следующие значения токов и напряжения, соответствующие максимальному тормозному моменту: $I_{\mu\kappa}^{\partial} = 0,78$; $I_{2\kappa}^{\partial} = 1,05$; $E_{2\kappa}^{\partial} = 0,89$.

Коэффициенты пропорциональности:

$$k_m = 2,92E_{2\kappa}^{\partial}I_{2\kappa}^{\partial} = 2,74;$$

$$k_s = I_{2\kappa}^{\partial} : E_{2\kappa}^{\partial} = 1,18.$$

Подставляя полученные значения коэффициентов k_m и k_s в формулы (13) и (14), получим:

$$M_m = 10,2 \text{ кгм}; s_{\kappa} = 0,045.$$

В работе А. Т. Голована [Л. 5] приведены следующие данные:

$$M_m = 10,4 \text{ кгм}; s_{\kappa} = 0,05.$$

Принятые обозначения

M — электромагнитный тормозной момент;

I_1 — приведенный ток возбуждения, эквивалентный постоянному току в статорной обмотке;

I_2 — ток в обмотке ротора;

I_{μ} — результирующий намагничивающий ток;

x_{μ} — реактивное сопротивление намагничивания;

$s = \frac{n}{n_c}$ — скольжение;

n_c — синхронная скорость вращения ротора;

R_2 — полное сопротивление фазы ротора;

E_2 — э. д. с. фазы ротора, приведенная к синхронной скорости вращения.

Все величины предполагаются приведенными к обмотке статора.

Литература

1. В. С. Ракита. Теория динамического торможения асинхронного двигателя. ВЭП, № 10, 1940.

2. В. К. Медунов. Аналитический расчет характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении. Электричество, № 8, 1949.

3. В. Т. Касьянов. Динамическое торможение асинхронных двигателей. ВЭП, № 8, 1936.

4. А. Т. Голован, И. П. Барабаш и А. П. Куваева. Инженерные методы расчета динамического торможения асинхронных машин. МЭИ. 1950.

[23. 3. 1955 I]



Пути улучшения тяговых двигателей постоянного тока

Кандидат техн. наук Н. С. ПОМИЛУЙКО и кандидат техн. наук, доц. П. Н. ШЛЯХТО

Москва

В настоящее время наряду с изысканием наиболее экономически целесообразных систем тока для дальнейшего развития электрической тяги на железных дорогах стоит задача максимального усовершенствования принятой у нас для электрической тяги системы постоянного тока.

Это усовершенствование в области электроподвижного состава определяется необходимостью улучшения тяговых и рекуперативных характеристик электровозов и моторных вагонов, повышением использования их мощности, а также устойчивости тяговых двигателей против возникновения кругового огня. В связи с увеличением провозной и пропускной способности железных дорог остро ставится вопрос о повышении скоростей движения. Поэтому увеличение скоростей движения и полное использование мощности являются одним из главных условий развития электроподвижного состава. Если эксплуатируемые в настоящее время серийные электровозы серии ВЛ-22М с двигателями ДПЭ-400А обеспечивают среднетехнические скорости движения по участку 40 ... 50 км/час, то получение необходимых скоростей порядка 70 ... 80 км/час потребует почти двойного увеличения мощности. Однако постройка тяговых двигателей мощностью 700 ... 800 квт при обычной их конструкции практически

невозможна из-за тяжелых условий коммутации в переходных режимах и ограниченности габарита. Характеристики существующих тяговых двигателей постоянного тока не обладают требуемыми регулировочными качествами. Они не обеспечивают широкой регулировки поля, не перекрывают экономическими регулировочными характеристиками при различных соединениях зоны между ходовыми характеристиками. В режиме рекуперативного торможения они дают малые тормозные усилия в зоне высоких скоростей. Кроме того, двигатели ограничены по коммутации и имеют ряд конструктивных и эксплуатационных недостатков.

На рис. 1 приведены характеристики двигателя ДПЭ-400А. Из рассмотрения их видно, что зоны между ходовыми характеристиками при различных соединениях — последовательном, последовательно-параллельном и параллельном — не перекрываются другими ходовыми характеристиками, а в зоне высоких скоростей имеют место малые тяговые усилия. Идеальным было бы получение тяговых характеристик с полным перекрытием всей зоны тяговой диаграммы, т. е. любого тягового усилия при любой заданной скорости движения в пределах сцепления колес с рельсами. При рекуперативном торможении также

желательно получить любые тормозные усилия при любых скоростях.

В отношении коммутации тяговые двигатели находятся в очень тяжелых условиях. Они все время подвержены изменяющимся нагрузкам, связанным с регулированием скорости, включением и выключением тока, колебаниями напряжения в контактной сети и т. п. Устойчивость их к переходным нагрузкам низка. Примером может служить широко применяемый тяговый двигатель ДК-103А моторных вагонов, у которого часты случаи возникновения кругового огня. Возникают перебросы и у электровозного двигателя ДПЭ-400А.

Основной причиной, вызывающей круговой огонь на коллекторе в переходном режиме, является недостаточная компенсация реактивной э. д. с. коммутируемых секций из-за отставания потока дополнительного полюса, трансформаторных э. д. с. и значительное искажение потенциала на коллекторе полем реакции якоря.

Как показывают исследования [Л. 1 и 2], существенную роль в распространении кругового огня по коллектору играет величина потенциала в непосредственной близости под сбегающим краем щетки.

Увеличение потенциала под краями полюса (возрастание коэффициента нарастания напряжения) создает благоприятные условия для возникновения кругового огня при искрении щеток или вспышках. Поэтому основным мероприятием для устранения причин кругового огня является снижение потенциала в непосредственной близости от сбегающего края щетки.

Основными средствами борьбы с искажающим влиянием поля реакции якоря в современных тяговых двигателях постоянного тока являются: переменный воздушный зазор, уменьшение полюсного перекрытия, увеличение н. с. возбуждения, насыщение полюсного наконечника, скос краев полюсного наконечника и т. п. [Л. 3].

На рис. 2 приведены различные формы полюсных наконечников и воздушного зазора и распределение соответствующих им полей. Как видно, наиболее эффективным средством борьбы с полем реакции якоря являются расходящийся

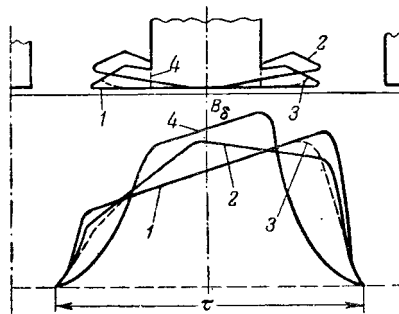


Рис. 2. Формы полюсных наконечников и распределение в воздушном зазоре соответствующих им полей.

воздушный зазор и уменьшение полюсной дуги. Но такой вариант требует слишком значительного увеличения н. с. возбуждения. К тому же следует учесть, что для расширения регулировочных характеристик требуется глубокое ослабление поля. Это может нарушить устойчивость работы двигателя (опрокидывание поля), вследствие чего потребуется дополнительное увеличение н. с. возбуждения. Поэтому из-за указанных ограничений тяговые двигатели практически не строятся с ослаблением поля ниже 50 ... 40%.

Другим существенным недостатком тяговых двигателей являются конструкция дополнительных полюсов и способ создания коммутирующего потока в нейтральной зоне. Наличие значительной разности магнитных потенциалов между краями главного и дополнительного полюсов приводит к созданию больших потоков рассеяния как у главных, так и особенно у дополнительных полюсов.

На рис. 3 приведена картина распределения полного магнитного поля тягового двигателя ДПИ-150. Из рисунка видно, что потоки рассеяния дополнительного полюса очень велики. В тяговых машинах они превосходят на 400 ... 500% поток коммутации. Таким образом, полюса насыщаются и уже при двойном токе нарушается линейность их характеристики намагничивания. Получить прямолинейную характеристику намагничивания дополнительного полюса при кратности тока, равной двум, не удается. Применение диа-

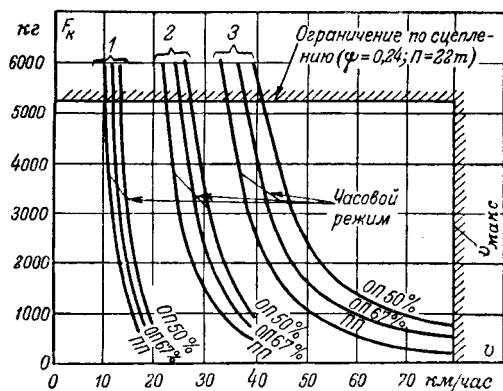


Рис. 1. Тяговые характеристики двигателя ДПЭ-400А.

1 — при последовательном соединении; 2 — при последовательно-параллельном соединении; 3 — при параллельном соединении.

2*

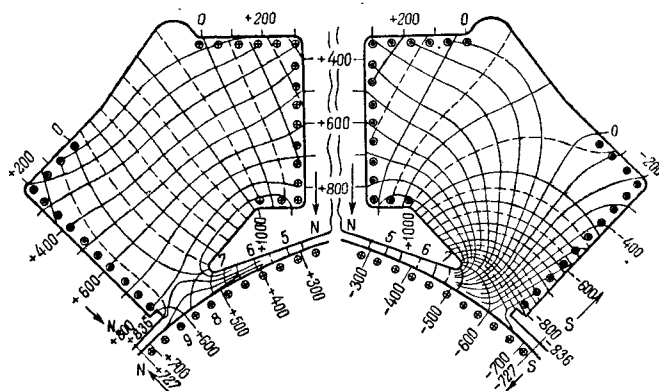


Рис. 3. Распределение полного магнитного поля двигателя ДПИ-150.

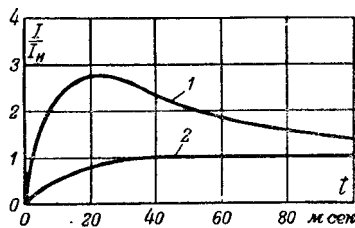


Рис. 4. Кривые токов при ударной нагрузке.
1—для двигателя ДК-103А; 2—для двигателя новой системы.

магнитной прокладки под сердечниками добавочных полюсов не дает требуемых результатов. Этот «второй воздушный зазор» принципиально не решает задачи. Он не устраняет главной причины, вызывающей большие потоки рассеяния, а усугубляет ее, так как приходится увеличивать н. с. дополнительного полюса. Так, у тяговых двигателей разность магнитных потенциалов между краями главного и дополнительного полюсов составляет $\Delta\varphi = 20 \dots 30$ ка при часовом режиме. Для двигателей ДПЭ-400А и ДК-103А он равен соответственно 30,5 и 18,9 ка. При двойном токе $\Delta\varphi$ еще больше увеличивается.

Вторым существенным недостатком дополнительного полюса является наличие в его цепи массивного остова, что нарушает нормальную коммутацию в переходных режимах из-за демпфирования потока. Кроме того, массивный остов значительно ухудшает переходные режимы в тяговом двигателе и приводит к броскам тока. Влияние демпфирующего действия вихревых токов наиболее ярко видно при испытаниях тяговых двигателей на ударную нагрузку. При этом броски тока достигают 2...4 установившихся значений. В качестве примера на рис. 4 приведена кривая 1 тока тягового двигателя ДК-103А при ударной нагрузке, рассчитанная без учета насыщения характеристики намагничивания.

При работе тяговые двигатели подвергаются сильным ударным и вибрационным нагрузкам, что приводит к расстройству крепления болтов и ослаблению сердечников полюсов. Катушки главных и дополнительных полюсов имеют значительные размеры и большой вес. Вследствие вибрации расстраивается их крепление и нарушается изоляция. Кроме того, катушки полюсов имеют большое поперечное сечение, что затрудняет их вентиляцию и охлаждение. В связи с этим приходится принимать большие сечения меди и малые плотности тока в витках (2,5...3,5 а/мм²).

Главными средствами устранения недостатков современных тяговых двигателей являются следующие мероприятия:

1. Стабилизация распределения потенциала по коллектору.

2. Уменьшение коэффициента нарастания напряжения между пластинами коллектора в зоне щетки, т. е. создание синусоидальной формы поля в воздушном зазоре.

3. Улучшение коммутации тяговых двигателей в стационарных и переходных режимах путем:

а) уменьшения насыщения дополнительного полюса; б) уменьшения потоков рассеяния дополнительного полюса; в) устранения демпфирования потока дополнительного полюса вихревыми токами.

4. Уменьшение пиков тока при неустановившихся процессах.

Стабилизировать распределение потенциала на коллекторе можно применением компенсационной обмотки. Компенсационная часть витков, заложенная на добавочных полюсах, должна быть рассредоточена по периферии статора, что дает полное решение вопроса стабилизации потенциала на коллекторе в любом режиме и устранение искажающего влияния реакции якоря.

Одновременно с этим решается задача получения синусоидальной формы поля в воздушном зазоре и удаления пластин с высоким потенциалом из зоны коммутации. Так, если расположить в тех же пазах статора распределенную обмотку возбуждения (рис. 5), можно получить требуемое синусоидальное поле.

Статор тягового двигателя необходимо выполнять из листов электротехнической стали по типу машин переменного тока. Применение шихтованного статора позволяет решить все остальные задачи как по устранению пиков тока, так и демпфированию потока дополнительного полюса.

Рассредоточение обмоток главного и дополнительного полюсов решает наиболее трудную задачу — снижение потоков рассеяния и улучшение характеристики дополнительного полюса. Как показывают расчеты, индукцию в теле дополнительного полюса можно снизить до совершенно незначительной величины (0,08...0,1 всек/мм²). При этом даже 10-кратный бросок тока не вызовет сколько-нибудь заметного насыщения в теле дополнительного полюса. Демпфирующее действие вихревых токов при шихтованном статоре равно нулю, так как коэффициент затухания при-

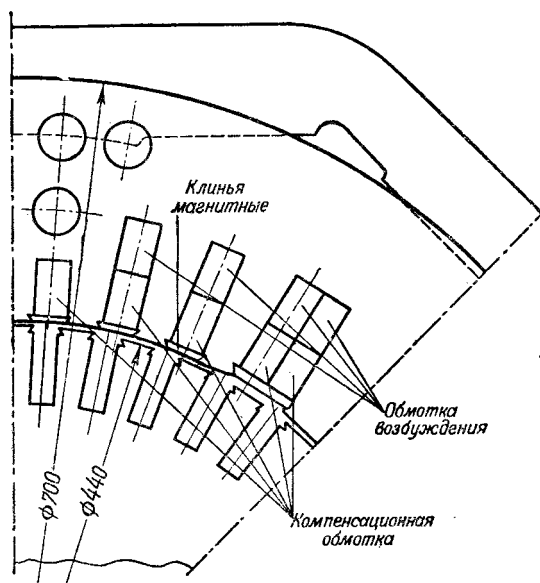


Рис. 5.

мерно в 10 000 ... 50 000 раз больше, чем в обычных тяговых двигателях.

Расщедоточенные обмотки главных и дополнительных полюсов могут быть выполнены по известному типу обмоток машин переменного тока, причем наиболее подходящей является двуслойная обмотка. Указанные мероприятия позволяют создать очень компактную конструкцию статора тягового двигателя. Это наиболее наглядно видно на примере вписывания подобного статора в габарит двигателя ДК-103А (рис. 5).

В связи с тем, что реакция якоря в таких машинах скомпенсирована, имеется возможность значительно снизить величину воздушного зазора. В тяговых коллекторных двигателях переменного тока она выбирается около 2 ... 3,5 мм в зависимости от размеров якоря.

Произведенный авторами примерный расчет такого двигателя в габаритах существующего ДК-103А при неизменном якоре показывает реальность получения тягового двигателя с более высоким использованием мощности.

Основные данные пересчитанного двигателя

Намагничивающая сила якоря	$F_{я} = 4970 \text{ а}$
Линейная нагрузка якоря	$AS_{я} = 288 \text{ а/см}$
Ток двигателя	$I = 132 \text{ а}$
Число секций компенсационной обмотки	$S_{к} = 5$
Число витков компенсационной обмотки	$w_{к} = 40$
Число витков в секции компенсационной обмотки	$w'_{к} = 8$
Линейная нагрузка компенсационной обмотки	$AS_{к} = 288 \text{ а/см}$
Реактивная э. д. с.	$e_p = 1,5 \text{ в}$
Индукция в зоне коммутации	$B_{к} = 0,088 \frac{\text{всек}}{\text{м}^2}$
Зазор под дополнительным полюсом	$\delta_{\partial} = 3,8 \text{ мм}$
Зазор под главным полюсом	$\delta_2 = 2 \text{ мм}$
Число секций обмотки главного полюса	$S_2 n = 4$
Число витков в секции главного полюса	$w'_2 n = 8$
Число витков главного полюса	$w_2 n = 32$
Намагничивающая сила возбуждения	$F_{\partial} = 4226 \text{ а}$

Размеры:

паза статора	$17,7 \times 54 \text{ мм}$
проводника	$6,4 \times 5,5 \text{ мм}$
секции обмотки главных полюсов	$17,6 \times 27,7 \text{ мм}$
секции компенсационной обмотки	$17,6 \times 27,7 \text{ мм}$
магнитного клина	4 мм
Плотность тока	$3,85 \text{ а/мм}^2$
Сопrotивление обмотки главных полюсов	$0,088 \text{ ом}$
Сопrotивление компенсационной обмотки	$0,14 \text{ ом}$
Сопrotивление обмотки якоря	$0,27 \text{ ом}$
Общее сопротивление обмоток двигателя	$0,498 \text{ ом}$
Потери в меди статора	3960 вт

Расчет показывает, что при данной н. с. F_{∂} можно получить магнитный поток величиной 0,07 ... 0,08 *всек*, чего вполне достаточно, так как номинальный поток при расчетном режиме равен 0,0645 *всек*. Кроме того, имеется возможность

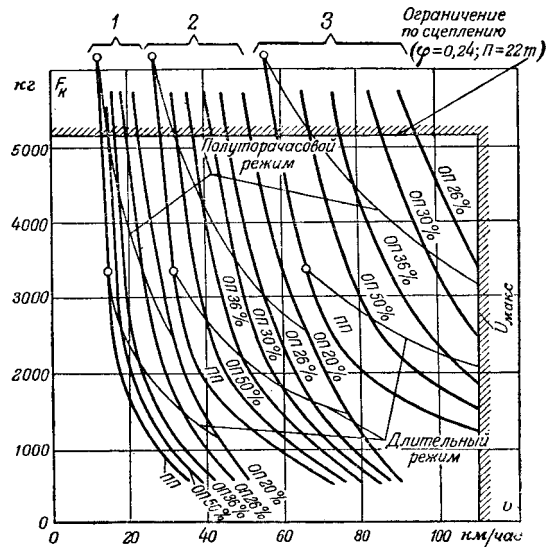


Рис. 6. Тяговые характеристики двигателя новой системы мощностью 700 квт, $U_{к} = 1650 \text{ в}$.

1 — при последовательном соединении; 2 — при последовательно-параллельном соединении; 3 — при параллельном соединении.

увеличить число витков в секции до десяти. Это даст н. с. возбуждения величиной 5 230 *в* и позволит увеличить магнитный поток, если это потребуется.

Потери в обмотках главных и дополнительных полюсов тягового двигателя ДК-103А равны 7 340 *вт*, что почти вдвое больше, чем в предлагаемом двигателе. Расчет вентиляции и нагрева показывает, что перегрев обмоток статора не превосходит 40 ... 50° С. Отсюда ясно, что сечение обмоток статора может быть значительно уменьшено и размеры статора двигателя сокращены, а следовательно, и вписывание предельной мощности в ограниченный габарит может быть решено без особых затруднений.

В связи с тем, что распределенная обмотка дополнительного полюса (компенсационная и собственно дополнительного полюса) состоит из секций, величину зазора приходится определять из расчета на их полное число. Уточнение его величины может быть выполнено на опытном образце по кривым подпитки.

В двигателе новой системы благодаря устранению демпфирования магнитного потока главного полюса значительно улучшается работа в переходных режимах, так как устраняются пики тока. На рис. 4 приведена кривая 2 тока при ударной нагрузке пересчитанного двигателя ДК-103А. Как видно, в данном случае нарастание тока происходит плавно, пик отсутствует. Следовательно, устранение демпфирующего действия вихревых токов в статоре дает возможность полностью избавиться от пиков тока, т. е. уменьшить токи в переходных режимах в 2.. 3 раза по сравнению с токами обычных тяговых двигателей.

Применение двигателя новой системы открывает большие возможности для практики. Нескаженный стабилизированный потенциал на коллекторе позволяет допустить большие значе-

ния градиента напряженности поля. Кроме того, двигатель имеет широкие регулировочные свойства. Ослабление поля ограничено только величиной максимального тока из-за нагрева якоря.

На рис. 6 приведены тяговые характеристики шестиполусного двигателя новой системы мощностью 700 квт с напряжением на коллекторе 1 650 в, предназначенного для восьмимоторной схемы электровоза. Из рисунка видно, что при широкой регулировке поля удается полностью перекрыть автоматическими характеристиками всю плоскость диаграммы и иметь высокие тяговые усилия в зоне больших скоростей.

При существующей системе электрической тяги напряжением 3 000 ... 3 300 в в контактом проводе и половинном напряжении на коллекторе $U_k = 1 500 \dots 1 650$ в в электровозном двигателе представляет интерес шестиполусный вариант. Новый двигатель дает возможность поднять среднее значение $\text{grad } U_k$ на коллекторе и тем самым удачно решить задачи вписывания шести полюсов в заданный габарит. При тех же значениях вращающего момента, что и у четырехполусного двигателя, шестиполусный вариант позволяет в 1,5 раза снизить магнитный поток на полюс и уменьшить поперечное сечение спинки статора и сердечника якоря и, следовательно, вес двигателя. Представляет значительный интерес четырехполусный вариант электровозного двигателя при напряжении на коллекторе, равном напряжению сети ($U_k = U_c = 3 000 \dots 3 300$ в). Решение подобной задачи вполне возможно. Расчет устойчивости против кругового огня [Л. 2] показывает, что $\text{grad } U_k$ в зоне щетки под краем главного полюса имеет вполне допустимые значения и лежит ниже, чем у существующих тяговых двигателей. При этом запас устойчивости получается не менее двукратного значения. Если же принять во внимание, что коммутация нового тягового двигателя в переходных режимах находится несравненно в лучших условиях, чем обычного, то становится ясно, что новый двигатель будет иметь большую реальную устойчивость против кругового огня, чем обычные тяговые двигатели.

Особый интерес представляет также четырехполусный вариант нового тягового двигателя с $U_k = U_c = 3 000 \dots 3 300$ в для маневрового электровоза. При четырехмоторной схеме и трех соединениях двигателей (последовательном, последовательно-параллельном и параллельном) можно получить низкие скорости выхода на автоматическую характеристику порядка 2 ... 4 км/час.

Выводы. 1. Новый двигатель отличается высоким использованием активных материалов, что дает уменьшение его веса на единицу мощности. Размещение обмоток статора в пазах исключает недостаток, присущий современным двигателям постоянного тока с массивными катушками на сердечниках полюсов. При этом отпадает необходимость болтового крепления тяжелых полюсов.

2. Наряду со значительным улучшением эксплуатационных экономических характеристик электроподвижного состава новый двигатель позволит повысить надежность работы электрической тяги за счет высокой устойчивости против кругового огня.

3. Применение новых двигателей для всех видов моторвагонной тяги позволит сократить расход энергии при частых пусках за счет более широкого экономического регулирования поля, которое также принесет существенный эффект в повышении использования рекуперативного торможения, что ценно, особенно в зоне высоких скоростей.

В связи с широкими регулировочными свойствами нового двигателя представляет интерес возможность более эффективного использования его при смешанном возбуждении.

4. Применение новых двигателей в тепловозной тяге позволит использовать полную мощность дизеля при всех режимах эксплуатационной работы.

5. Особый интерес новый тяговый двигатель представляет в связи с возможностью повышения напряжения контактной сети с соответствующей экономией капитальных затрат по устройству энергоснабжения электрических железных дорог.

6. Новый двигатель целесообразно использовать не только для всех видов электрической тяги, но и для электрических машин, работающих в тяжелых переходных режимах и с широкой регулировкой поля возбуждения.

Литература

1. О. Б. Брон и В. С. Александров. Круговой огонь на коллекторе машин постоянного тока. Электричество, № 3, 1955.
2. А. И. Москвитин. Круговой огонь на коллекторе и причины его возникновения. Электричество, № 17—18, 1932.
3. П. Н. Шляхто и Д. Д. Захарченко. Подвижной состав электрических железных дорог. Трансжелдориздат, т. II, 1951

[15. 4. 1955]



Автоматическое управление скоростью двигателя постоянного тока с большим диапазоном скоростей

Кандидаты техн. наук А. М. СУЧИЛИН и Е. И. ЮРЕВИЧ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Схемы электроприводов, предназначенных для получения скоростей порядка 1 ... 5 об/мин в условиях изменения нагрузки на валу двигателя, включают в себя усилители со стабилизирующими связями и тахогенератор и являются сложными системами автоматического управления скоростью электродвигателя.

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы автоматического управления скоростью электродвигателя постоянного тока, обеспечивающей при неизменном токе возбуждения двигателя диапазон изменений скорости, равный 2 750 *.

В схеме использован двигатель ПН-28,5 мощностью 4,2 квт; $n_n = 2\ 200$ об/мин. К якорю двигателя подводится напряжение от генератора, в качестве которого использован электромашиный усилитель ЭМУ-50 мощностью 4,5 квт.

Схема представляет собой комбинацию разомкнутой системы управления, при помощи которой устанавливается требуемое значение скорости и замкнутой системы автоматического регулирования, обеспечивающей поддержание заданного значения скорости с требуемой точностью. Требуемое значение скорости двигателя задается сигналом, подаваемым на обмотку управления *ou-2* электромашиного усилителя ($R_{ou-2} = 9,2$ ом) с потенциометра *П1*. Одновременно эта обмотка используется и для осуществления жесткой отрицательной обратной связи по напряжению усилителя. Система автоматического регулирования скорости состоит из асинхронного тахогенератора переменного тока *ТГ*, ось которого жестко соединена с валом двигателя, и электронного усилителя, воздействующего на обмотки *ou-1* и *ou-3* ($R_{ou-1} = R_{ou-3} = 2\ 200$ ом). При вращении двигателя на выходе тахогенератора *ТГ* возникает переменное напряжение, частота которого постоянна и равна частоте сети, а амплитуда пропорциональна скорости вращения. Изменение направления вращения вызывает опрокидывание фазы выходного напряжения *ТГ*. Электронный усилитель состоит из двух каскадов усиления переменного тока на двойном триоде *6Н9*, фазочувствительного выпрямительного каскада, собранного на двойном триоде *6Н8*, и усилительного каскада постоянного тока, также на двойном триоде *6Н8*. Последний каскад собран по дифференциальной схеме и его нагрузкой служат обмотки управления *ou-1* и

ou-3, включенные встречно. Переменное сопротивление 10 ком на выходе фазочувствительного каскада служит для установки нуля всего электронного усилителя, т. е. равенства токов в обмотках *ou-1* и *ou-3* при отсутствии сигнала на входе усилителя.

Напряжение на входе электронного усилителя равно разности выходного напряжения тахогенератора и напряжения, снимаемого с потенциометра *П2*. Движок потенциометра *П2* укреплен на одной оси с движком потенциометра *П1*. Таким образом, при изменении задаваемой скорости путем поворота этой оси одновременно с изменением сигнала, подаваемого с потенциометра *П1* на обмотку управления *ou-2*, пропорционально изменяется и напряжение, подаваемое с потен-

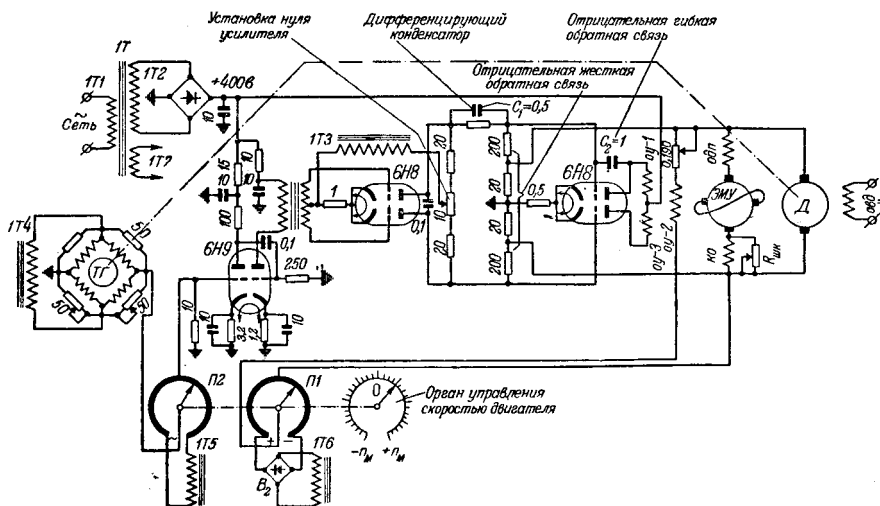


Рис. 1. Принципиальная схема системы автоматического управления скоростью электродвигателя постоянного тока.

циометра *П2* на вход электронного усилителя в противофазе с выходным напряжением тахогенератора.

Если скорость двигателя точно равна заданному значению, напряжение, снимаемое с потенциометра *П2*, полностью компенсирует напряжение тахогенератора и, следовательно, напряжение на входе электронного усилителя отсутствует и токи в обмотках управления *ou-1* и *ou-3* равны.

При отклонении величины скорости двигателя от заданного значения, например вследствие изменения нагрузки или по какой-либо другой причине (изменение напряжения сети, параметров схемы и т. п.), на входе электронного усилителя появится напряжение, равное разности напряжения, снимаемого с потенциометра *П2*, и напряжения тахогенератора. Это вызовет рассогласование токов в обмотках *ou-1* и *ou-3*. Приращение напряжения электромашиного усилителя, обусловленное этим рассогласованием, воздействует на скорость двигателя, возвращая ее к первоначальному заданному значению.

* На рис. 1 величины сопротивлений указаны в килоомах, величины емкостей — в микрофарадах.

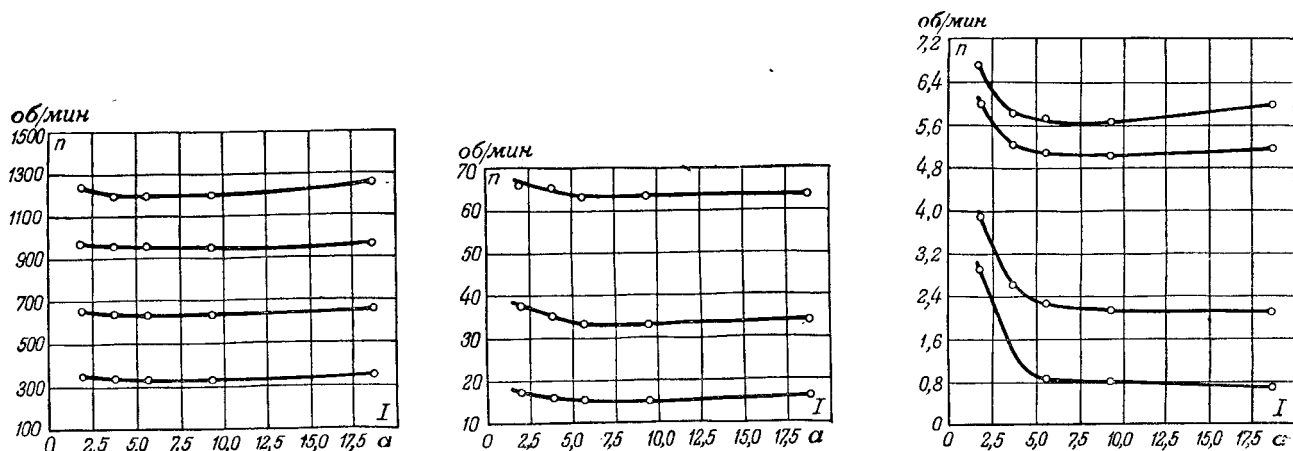


Рис. 2.

Коэффициент усиления замкнутой системы автоматического регулирования скорости равен 700. При этом статическая погрешность поддержания скорости, заданной в диапазоне 0,8... 2 200 об/мин, не превышает 10% при изменении нагрузки от 25 до 85% номинального значения. Минимальная скорость, которую система обеспечивает в этих условиях, составляет 0,25 об/мин. Однако погрешность при этой скорости превышает 10%.

Для уменьшения статической погрешности, вызванной изменением нагрузки, в системе применена положительная обратная связь по току. Она осуществлена путем некоторой перекомпенсации электромашинного усилителя в результате увеличения сопротивления $R_{шк}$, шунтирующего компенсационную обмотку ко. Настройка компенсации усилителя производится из условия получения требуемой точности поддержания скорости при изменении нагрузки от 25 до 85% номинального значения на наиболее тяжелом участке всего диапазона изменения скорости, а именно при наименьшей требуемой скорости. В данном случае оптимальное значение сопротивления $R_{шк} = 45 \text{ ом}$.

При такой настройке степень компенсации, которая, как известно, при уменьшении скорости от ее номинального значения вначале возрастает, примерно при 1 200 об/мин достигает своего наибольшего значения. В этой части диапазона скоростей, т. е. от 2 200 до 1 200 об/мин, заданная точность 10% обеспечивается и без помощи обратной связи по скорости. Дальнейшее уменьшение скорости ведет уже к уменьшению степени компенсации.

На рис. 2 представлены статические характеристики системы $n = f(I)$, где I — ток в цепи якоря двигателя, снятые при $R_{шк} = 45 \text{ ом}$, начиная со скорости $n = 1 200 \text{ об/мин}$, соответствующей наибольшей степени компенсации. Компенса-

ция уменьшается с уменьшением скорости примерно до 100 об/мин, после чего опять возрастает и, наконец, приблизительно со скорости 10 об/мин начинает снова падать.

Для обеспечения устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования в ней применены следующие стабилизирующие средства: отрицательная гибкая обратная связь по напряжению в усилительном каскаде постоянного тока, осуществляемая при помощи конденсатора C_2 , и дополнительное прямое воздействие по производной, осуществляемое при помощи конденсатора C_1 .

Переходный процесс в системе, вызванный мгновенным сбросом номинальной нагрузки, получается колебательным, быстрозатухающим со степенью затухания примерно 95... 98% и длительностью порядка 0,5... 0,8 сек. При мгновенном изменении нагрузки на величину не более половины номинального значения переходный процесс получается аperiodическим с длительностью порядка 0,2... 0,3 сек.

В заключение необходимо отметить, что приведенная схема имеет повышенную надежность и обеспечивает плавность регулирования скорости. Повышенная надежность схемы обуславливается применением бесколлекторного тахогенератора и тем, что обрыв цепи обратной связи по скорости вследствие выхода из строя электронного усилителя не вызывает возрастания скорости вращения двигателя, а наоборот, может привести к ее уменьшению. Это объясняется тем, что в задании требуемого значения скорости обратная связь по скорости не участвует, а служит лишь для стабилизации заданного ее значения.

Плавность регулирования достигнута вследствие устранения переключений в цепях обратных связей при задании любой скорости во всем диапазоне ее изменения.

О повышении надежности работы электроустановок промышленных предприятий

Инж. Л. С. ЛИНДОРФ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Наибольшее число неправильных отключений электроустановок, вызывающих нарушения технологического процесса промышленных предприятий, происходит обычно вследствие неправильного выбора уставок защит. Задержки с включением механизмов в работу как после кратковременных перерывов питания, так и в процессе обычных пусков наиболее часто наблюдаются в установках со сложными схемами пуска и управления.

Схемам пуска асинхронных и синхронных двигателей за последнее время уделяется много внимания. Так, в журналах «Электричество» и «Электрические станции»¹ открыта дискуссия, посвященная вопросам упрощения схем пуска синхронных двигателей; Министерством электростанций выпущены соответствующие эксплуатационные циркуляры; изданы книги, в которых частично излагаются те же вопросы; пересмотрены ведомственные нормалы на схемы пуска синхронных двигателей и т. п. Поэтому в настоящей статье отмечены лишь основные положения по упрощению схем пуска и те вопросы, которым уделено недостаточное внимание.

Прямой пуск. Опыт эксплуатации показал, что наиболее простой и надежной схемой пуска асинхронных и синхронных двигателей является такая, в которой обмотка статора присоединяется непосредственно к сети. Допустимость применения прямых схем пуска синхронных двигателей с явно выраженными полюсами или асинхронных определяется в основном воздействием на сеть.

По тепловому воздействию прямой пуск асинхронных двигателей и синхронных двигателей с явно выраженными полюсами вполне допустим [Л. 1]. Только у двигателей с массивной бочкой ротора повышение напряжения при прямом пуске может сопровождаться значительным увеличением нагрева поверхностных слоев стали, превышающим допустимую температуру (200° С). Напряжение при пуске на выводах синхронных двигателей этого типа ограничивается, как правило, значением 0,55 номинального.

По механическому воздействию на механизм и двигатель прямой пуск также является вполне допустимым.

При протекании пускового тока на лобовые части обмотки статора действуют усилия, стремящиеся отогнуть обмотку к нажимным плитам, сблизить смежные лобовые части одной и той же фазы и раздвинуть смежные лобовые части разных фаз. Для предотвращения деформации обмотки в лобовых частях применяются бандажные кольца, ограничивающие отгиб обмотки, и изоляционные прокладки между спрямленными частями секций, повышающие жесткость лобовых частей.

Необходимость установки дополнительных бандажей определяется из соотношения вылета лобовых соединений и высоты обмотки в пазу [Л. 2 и 3]. В подавляющем большинстве случаев при переходе двигателей, находящихся в эксплуатации, с автотрансформаторного или реакторного пуска на прямой установка дополнительных бандажей не требуется.

Как показали специальные тензометрические исследования, проведенные ЦНИЭЛ², с синхронным двигателем 2300 кВа, 6,6 кВ, 1000 об/мин, при переводе его с автотрансформаторного на прямой пуск наибольшая деформация лобовых частей отмечалась на их прямолинейном участке после сгиба. Однако и в этом месте относительное удлинение верхних покровов изоляции не превышало $3 \cdot 10^{-4}$ при пусковом токе, равном $3,5 I_n$ (при допустимом относительном удлинении изоляции $7 \cdot 10^{-3}$).

В первые несколько периодов пуска, до затухания аperiodической составляющей тока в обмотке, лобовые части находятся под воздействием усилий, действующих преимущественно с частотой 50 гц, после чего начинают проявляться усилия с частотой 100 гц. Изменение деформации по амплитуде следует за изменением тока (рис. 1).

Увеличение жесткости обмотки статора в лобовых частях может требоваться только при кратностях пускового тока больше 5.

В местах крепления активной стали усилия проявляются в виде деформаций и вибраций, однако они по своей величине невелики. Максимальные усилия, измеренные в местах крепления активной стали на двух синхронных двигателях различных конструкций, изготовленных в 1932—1936 гг. и предназначенных для пуска через автотрансформатор, не превышали при прямых пусках 120 кг/см^2 .

Величины усилий, возникающих при пуске, значительно ниже предела усталости для касательных усилий, принимаемого равным 400 кг/см^2 , и не могут являться препятствием для перевода двигателей с пуска при пониженном напряжении на прямой.

Величины механических усилий, возникающих в вале при прямом пуске, также не могут являться препятствием для осуществления перехода с пуска при пониженном напряжении на прямой. Пусковой момент двигателя, создающий ускорение, распределяется пропорционально маховым массам ротора двигателя и механизма. Учитывая, что начальные моменты крупных двигателей обычно не превышают значений 1,2 ... 1,4 номинального, а маховые массы двигателя и механизма соизмеримы, то воздействие на вал при пуске будет ниже, чем при работе с номинальной нагрузкой.

¹ Электричество, № 5, 1953; № 2, 5, 8, 9, 10, 11, 1954; Электрические станции, № 7, 1954.

² В испытаниях, кроме автора, принимали участие А. А. Коваль, И. П. Комиссарова и М. Ф. Юдов.

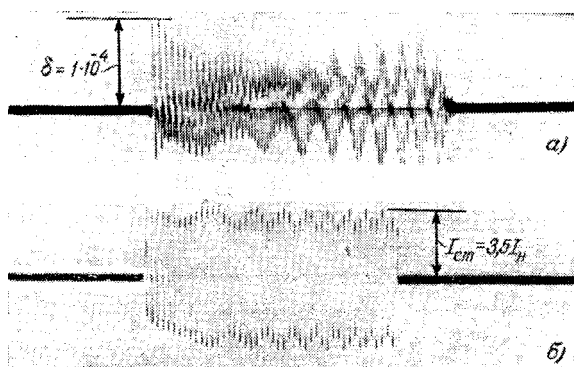


Рис. 1. Осциллограммы изменения деформации лобовых частей статора (а) и тока статора (б) синхронного двигателя 2 300 ква, 6,6 кв, 1 000 об/мин.

Допустимость прямых пусков двигателей, ранее пускавшихся от автотрансформаторов, подтверждается многолетним опытом эксплуатации высоковольтных двигателей разных мощностей, переведенных с автотрансформаторного на прямой пуск. Такие переходы, как позволяющие упростить эксплуатацию и повысить надежность работы, должны всячески поощряться.

Допустимость пуска и методика расчета двигателей по условиям воздействия на сеть подробно рассмотрены в ранее опубликованных материалах (например, [Л. 1 и 3]). Пуск следует считать допустимым, если понижение напряжения на шинах не превышает 10...15% номинального, при условии, что от тех же шин питается осветительная нагрузка, и не превышает 20% и больше — при питании только силовой нагрузки.

Необходимо отметить, что боязнь более глубокого понижения напряжения на шинах, от которых питается другая нагрузка при редких пусках, ничем не оправдана. При правильной настройке защиты двигателей пуски с глубоким понижением напряжения проходят практически незамеченными. Характерным примером является опыт эксплуатации Азэнерго, где синхронные компенсаторы мощностью 7 500 и 15 000 ква в удаленных сетевых районах пускаются непосредственно от сети с глухо присоединенным возбудителем. Понижение напряжения в сети 6 кв при пуске синхронного компенсатора СК-15000 достигает 30...35% в течение примерно 4,4 сек; при этом все потребители работают без отключений.

Если прямой пуск по условиям воздействия на сеть оказывается все же недопустимым, то в первую очередь нужно рассмотреть возможность применения реакторного пуска или для крупных двигателей использование отдельного трансформатора.

Мощность трансформатора выбирается, исходя из мощности пускаемого двигателя, частоты пусков, их длительности и кратности пускового тока [Л. 4].

Длительный опыт эксплуатации подобных схем пуска, применяемых на ряде предприятий, показал их высокую надежность. Применение автотрансформаторного пуска ограничивается исключительными случаями, когда при реактор-

ном пуске по условиям воздействия на сеть напряжение на выводах двигателя получается таким, что пусковой момент оказывается недостаточным, а применение блок-трансформатора по каким-либо причинам не представляется возможным.

Пуск синхронных двигателей с глухо присоединенным возбудителем. Несмотря на положительный и длительный опыт эксплуатации синхронных двигателей, пуск которых осуществляется с глухо присоединенным возбудителем, внедрение схем с глухо присоединенным возбудителем из-за укореившегося мнения, что к синхронным двигателям должен быть особый подход, происходит пока медленно.

Схема пуска с глухо присоединенным возбудителем настолько проста, что становится аналогичной схеме управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. В таких схемах реостат возбуждения всегда остается в рабочем положении, а возбуждение двигателя может осуществляться как от возбудителя, приводимого во вращение от вала того же двигателя, так и от отдельно стоящего возбудительного агрегата. Схемы с глухо присоединенным возбудителем неприменимы только при условии использования одного возбудителя для нескольких синхронных двигателей.

Допустимость пуска с глухо присоединенным возбудителем определяется характеристиками двигателя и приводимого механизма.

Пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора, величина среднего асинхронного момента в относительных единицах может быть определена по следующей формуле [Л. 5]:

$$m = \frac{U^2}{2} \left[\frac{x_d - x'_d}{x_d x'_d} \cdot \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} + \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} \times \right. \\ \left. \times \frac{sT''_d}{1 + (sT''_d)^2} + \frac{x_q - x'_q}{x_q x'_q} \cdot \frac{sT''_q}{1 + (sT''_q)^2} \right]. \quad (1)$$

Первая составляющая момента, обусловленная изменением общего потока контуров ротора по продольной оси, в значительной степени зависит от способа соединения обмотки ротора. Постоянная времени обмотки возбуждения определяется из выражения

$$T'_d = \frac{x_{fs} + x_{ad}}{r_f} \cdot \frac{x'_d}{x_d},$$

где x_{fs} — реактивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;

x_{ad} — реактивное сопротивление реакции якоря;

$r_f = \left(\frac{r_{pc}}{r_{fo}} + 1 \right) r_{fo}$ — приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора с учетом величины дополнительного сопротивления r_{pc} .

С введением сопротивления в цепь обмотки возбуждения происходит уменьшение постоян-

ной времени T'_d . Это вызывает смещение максимального значения составляющей момента в сторону больших скольжений, так как критическое скольжение определяется из выражения

$$s'_m = \frac{1}{T'_d}$$

На рис. 2 приведены кривые асинхронных моментов, построенные по формуле (1) для синхронного двигателя СМВ-19А-7-16, 6 кв, 1 610 квт, 1 200 квт, 375 об/мин с обмоткой ротора, замкнутой на сопротивление (кривая 1) и закороченной (кривая 2), и для двигателя ВДС-213/34-12, 6,3 кв, 2 000 квт, 1 700 квт, 500 об/мин (соответственно кривые 1' и 2').

На рис. 3 приведены кривые этих моментов (кривые 1 и 2) и их составляющие при скольжениях, близких к вхождению в синхронизм. Составляющая момента, обусловленная изменением общего потока контуров ротора при введенном сопротивлении в обмотку ротора, иллюстрируется кривой 3 и при закороченной обмотке ротора — кривой 4.

Другие две составляющие асинхронного момента, обусловленные рассеянием между контурами ротора по продольной и поперечной осям, практически не зависят от сопротивления, введенного в обмотку ротора, и остаются неизменными (соответственно кривые 5 и 6, рис. 3). Составляющая асинхронного момента, обусловленная изменением общего потока контуров ротора, при закорачивании обмотки ротора в машинах с высокими значениями активного сопротивления пусковой обмотки смещается больше в сторону малых скольжений. Поэтому у машин с высоким начальным моментом по отношению к максимальному при пуске с глухо присоединенным возбудителем наблюдается провал в кривой момента при скоростях, близких к синхронным (кривая 2, рис. 3,а). У двигателей с высокими входными характеристиками (кривая 2, рис. 3,б) провал в кривой момента при скоростях, близких к синхронным, отсутствует, что позволяет применять их в условиях пуска с полной нагрузкой. Стоимость изготовления таких двигателей практически такая же, как и двигателей с высоким начальным моментом.

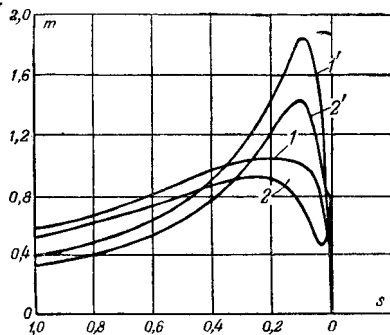


Рис. 2. Зависимость асинхронного момента от скольжения двигателя СМВ-19А-7-16 (кривые 1 и 2) и ВДС-213/34-12 (кривые 1' и 2').

1 и 1' — при замкнутой обмотке ротора на сопротивление;
2 и 2' — при закороченной обмотке ротора.

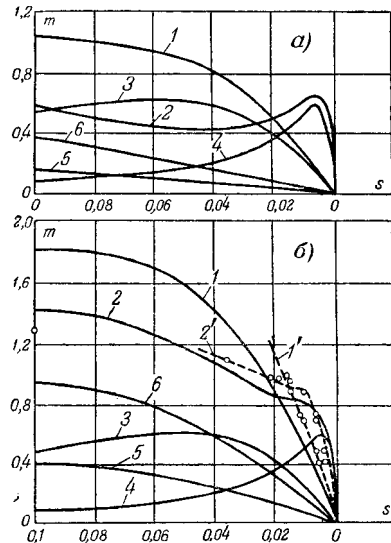


Рис. 3. Зависимость асинхронного момента от скольжения двигателя СМВ-19А-7-16 (а) и ВДС-213/34-12 (б).

На рис. 3,б одновременно с расчетными кривыми приведены кривые момента, полученные из опыта работы двигателя в асинхронном режиме при введенном сопротивлении в обмотку ротора (кривая 1') и при закороченной обмотке ротора (кривая 2'). Некоторое несоответствие расчетных и опытных точек момента объясняется несоответствием расчетных параметров двигателей опытным, особенно в части определения постоянных времени.

В случае необходимости асинхронная характеристика при больших скольжениях может быть также улучшена путем устройства двух пусковых обмоток, что находит распространение в синхронных двигателях, применяемых для металлургической промышленности ряда зарубежных стран [Л. 6].

Кроме параметров самого двигателя, некоторое влияние на пуск с глухо присоединенным возбудителем имеет наличие тока возбуждения в этом режиме. Преждевременное появление тока возбуждения сопровождается возникновением тормозного момента, ухудшающим пусковую характеристику. На рис. 3,б в качестве примера приведена опытная точка результирующего среднего асинхронного момента при работе двигателя с форсированным возбуждением при скольжении 10%.

При пуске синхронного двигателя с возбудителем на валу или с возбудителем отдельно стоящего агрегата возбуждения напряжение возбуждения нарастает довольно медленно. На рис. 4 приведены кривые изменения напряжения возбуждения и скорости синхронного двигателя ВДС-213/34-12 при пуске с возбудителем ВВС-55/14-6. На рис. 5 приведены аналогичные кривые при пуске синхронного двигателя типа ДСК (или ДСКП) с возбудителем ПН-290 отдельно стоящего агрегата возбуждения.

Из рассмотрения кривых, видно, что нарастание скорости двигателей происходит значительно быстрее нарастания напряжения возбуждения.

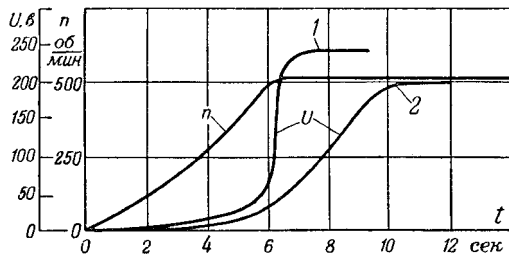


Рис. 4. Изменение напряжения возбуждения и скорости синхронного двигателя ВДС-213/34-12 при пуске с возбудителем ВВС-55/14-6.

1 — при форсировании возбуждения; 2 — при рабочем положении реостата возбуждения.

Это имеет место в подавляющем большинстве случаев прямого пуска.

Приведенные кривые указывают на допустимость применения простых схем пуска и для тихоходных двигателей (например, типа ДСК или ДСКП) поршневых компрессоров.

Проведенные многочисленные исследования и многолетний опыт эксплуатации большого числа синхронных двигателей, пускаемых с глухо присоединенным возбудителем как на валу двигателя, так и отдельно установленного агрегата возбуждения, подтверждают надежность и целесообразность широкого внедрения таких схем пуска в эксплуатацию. Никаких нарушений в работе глухо присоединенных возбудителей (размагничивание, искрение и т. п.) не отмечалось.

Самозапуск. После прекращения питания, вызванного короткими замыканиями, или с переходом на другой источник питания все двигатели затормаживаются. После восстановления питания двигатели, не отключенные защитой от сети, начинают увеличивать скорость, и режим работы механизмов автоматически восстанавливается. Поэтому надежность работы предприятия определяется не столько непрерывностью электроснабжения, сколько обеспечением бесперебойности технологического процесса при кратковременных перерывах питания. Длительность перерыва питания при коротких замыканиях обычно невелика и может достигать 1 сек, а перерывы питания, вызванные действием АПВ или АВР, — до 3 сек. Необходимо учитывать, что чем больше длительность перерыва питания, тем труднее происходит восстановление режима и тем более вероятны нарушения или ограничения технологического процесса. Поэтому во всех случаях нужно стремиться к максимальному ускорению действия защит, отключающих поврежденные участки.

Длительный опыт применения самозапуска на механизмах собственных нужд электростанций (насосы, вентиляторы, дробилки и т. п.) и промышленных предприятий (компрессоры, триплекс-насосы, жернова, двигатель-генераторы электролизных установок и т. п.) указывает на несостоятельность возражений некоторых специалистов в том, что самозапуск вреден для механизмов и технологических процессов. При быстром восстановлении питания, правильном выборе числа двигателей, участвующих в самозапуске, и правиль-

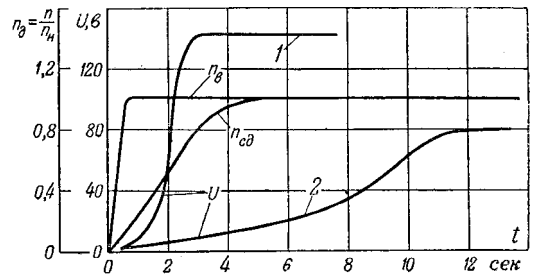


Рис. 5. Изменение напряжения возбуждения и скорости синхронного двигателя типа ДСК (или ДСКП) при пуске с возбудителем ПН-290.

1 — при форсировании возбуждения; 2 — при рабочем положении реостата возбуждения; $n_{сд}$ и $n_{в}$ — скорости вращения синхронного двигателя и возбудителя.

ной настройке защиты двигателей нарушения технологического процесса исключаются.

Рассмотрение поведения асинхронных двигателей с короткозамкнутыми и фазными роторами при самозапуске позволяет считать, что перерыв питания и последующий самозапуск не вызывают как динамических повреждений при протекании пусковых токов, так и повреждений вследствие перегрева обмоток. Исключения могут составлять случаи неправильного выбора мощности неотключаемых двигателей.

Рекомендуемые соотношения мощностей двигателей и трансформаторов [Л. 8], при которых обеспечивается самозапуск полностью нагруженных двигателей, даны с условием, что напряжение при самозапуске уменьшается не ниже $0,7 U_n$. В реальных условиях, как показали последние испытания на собственных нуждах электростанций, проведенных ОргрЭС и энергосистемами [Л. 9], средняя нагрузка двигателей ниже номинальной. Кроме того, менее нагруженные механизмы заканчивают восстановление режима быстрее, обеспечивая повышение напряжения для двигателей с более тяжелыми условиями пуска. Это позволяет повысить мощность неотключаемых двигателей и несколько понизить допустимое остаточное напряжение [Л. 10].

Для обеспечения самозапуска двигателей наиболее ответственных механизмов промышленных предприятий до накопления опыта эксплуатации, отношение их суммарной мощности к мощности трансформатора не должно превышать значений в табл. 1, приведенных с учетом, что напряжение при самозапуске уменьшается не ниже $0,7 U_n$.

Однако, если число подключенных двигателей строго ограничено и нагрузка их ниже номинальной, то напряжение самозапуска может быть понижено. Чтобы учесть нагрузку двигателей и допустимое остаточное напряжение, значение

Таблица 1

U_k трансформаторов, %	8	10	15
$\frac{P_n}{S_n}$ двигателей трансформатора, %	120	100	70

Таблица 2

Данные двигателя	Приводимый механизм	Средняя нагрузка на валу в долях номинальной	Ток статора в долях номинального		Напряжение сети в долях номинального	Скольжение, %	
			максимум	минимум			
ВДС-213/34-12, 6,3 кв, 2 000 ква, 1 700 квт, 184 а, 500 об/мин	Насос	0,88	1,7	1,1	0,81	3,6	Обмотка ротора замкнута
		0,88	2,5	1,0	0,81	3,7	С рабочим возбуждением
		0,88	4,2	1,3	0,73	10	С форсированием возбуждения
СМВ-19А-7-16, 3 кв, 1 610 ква, 1 200 квт, 310 а, 375 об/мин	Насос	0,96	2,2	1,4	0,96	3,1	Обмотка ротора замкнута на сопротивление
		0,96	3,7	1,8	0,94	7,5	С рабочим возбуждением
		0,96	6,1	0,8	0,87	14,0	С форсированием возбуждения
ДСКП-260/34-36, 6 кв, 930 ква, 780 квт, 9,5 а, 167 об/мин	Компрессор	0,80	2,4	1,5	0,98	6,0	Обмотка ротора замкнута на сопротивление
		0,88	5,2	1,6	0,98	19,0	С рабочим возбуждением
		0,88	6,8	1,1	0,98	35	С форсированием возбуждения
СМ-3000-500, 6 кв, 3 060 ква, 2 437 квт, 500 об/мин	Насос	0,67	2,6	1,8	0,85	2,8	Обмотка ротора замкнута на сопротивление
		0,65	3,5	1,2	0,7	13	С форсированием возбуждения

$\frac{P_n}{S_n}$, приведенное в табл. 2, должно быть умножено на коэффициент $c = \frac{70}{U\sqrt{k_3}}$, где U — допустимое напряжение самозапуска, в % номинального (не ниже 55%); k_3 — средний коэффициент загрузки двигателей, участвующих в самозапуске.

Выбор более низкой ступени напряжения самозапуска (в случае, если мощность неотключаемых двигателей превышает допустимую при $0,7U_n$) должен производиться, исходя из максимально допустимой длительности самозапуска, равной 30 сек.

Самозапуск с синхронным приводом имеет некоторые особенности. Перерыв в электроснабжении сопровождается выходом двигателя из синхронизма. На рис. 6 приведены графики изменения угла механизмов при выбеге. Следует отметить, что в случае группового выбега (при действии АПВ или переходе на другой источник питания) все механизмы как с синхронным, так и с асинхронным приводом длительное время выбегают синхронно с усредненной скоростью [Л. 7]. Однако, если электроснабжение восстанавливается за время менее 0,5 сек, то синхронный режим работы, как правило, не нарушается. В тех случаях, когда перерыв в электроснабжении превышает 0,5 сек, нагруженные синхронные двигатели

после восстановления возбуждения переходят в асинхронный режим. Если при этом момент, развиваемый двигателем, достаточно большой и скорость увеличивается до скольжения, при котором обеспечивается входение в синхронизм, то двигатель плавно втягивается в синхронизм и режим восстанавливается. Большую помощь здесь оказывает форсирование возбуждения. Если асинхронный момент недостаточен (например, вследствие наличия провала в кривой момента или вследствие слишком низкого напряжения при восстановлении), то двигатель продолжает работать несинхронно. Следует иметь в виду, что напряжение при восстановлении для обеспечения надежной ресинхронизации должно быть выше, чем для асинхронных двигателей [не ниже $(0,7 \dots 0,85)U_n$]*.

При несинхронной работе с возбуждением средний асинхронный момент уменьшается, как и в случае пуска при наличии тока возбуждения, и агрегат теряет скорость обычно на 10...15%. При этом появляющийся в роторе переменный ток, имеющий частоту скольжения, накладывает на постоянный ток и вызывает значительные колебания тока статора и мощности.

* По материалам научно-технического совещания по выбору схем электроснабжения промпредприятий, проведенного в Баку в 1954 г. Электричество, № 1, 1955.

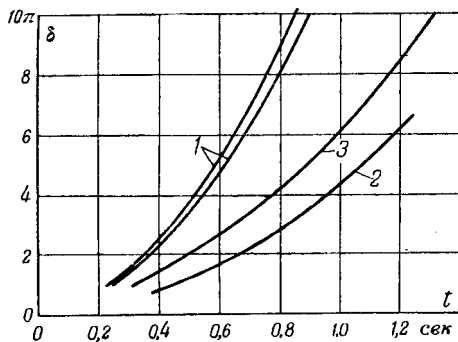


Рис. 6. Изменение угла механизмов при выбеге.

1 — центробежных насосов; 2 — турбокомпрессора;
3 — механизмов собственных нужд.

В табл. 2 приведены некоторые сведения о колебаниях тока статора при работе синхронных двигателей в асинхронном режиме.

В некоторых случаях для обеспечения вхождения синхронных двигателей в синхронизм бывает достаточно осуществить форсирование возбуждения; в других — применить схему ресинхронизации и, наконец, у двигателей с малым асинхронным моментом при скоростях, близких к синхронным, необходимо осуществлять автоматическую разгрузку механизма.

Схема ресинхронизации должна работать в следующей последовательности: отключается АГП (обмотка ротора замыкается на разрядное сопротивление или последнее вводится в цепь), осуществляется форсирование возбуждения, через 3 ... 5 сек включается АГП и спустя еще 1 ... 3 сек прекращается форсирование возбуждения.

Дополнительного усложнения схемы в части выбора момента включения АГП в зависимости от положения ротора в поле статора, как правило, не требуется. Выигрыш при благоприятном моменте включения получается незначительным и не превышает обычно 20% по моменту. Форсирование возбуждения оказывает значительно большую помощь в обеспечении втягивания двигателя в синхронизм; при двукратном потолочном напряжении синхронный момент возрастает до номинального за время порядка 0,3 сек.

Если применение схемы ресинхронизации связано с трудностями (значительное усложнение автоматики), то рекомендуется выявить с технологами возможность останова механизма и автоматического пуска по существующей схеме.

Процесс восстановления синхронизма для двух синхронных двигателей типа ВДС-213/34-12, участвующих в самозапуске при действии АПВ, приведен на рис. 7. Несмотря на различную нагрузку, выбег двигателей происходил синхронно. После подачи возбуждения менее загруженный двигатель (№ 1) втянулся в синхронизм раньше. Отсутствие провала в кривой момента обеспечило надежное вхождение в синхронизм при наличии форсировки возбуждения.

Для обеспечения вхождения в синхронизм двигателей, имеющих глубокие провалы в кривой асинхронного момента, необходимо применение схемы ресинхронизации или автоматического повторного пуска. Применение соответствующей схемы часто определяется приводимым механизмом и влиянием на технологический процесс. Так, например, для насосных агрегатов целесообразно изменять схему ресинхронизации, что позволяет избежать гидравлических ударов. Для компрессоров, обычно допускающих минутные перерывы без нарушения технологии, часто бывает целесообразнее применять схемы автоматического повторного пуска.

В качестве органа, реагирующего на асинхронный ход, можно применять токовое реле ИТ-80 с оперативными цепями, разделенными для зависимой и независимой частей. Зависимая часть при этом может быть настроена на ток трогания $(1,4 \dots 1,5) I_n$.

В тех случаях, когда требуется более чувствительная настройка по току статора (до $1,15 I_n$), можно воспользоваться токовым реле ЭТ-500 в сочетании с кодовым реле и реле времени. Кодовое реле, контакты которого «прилипают» на время 0,6 сек, необходимо для обеспечения срабатывания реле времени после размыкания контактов реле ЭТ-500 при колебаниях тока статора. Реле времени необходимо для отстройки от режима пуска, самозапуска, работы при пониженном напряжении и т. п.

Время действия его должно быть не менее 10 сек.

Для двигателей с низким значением ОКЗ ($x_d > 1,2$), длительная работа которых возможна при нагрузках в пределах $(0,4 \dots 0,8) P_n$, токовые реле могут быть недостаточно чувствительны к асинхронному ходу. В этом случае наиболее эффективным является устройство, реагирующее

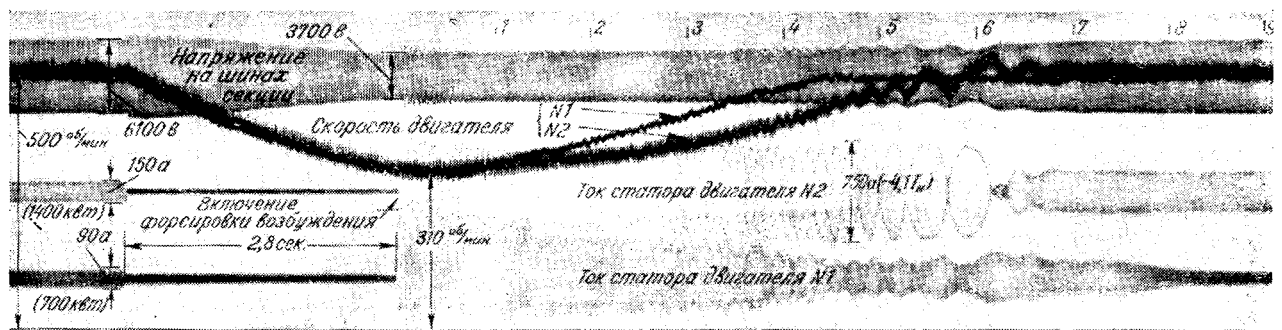


Рис. 7. Осциллограмма самозапуска двух синхронных двигателей ВДС-213/34-12.

на протекание переменного тока в цепи ротора. Таким устройством может являться трансформатор тока, включаемый в цепь ротора в сочетании с токовым реле и реле времени. Величина переменного тока в цепи ротора при работе в асинхронном режиме достигает 0,4 ... 0,5 номинального тока возбуждения при частоте порядка 1 ... 8 *Гц*. Элемент выдержки времени необходим для отстройки от качаний при кратковременных перерывах питания и при пусках.

Подобные схемы, реагирующие на асинхронный ход, должны приводить в действие схему ресинхронизации или автоматического повторного пуска.

Наиболее спорным вопросом применения АПВ для синхронных двигателей является вопрос включения его в сеть при наличии остаточного напряжения. Допустимость такого включения определяется воздействием на двигатель. Следует иметь в виду, что даже для генераторов допускается применение АПВ без контроля синхронизма при работе с полным напряжением, если токи при этом не превышают $5I_n$ [Л. 11]. С величиной остаточного напряжения на двигателях при действии АПВ в течение 2 ... 3 *сек* приходится считаться только для отдельных крупных двигателей, электроснабжение которых осуществляется от мощного источника. Осуществление АПВ группы двигателей сопровождается всегда достаточно глубоким понижением напряжения. Длительный опыт эксплуатации с применением АВР при величине остаточного напряжения на двигателях порядка 70% номинального и при включении в момент, близкий к противофазе, показал, что двигатели и механизмы выдерживают такие включения без каких-либо остаточных деформаций или ухудшения эксплуатационных свойств.

Упрощение защит и правильный выбор уставок. Наибольшее количество неправильных отключений механизмов происходит обычно вследствие применения защиты минимального напряжения без выдержки времени или применения защиты от перегрузки с уставкой по току $1,2I_n$ и малой выдержкой времени даже для тех механизмов, перегрузка которых по технологическому процессу не может иметь места. Кроме того, на многих двигателях устанавливаются дублирующие защиты, как, например, тепловая, от работы в неполнофазном режиме и т. п., которые не обеспечивают повышения надежности работы установки. Очень насыщены ненужными видами защит импортные установки, в которых количество видов защит для высоковольтных синхронных двигателей в отдельных случаях достигает 11. Такие установки требуют привести в соответствие с рекомендуемой практикой [Л. 12].

У двигателей должны быть установлены только те виды защит, которые обеспечивают:

а) быстрое отключение поврежденного двигателя, а именно токовая защита с отсечкой (или дифференциальная) и токовая земляная защита; при этом последняя устанавливается в тех случаях, когда ток замыкания на землю превышает 10 *а*;

б) сигнализацию или отключение при перегрузке (защита устанавливается, если возможна перегрузка по условиям технологии);

в) прекращение асинхронного хода синхронных двигателей с действием на схему ресинхронизации или отключения;

г) отключение двигателя в случае длительного перерыва питания (защита предусматривается для механизмов, самопроизвольный пуск которых недопустим по условиям технологии и техники безопасности, или для обеспечения самозапуска более ответственных механизмов).

Для действия отсечки уставка по току должна быть не ниже 1,2 тока самозапуска и не выше половины значения тока короткого замыкания системы на выводах двигателя. Плавкие вставки низковольтных двигателей должны отключать их раньше, чем отключится магнитный пускатель. Номинальный ток плавкой вставки поэтому должен выбираться порядка $1/25$ тока трехфазного короткого замыкания, но не менее $10I_n$ [Л. 13].

Защита от перегрузки должна быть отстроена по времени от тока самозапуска и работы при пониженном напряжении в сети в случае удаленных коротких замыканий. При выборе уставок по времени необходимо руководствоваться допустимыми аварийными перегрузками в течение 1 *мин* при двойном токе. Выдержка времени таких защит должна быть в пределах 10 ... 30 *сек*.

Для синхронных двигателей наряду с защитой, реагирующей на появление переменного тока в цепи ротора (если таковая установлена), должна быть предусмотрена токовая защита в цепи статора, реагирующая на ток перегрузки при асинхронном ходе. Время выдержки этой защиты должно быть не более 30 *сек*. Для низковольтных двигателей достаточно применять тепловые реле; для высоковольтных — токовые. Реле обрыва поля не обеспечивают надежной защиты от асинхронного хода, так как не действуют при наличии возбуждения и поэтому надобности в них нет. Защита двигателей от произвольного пуска после длительного перерыва питания (например, разгрузка по частоте и т. п.) должна выполняться реле напряжения с выдержкой времени. Выдержка времени должна быть не менее времени, необходимого для полной остановки агрегата. Кроме того, защита минимального напряжения может быть использована для отключения ряда менее ответственных механизмов, чтобы обеспечить самозапуск более ответственных. Выдержка времени защиты для всех синхронных двигателей должна быть не менее 0,5 *сек*.

Для синхронных двигателей необходимо в качестве защиты от выпадения из синхронизма при глубоких понижениях напряжения осуществлять форсирование возбуждения. При осуществлении этого мероприятия обеспечивается синхронная работа двигателей при понижениях напряжения не менее чем до 0,4 U_n . Это мероприятие полезно также и тем, что наличие синхронно работающих двигателей обеспечивает быстрое восстановление напряжения и облегчает условия самозапуска асинхронных двигателей.

Все остальные виды защит являются лишни-

ми, препятствуют нормальной бесперебойной эксплуатации и должны быть демонтированы.

Отдельно следует рассмотреть необходимость применения гашения поля. В отличие от генераторов все синхронные двигатели после отключения от сети уменьшают скорость и останавливаются. Поэтому напряжение на выводах понижается автоматически. В случае обратного хода двигателя возбудитель, приводимый от вала двигателя, не возбуждается, а отдельно стоящие возбудители должны автоматически отключаться с отключением выключателя двигателя. Следует отметить, что и у асинхронных двигателей понижение напряжения после отключения от сети происходит сравнительно медленно (постоянная времени затухания поля достигает у крупных двигателей 2,25 сек).

Исходя из опыта эксплуатации, можно сделать вывод, что нет надобности обеспечивать все синхронные двигатели специальными устройствами для гашения поля. Такие механизмы, как компрессоры, насосы и т. п., останавливаются под нагрузкой очень быстро (5...7 сек), а естественная постоянная времени гашения поля обычно не превышает 2 сек. Только для крупных двигателей с длительным временем выбега механизма следует рассматривать необходимость применения автоматов гашения поля. В подавляющем большинстве случаев гашение поля может быть выполнено только путем включения дополнительных сопротивлений в цепи обмоток возбуждения возбудителей, что значительно упрощает схему.

Выводы. 1. Повышение надежности работы электроприводов промышленных предприятий может быть достигнуто за счет правильной настройки защиты двигателей и элементов сети, упрощения схем пуска и внедрения самозапуска.

2. Первоочередной задачей в повышении надежности работы промышленных предприятий является пересмотр схем защит и уставок реле.

3. Упрощение схем пуска позволяет значительно облегчить решение вопроса применения самозапуска и автоматического повторного включения и тем самым повысить надежность эксплуатации.

Литература

1. И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных двигателей. Госэнергоиздат, 1955.
2. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. Госэнергоиздат, стр. 342, 1949.
3. О применении надежных схем пуска асинхронных и синхронных двигателей и синхронных компенсаторов. Эксплуатационный циркуляр Технического управления МЭС, № 7/Э, 1952 и № 5/54Э, 1954. Электрические станции, № 11, 1952.
4. А. М. Шницер. Нагрузочная способность силовых трансформаторов. Госэнергоиздат, 1953.
5. И. А. Сыромятников. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.
6. W. Thomas. Synchronous Motor Torque Requirements for Steel Mill Applications. Iron and Steel Engineer, № 8, 1953.
7. Повышение надежности работы электродвигателей. Информационные материалы ЦНИЭЛ. № 5, Госэнергоиздат, 1955.
8. Инструкция по эксплуатации электродвигателей в установках собственных нужд электростанций. Госэнергоиздат, 1952.
9. М. Г. Портной и Б. А. Хомутов. Испытания электродвигателей собственных нужд на самозапуск. Электрические станции, № 11, 1954.
10. О самозапуске электродвигателей собственных нужд станций. Эксплуатационный циркуляр Технического управления МЭС, № Э-17/54. Госэнергоиздат, 1954.
11. О применении автоматического повторного включения трансзитных линий передачи без проверки синхронизма. Эксплуатационный циркуляр Технического управления МЭС, № Э-5/55. Госэнергоиздат, 1955.
12. О повышении надежности работы электроустановок потребителей в случаях кратковременных снижений напряжений. Противоаварийный циркуляр Технического управления МЭС, № Э-8/54. Электрические станции, № 12, 1954.
13. Повышение надежности работы защиты электродвигателей собственных нужд на тепловых электростанциях. Эксплуатационный циркуляр Технического управления МЭС, № Э-11/54, Госэнергоиздат, 1954.

[из. 4. 1955]



Расчет токов и напряжений в электроэнергетической системе, питающей несимметричные нагрузки

Доктор техн. наук, проф. Э. А. МЕЕРОВИЧ, кандидат техн. наук В. И. ГОРУШКИН

Энергетический институт АН СССР

Кандидат техн. наук З. Б. ГОЛЕМБО

Теплоэлектроработы МЭС

Современная энергетика выдвинула задачу расчета режима трехфазной системы с несимметричными нагрузками во многих ее пунктах. В частности, необходимость в таком расчете возникает при анализе режима трехфазной системы, питающей контактную сеть железной дороги, электрифицированной на однофазном токе промышленной частоты.

В инженерной практике для упрощения расчетов системы при нарушении симметрии в одном ее пункте получил широкое распространение метод симметричных составляющих [Л. 1]. Однако в случае нарушения симметрии во многих точках электроэнергетической системы для вычисления

токов и напряжений метод симметричных составляющих не дает желаемых упрощений, так как составляющие различных последовательностей оказываются связанными между собой через несимметричную нагрузку [Л. 1, 2 и 4]. Схема замещения такой системы содержит изолирующие трансформаторы, изменяющие фазу э. д. с. на 120°.

Для определения искомых величин (токов или напряжений) всегда можно составить систему линейных алгебраических уравнений [Л. 2, 4 и 7]. Эти уравнения, как известно, решаются в общем виде при помощи определителей. Однако значительный объем вычислительной работы при боль-

шом числе искомых величин вызывает серьезные затруднения. Отказ от метода симметричных составляющих и переход к трехфазной схеме также не дает упрощения, так как в уравнения войдут взаимноиндуктивности фаз элементов системы и э. д. с. фаз вращающихся машин.

При рассмотрении режима работы электроэнергетической системы, питающей большое число однофазных нагрузок, существующие способы расчетов мало приемлемы, даже в случае применения расчетного стола переменного тока. Необходимо такой способ расчета, который имел бы строгое математическое обоснование и вместе с тем был бы достаточно прост и нагляден.

В первой части настоящей статьи излагается метод расчета токов и напряжений в трехфазной системе, питающей несимметричную нагрузку во многих пунктах, основанный на применении метода последовательных приближений. Во второй части приводятся результаты некоторых вычислений, представляющие самостоятельный интерес.

Методика расчета. Рассматриваемая электроэнергетическая система с однофазными нагрузками делится на две части: симметричную трехфазную сеть с симметричной нагрузкой и генераторами и несимметричную часть, состоящую из однофазных нагрузок. Если токи и напряжения в местах соединения двух частей известны, то режим симметричной части легко найти, пользуясь методом симметричных составляющих. Но токи и напряжения в местах соединений зависят от режима и параметров всей системы в целом. Для их определения используется метод последовательных приближений, получивший в последнее время большое распространение для решения технических задач. Задаваясь значениями и фазами токов однофазных нагрузок и заменяя эти нагрузки источниками токов, находим режим системы и напряжения на зажимах источников токов. По полученным напряжениям уточняем токи нагрузок. Затем уточняем напряжения и т. д. до получения желаемой точности¹.

Исходной величиной для расчета является напряжение в местах присоединения несимметричных нагрузок при отсутствии (отсоединении) этих нагрузок, условно называемое в дальнейшем напряжением холостого хода.

Рассмотрим для пояснения метода одноконтурную цепь с постоянной э. д. с. E (рис. 1). Определим ток I в цепи и напряжение U на нагрузке.

Напряжение нагрузки связано с э. д. с. E и током I соотношением

$$U = E - Ir, \quad (1)$$

а ток нагрузки связан с напряжением уравнением

$$I = \frac{U}{r_n}, \quad (2)$$

где r_n — сопротивление нагрузки.

¹ Н. А. Мельников (независимо от авторов настоящей статьи) также предложил использовать метод последовательных приближений для расчета токов и напряжений при несимметричной нагрузке.

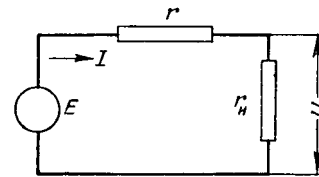


Рис. 1.

Обозначим напряжение холостого хода цепи (рис. 1) через U_1 .

Первое приближение для тока:

$$I_1 = \frac{U_1}{r_n} = \frac{E}{r_n}. \quad (3)$$

Улучшенное значение напряжения

$$U_2 = U_1 - I_1 r. \quad (4)$$

Произведение $I_1 r$ является первой поправкой к напряжению:

$$\Delta U_1 = -I_1 r. \quad (5)$$

По поправке к напряжению (5) вычисляется поправка к току:

$$\Delta I_1 = \frac{\Delta U_1}{r_n} = -E \frac{r}{r_n^2}. \quad (6)$$

Вторая поправка к напряжению

$$\Delta U_2 = -\Delta I_1 r = E \left(\frac{r}{r_n} \right)^2. \quad (7)$$

Для k -той поправки справедливо соотношение

$$\Delta U_k = (-1)^k E \left(\frac{r}{r_n} \right)^k. \quad (8)$$

Поправки убывают, если $\frac{r}{r_n} < 1$; при этом

сумма поправок образует сходящуюся геометрическую прогрессию², а вычисляемые значения токов и напряжений стремятся к искомым решениям.

В качестве первого приближения для тока может быть выбрана любая величина. Это не изменит условий сходимости процесса³.

Укажем, что если бы мы вели расчет по другой схеме, то процесс последовательных приближений мог бы быть расходящимся. Так, при расчете по схеме

$$U_k = I_{k-1} r_n; \quad (1')$$

$$I_k = \frac{E - U_k}{r}, \quad (2')$$

условие $\frac{r}{r_n} < 1$ не является условием сходимости процесса вычислений. Наоборот, сходимость

² Для случая периодической э. д. с. получают аналогичные соотношения. Процесс сходится, если отношение сопротивлений сети z_c и нагрузки z_n удовлетворяет условию

$$\left| \frac{z_c}{z_n} \right| < 1.$$

³ Объем вычислительной работы существенно зависит от удачного выбора первого приближения.

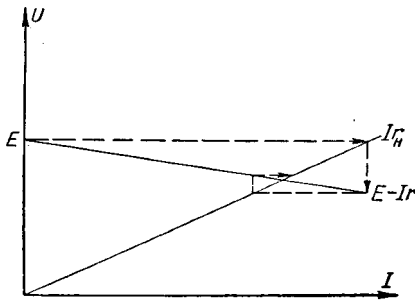


Рис. 2.

обеспечивается при $\frac{r}{r_n} > 1$. Рассмотренный пример показывает, что вопрос о выборе схемы вычислений имеет существенное значение для обеспечения сходимости процесса последовательных приближений.

На рис. 2 дано геометрическое пояснение вычислений для рассматриваемого случая.

Рассмотрим методику расчета на примере разветвленной сети, имеющей нагрузки в нескольких ее пунктах и питаемой э. д. с. одинаковой частоты (рис. 3).

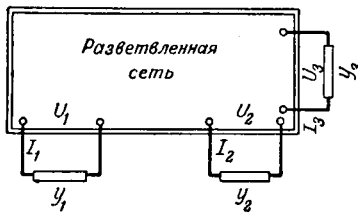


Рис. 3.

Исходными величинами для расчета (первые приближения) являются напряжения в местах присоединения нагрузок, при отсоединенных нагрузках — напряжения холостого хода. По этим напряжениям определяются первые приближения для токов однофазных нагрузок:

$$\| \dot{I} \|_1 = \| \dot{y} \| \cdot \| \dot{U} \|_1, \quad (9)$$

где $\| \dot{I} \|$ — столбцовая матрица токов нагрузок;

$\| \dot{U} \|$ — столбцовая матрица напряжений на зажимах нагрузок;

$\| \dot{y} \|$ — диагональная матрица проводимостей нагрузок.

Однофазные нагрузки заменяются источниками токов, что позволяет найти улучшенное значение напряжений в местах присоединения нагрузок (вторые приближения):

$$\| \dot{U} \|_2 = \| \dot{U} \|_1 - \| \dot{z} \| \cdot \| \dot{I} \|_1, \quad (10)$$

где $\| \dot{z} \|$ — квадратная симметричная матрица сопротивлений сети по отношению к точкам присоединения нагрузок⁴.

⁴ Сопротивления сети определяются из соотношений вида $\dot{z}_{mn} = \dot{U}_m / \dot{I}_n$ при питании сети через зажимы n и условии, что остальные ветви нагрузок разомкнуты, а все э. д. с., действующие в системе, замкнуты [Л. 6]. В дальнейшем сопротивления \dot{z}_{mn} называются взаимными, а сопротивления \dot{z}_{nn} — собственными сопротивлениями системы.

Первые поправки к напряжениям на нагрузках, очевидно, могут быть найдены по формуле

$$\| \Delta \dot{U} \|_1 = - \| \dot{z} \| \cdot \| \dot{I} \|_1 = - \| \dot{z} \| \cdot \| \dot{y} \| \cdot \| \dot{U} \|_1. \quad (11)$$

По первой поправке к напряжению находится первая поправка к току нагрузки, а по поправке к току нагрузки находится следующая поправка к напряжению и т. д.

Вообще

$$\| \Delta \dot{U} \|_k = (-1)^k (\| \dot{z} \| \cdot \| \dot{y} \|)^k \cdot \| \dot{U} \|_1. \quad (12)$$

Каждая последующая поправка отличается от предыдущей множителем $\| \dot{z} \| \cdot \| \dot{y} \|$.

В развернутой форме

$$\| \dot{z} \| \cdot \| \dot{y} \| = \begin{vmatrix} \dot{z}_{11} \dot{y}_1 & \dot{z}_{12} \dot{y}_2 & \dot{z}_{13} \dot{y}_3 \\ \dot{z}_{21} \dot{y}_1 & \dot{z}_{22} \dot{y}_2 & \dot{z}_{23} \dot{y}_3 \\ \dot{z}_{31} \dot{y}_1 & \dot{z}_{32} \dot{y}_2 & \dot{z}_{33} \dot{y}_3 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Условия сходимости такого процесса для системы с действительными коэффициентами хорошо известны (см., например, [Л. 8]).

В случае системы с комплексными коэффициентами необходимые соотношения получаются после перехода к модулям элементов матрицы коэффициентов и к модулям переменных.

Если сумма абсолютных значений элементов матрицы (13) в каждом из ее столбцов в отдельности будет меньше единицы, то поправки будут убывать, а сумма поправок будет стремиться к некоторому пределу⁵.

Иными словами, процесс последовательных приближений будет сходиться к искомому решению, если сопротивление каждой из нагрузок больше, чем сумма абсолютных значений собственного и всех взаимных сопротивлений сети по отношению к точкам присоединения данной нагрузки.

Как и в первом примере, первое приближение для тока может быть выбрано произвольно. Однако первая поправка к напряжению обязательно должна вычитаться из напряжений холостого хода.

Заметим, что расчет по описанной выше схеме возможен при любом другом способе задания нагрузки. Нагрузка может быть задана своей мощностью, током (как при расчетах тяговых сетей), в виде нелинейной функции напряжения и т. п. Это определит способ вычисления тока при найденном на предыдущей ступени расчета напряжении на зажимах нагрузки, но не изменит схемы вычислений в целом.

Общее доказательство сходимости процесса последовательных приближений в нелинейной системе отсутствует, но выполненные авторами практические расчеты всегда быстро приводили к искомому решению.

Расчет трехфазной системы с однофазными нагрузками в различных точках ее не имеет принципиальных отличий от рассмотренного выше случая. Однако схема расчета несколько усложняется.

⁵ Для силовых сетей это условие выполняется для всех режимов, кроме аварийных.

Для расчета соотношений между токами и напряжениями в сети⁶ следует пользоваться методом симметричных составляющих. Для определения токов однофазных нагрузок можно перейти к фазным или линейным напряжениям. Однако удобнее сразу же по симметричным составляющим напряжений находить симметричные составляющие токов несимметричной нагрузки⁷.

Ограничимся случаем присоединения однофазных нагрузок к линейным проводам сети (рис. 4). Следует отметить, что при таком соединении отсутствуют токи нулевой последовательности.

Обозначим:

$\dot{U}^{(1)}, \dot{U}^{(2)}$ — симметричные составляющие напряжений в месте присоединения нагрузки;

$\dot{U}^{(a)}, \dot{U}^{(b)}, \dot{U}^{(c)}$ — напряжения линейных проводов по отношению к нулевой точке;

$i^{(a)}, i^{(b)}, i^{(c)}$ — токи в линейных проводах;

$i^{(ab)}, i^{(bc)}, i^{(ca)}$ — токи нагрузки;

$y^{(ab)}, y^{(bc)}, y^{(ca)}$ — проводимости ветвей нагрузки.

Симметричные составляющие линейных токов связаны с токами в линейных проводах известными соотношениями [Л. 1]:

$$\left. \begin{aligned} i^{(0)} &= \frac{1}{3}(i^{(a)} + i^{(b)} + i^{(c)}); \\ i^{(1)} &= \frac{1}{3}(i^{(a)} + a i^{(b)} + a^2 i^{(c)}); \\ i^{(2)} &= \frac{1}{3}(i^{(a)} + a^2 i^{(b)} + a i^{(c)}). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Токи в линейных проводах (рис. 4) определяются из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} i^{(a)} &= i^{(ab)} - i^{(ca)} = (\dot{U}^{(a)} - \dot{U}^{(b)}) y^{(ab)} - \\ &\quad - (\dot{U}^{(c)} - \dot{U}^{(a)}) y^{(ca)}; \\ i^{(b)} &= i^{(bc)} - i^{(ab)} = (\dot{U}^{(b)} - \dot{U}^{(c)}) y^{(bc)} - \\ &\quad - (\dot{U}^{(a)} - \dot{U}^{(b)}) y^{(ab)}; \\ i^{(c)} &= i^{(ca)} - i^{(bc)} = (\dot{U}^{(c)} - \dot{U}^{(a)}) y^{(ca)} - \\ &\quad - (\dot{U}^{(b)} - \dot{U}^{(c)}) y^{(bc)}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Выражая напряжения $\dot{U}^{(a)}, \dot{U}^{(b)}, \dot{U}^{(c)}$ через симметричные составляющие и пользуясь уравнениями (14) и (15), получаем уравнения, связывающие токи и напряжения различных последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} i^{(1)} &= \dot{Y}^{(0)} \dot{U}^{(1)} - \dot{Y}^{(2)} \dot{U}^{(2)}; \\ i^{(2)} &= -\dot{Y}^{(1)} \dot{U}^{(1)} + \dot{Y}^{(0)} \dot{U}^{(2)}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}^{(0)} &= y^{(bc)} + y^{(ca)} + y^{(ab)}; \\ \dot{Y}^{(1)} &= y^{(bc)} + a y^{(ca)} + a^2 y^{(ab)}; \\ \dot{Y}^{(2)} &= y^{(bc)} + a^2 y^{(ca)} + a y^{(ab)}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

⁶ Трехфазную симметричную сеть вместе с трехфазными симметричными нагрузками будем называть сетью.

⁷ В дальнейшем однофазные нагрузки будем называть нагрузкой.

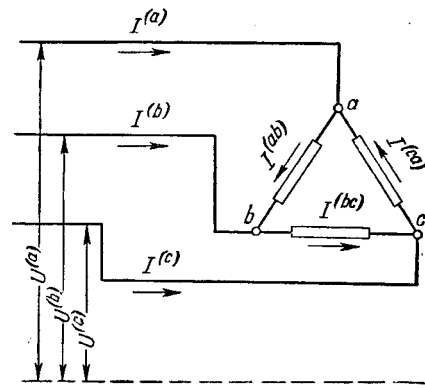


Рис. 4.

Можно показать, что и при такой схеме расчета условием сходимости процесса является требование малости сопротивления сети по отношению к сопротивлениям нагрузок. В случае силовых сетей это условие выполняется во всех режимах, кроме аварийных⁸.

Вычисления можно вести в следующем порядке:

1. Составить схемы прямой и отдельно обратной последовательности сети. В схему включаются симметричные нагрузки. В схемах должны быть выделены пункты присоединения несимметричных нагрузок, но сами несимметричные нагрузки в схему не входят.

2. Найти все собственные и взаимные сопротивления схем прямой и обратной последовательности по отношению к точкам присоединения нагрузок. Собственное сопротивление равно отношению напряжения к току в данном пункте при питании схемы из этого пункта и отсутствии других источников.

Взаимное сопротивление \dot{z}_{mn} равно отношению напряжения в пункте m к току в пункте n при питании схемы из пункта n и отсутствии других источников питания.

3. Найти проводимость нагрузок по формулам (17).

4. Найти напряжения холостого хода прямой и обратной последовательности в пунктах присоединения нагрузок.

Под холостым ходом здесь понимается режим системы при заданных э. д. с. генераторов и отсоединенных несимметричных нагрузках.

Полученные таким способом напряжения являются исходными для расчета независимо от выбора первого приближения для токов.

5. Найти по формулам (16) токи прямой и обратной последовательности, обусловленные присоединением несимметричных нагрузок. В качестве первого приближения можно взять токи, получающиеся при подстановке в формулы (16) напряжений холостого хода. Отметим, что от удачного выбора первого приближения для тока

⁸ Полный анализ условий сходимости при расчете с применением метода симметричных составляющих рассмотрен авторами в другой работе.

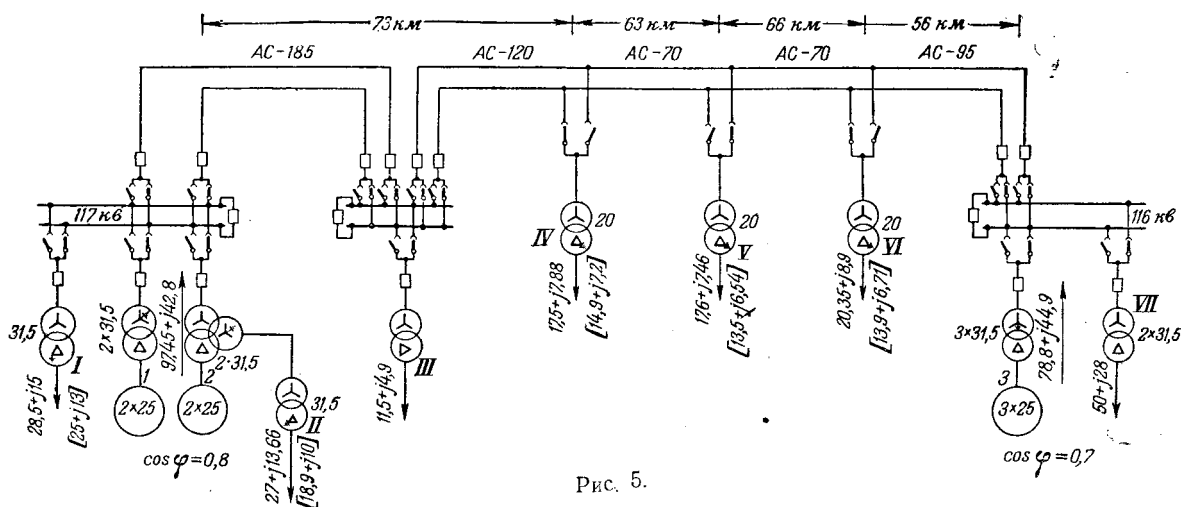


Рис. 5.

зависит число необходимых уточнений. Хороший результат дает выбор первых приближений для токов по величине напряжений в условиях симметричной нагрузки сети на полную заданную мощность.

6. Найти по формуле (10) улучшенные значения напряжений в схеме прямой и, отдельно, в схеме обратной последовательности.

7. Подставив в формулы (16) улучшенные значения напряжений (см. п. 6), найти улучшенные значения токов прямой и обратной последовательности.

8. Подставляя в формулу (10) токи, найденные согласно п. 7, определяют новые улучшенные значения напряжений прямой и обратной последовательности.

Далее, процесс повторяется до получения желаемой точности.

Если характеристики нагрузок нелинейны, то для вычисления токов нагрузок надо (вместо подстановки симметричных составляющих напряжений в формулы (16), пп. 5 и 7) переходить к фазным или линейным напряжениям, вычислять фазные и линейные токи, а затем опять переходить к симметричным составляющим токов.

Пример расчета. В качестве примера использования изложенной методики ниже дается расчет асимметрии токов и напряжений в электро-системе, питающей контактную сеть железной дороги, работающей на однофазном токе нормальной частоты. Приводятся данные лишь для одного из возможных режимов. Влияние асимметрии напряжения и тока на генераторы и приемники не рассматривается.

Расчет велся для участка железной дороги протяженностью около 260 км, контактная сеть которого питается от пяти тяговых подстанций (рис. 5). Общая нагрузка энергосистемы, питающей промышленную, бытовую и тяговую нагрузку, составляет 176 тыс. кВт, 88 тыс. квар. Тяговая нагрузка составляет 49% активной и 49,5% реактивной мощности⁹.

⁹ Пример взят из работы, выполненной Энергетическим институтом АН СССР при участии Теплоэлектропроекта. Схемы питания разработаны Теплоэлектропроектом.

Схема питания контактной сети дана на рис. 6.

Режим генерирующих станций и холостой ход. Генераторы были замещены индуктивными сопротивлениями. Предполагалось, что э. д. с. за переходными индуктивными сопротивлениями генераторов в несимметричном режиме имеют то же значение, что и в симметричном режиме при той же мощности. Это следует из того, что токи обратной последовательности замыкаются в генераторе через сопротивление обратной последовательности, которое приблизительно равно переходному сопротивлению. Величина и фаза э. д. с. определялись по заданным напряжениям и мощностям, причем все нагрузки предполагались симметричными. В дальнейшем этот расчетный режим будет условно называться симметричным режимом. Расчетная схема была собрана на расчетном столе переменного тока ЭНИН Академии наук СССР. Результаты измерений даны в табл. 1.

Таблица 1

Напряжение, кВ	Номер подстанции	I	II	III	IV	V	VI	VIII
		при симметричном режиме . .	110,8	107	111,8	105,9	104,8	106,5
при холостом ходе		128	125	122,5	125,8	122,5	120,7	122

Второй этап расчета — определение напряжений на вторичной стороне тяговых подстанций при отсоединенных тяговых нагрузках. Этот режим условно называется режимом холостого хода. Симметричные нагрузки замещались эквивалентными сопротивлениями. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Определение собственных и взаимных сопротивлений сети. Для определения собственных и взаимных сопротивлений составляем отдельно схемы прямой и обратной последовательностей при отсоединенных тяговых нагрузках. Симмет-

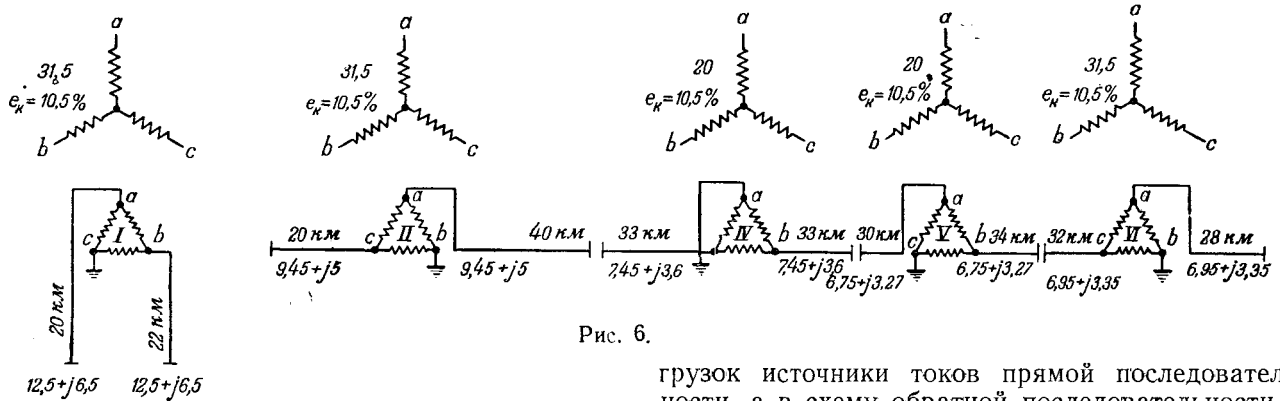


Рис. 6.

ричные нагрузки в этих схемах замещаются собственными сопротивлениями прямой и обратной последовательности.

При подсчетах сопротивлений обратной последовательности симметричных нагрузок было принято, что осветительная нагрузка составляет 30, а двигательная — 70% активной мощности. Оказалось, что эквивалентные сопротивления обратной последовательности носят в основном индуктивный характер, поэтому в дальнейших подсчетах в схемах обратной последовательности симметричные нагрузки замещались соответствующими индуктивными сопротивлениями. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Асимметрия напряжений на стороне низшего напряжения подстанций. Распределение тяговой нагрузки дано на рис. 6.

Расчет велся в предположении, что тяговую нагрузку можно заменить постоянной проводимостью. Токи прямой и обратной последовательности тяговых нагрузок находились по формулам (16). Напряжения в системе при заданных токах прямой и обратной последовательности определялись по формуле (10). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Когда задан ток электровозов, а вся тяговая нагрузка сосредоточена в конце участка, получаются приблизительно те же результаты, что и при заданных проводимостях (табл. 3).

Учитывая, что расчетная схема получается проще при постоянстве проводимостей ветвей нагрузок, можно не вносить уточнений, связанных с постоянством тока и положением электровозов на участке. При расчетах практически можно ограничиться вторым приближением.

Асимметрия напряжений на стороне низшего напряжения подстанций при двустороннем питании контактной сети. Подробный расчет показал, что случай двустороннего питания приводится к случаю одностороннего питания путем распределения тяговой нагрузки между подстанциями на концах участка обратно пропорционально расстояниям электровозов от этих подстанций. Уравнительного тока, вызванного разницей в напряжениях на подстанциях, можно не учитывать.

Асимметрия токов генераторов. Для определения токов генераторов надо предварительно вычислить токи прямой и обратной последовательности нагрузок. Включая в схему прямой последовательности сети вместо несимметричных на-

грузок источники токов прямой последовательности, а в схему обратной последовательности — источники токов обратной последовательности,

Таблица 2

Собственные и взаимные сопротивления
1. Прямая последовательность

Номер подстанции		I	II	IV	V	VI
I	Модуль	64,4	14,7	18,7	14,5	10,6
	Аргумент	82°	73°	75°45'	79°30'	87°
II	Модуль	14,7	98	11,9	9,33	6,77
	Аргумент	73°	82°	73°30'	77°	86°
IV	Модуль	18,7	11,9	103	16,55	19,25
	Аргумент	75°45'	73°30'	77°	76°	75°45'
V	Модуль	14,5	9,33	16,55	110	16,6
	Аргумент	79°30'	77°	76°	72°	76°30'
VI	Модуль	10,6	6,77	19,25	16,6	81,6
	Аргумент	87°	86°	75°45'	76°30'	72°

2. Обратная последовательность

Номер подстанции		I	II	IV	V	VI
I	Модуль	62	12,82	17,05	12,3	8,95
	Аргумент	83°	77°30'	78°45'	86°	95°
II	Модуль	12,82	91	10,12	7,47	5,48
	Аргумент	77°30'	84°	78°30'	85°30'	95°
IV	Модуль	17,05	10,12	99	13,9	16,5
	Аргумент	78°45'	78°30'	78°	83°	81°
V	Модуль	12,3	7,47	13,9	100	13,7
	Аргумент	86°	85°30'	83°	75°	85°
VI	Модуль	8,95	5,48	16,5	13,7	75,4
	Аргумент	95°	95°	81°	85°	75°

Таблица 3

Номер подстанции	Последовательность	Вторичное напряжение подстанций						Токи на вторичной стороне подстанций					
		При неизменных проводимостях		При неизменном токе (электровоз на подстанции)		При неизменном токе (электровоз на перегоне)		При неизменных проводимостях		При неизменном токе (электровоз на подстанции)		При неизменном токе (электровоз на перегоне)	
		Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент
I	Прямая	107,5	-14°12'	109	-15°50'	109	-15°20'	268	-44°30'	276	-43°	281	-49°
	Обратная	7	-88°	6,8	-84°	6,75	-90°	124	190°10'	122	197°	122	191°
	Коэффициент асимметрии, %	6,5		6,24		6,17		46,2		44,2		43,5	
II	Прямая	106	-16°45'	105	-16°50'	106	16°30'	203	-44°	201	-43°	198	-46°
	Обратная	8,95	-22°	8,55	-14°50'	8,58	-15°20'	110	66°	105	73°	105	72°
	Коэффициент асимметрии, %	8,45		8,15		8,1		54,2		52,3		53	
IV	Прямая	106	-16°18'	104	-16°40'	107	-17°50'	146	-44°	144	-42°	152	-30°
	Обратная	5,5	196°30'	4,66	200°	4,67	194°	72	-52°	72	-42°	72	-46°
	Коэффициент асимметрии, %	5,18		4,39		4,36		49,4		50		47,3	
V	Прямая	103	-17°36'	104	-17°50'	102	-14°	138	-44°	142,5	-42°	142,5	-44°
	Обратная	6,55	80°	6,23	83°30'	6,5	86°40'	62	190°	60	198°	62	197°
	Коэффициент асимметрии, %	6,35		5,98		6,36		45		42,1		43,5	
VI	Прямая	106,3	-17°36'	105	-17°50'	105,5	-17°20'	140,5	-43°	145	-44°30'	144,5	-50°
	Обратная	4,02	-27°	3,8	-26°10'	3,78	-29°20'	69,1	73°	67,2	74°	67,2	72°
	Коэффициент асимметрии, %	3,78		3,62		3,58		49,1		46,4		46,5	

получим расчетные схемы для определения искомым токов генераторов.

В результате измерения на расчетном столе и вычислений получены следующие значения для коэффициентов асимметрии токов генераторов.

Номер генератора	Коэффициент асимметрии токов генераторов, %
1	7,8
2	11,1
3	2,7

Формулы для приближенного определения коэффициента асимметрии напряжений¹⁰. Расчет показал, что ток обратной последовательности на каждой тяговой подстанции почти не зависит от режима других подстанций, а напряжение прямой последовательности не очень отличается от напряжения при симметричной нагрузке. Падение напряжения обратной последовательности складывается из падения напряжения в трансформаторе и падения напряжения в остальной части питающей системы. Однако при подсчете последнего надо учесть выравнивающее действие токов от других подстанций. Коэффициент асимметрии напряжений

$$(z_{\tau} + z_c^{(2)}) \frac{I^{(2)}}{U^{(1)}} > \alpha > z_{\tau} \frac{I^{(2)}}{U^{(1)}}, \quad (18)$$

где z_{τ} — сопротивление короткого замыкания трансформатора;

$z_c^{(2)}$ — собственное сопротивление обратной последовательности системы (без трансформатора) по отношению к месту присоединения данной подстанции.

Для подсчета достаточно вероятного среднего значения коэффициента асимметрии можно пользоваться формулой

$$\alpha \approx \left(z_{\tau} + \frac{z_c^{(2)}}{2} \right) \frac{I^{(2)}}{U^{(1)}}, \quad (19)$$

где $I^{(2)}$ и $U^{(1)}$ находятся приближенно, как указывалось выше.

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать следующие методические выводы.

1. Изложенный в статье метод дает возможность вести расчеты системы при однофазных (несимметричных) нагрузках во многих ее точках.

2. При расчете асимметрии, вызванной тяговой нагрузкой, для упрощения расчета можно нагрузку замещать постоянными сопротивлениями вместо неизменных токов.

3. Случай двустороннего питания контактной сети сводится к случаю одностороннего питания. Поправки на уравнительный ток не вносят прак-

¹⁰ Эта часть работы выполнена В. И. Горушкиным и З. Б. Голембо.

Грозозащита энергосистем¹

Доктор техн. наук, проф. В. В. БУРГСДОРФ

Современные средства грозозащиты энергетических систем были созданы в результате большой многолетней работы научно-исследовательских и учебных институтов, энергетических систем, машино- и аппаратостроительных заводов. Разработка ряда вопросов одновременно в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях обеспечила возможность сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований с данными эксплуатации, что способствовало наиболее полному и всестороннему изучению этой сложной проблемы и быстрейшему разрешению ряда важных ее частей, исследование которых в лаборатории затруднительно или невозможно.

Настойчивая необходимость в исследовании этого круга вопросов выявилась в конце 20-х годов, когда одновременно с интенсивным развитием электрических сетей в стране стало резко расти число аварий грозового характера. Грозовые аварии составили 40% всех аварий в системах. Именно в этот период были развернуты широкие исследования в области защиты электрических сетей от молнии, завершением которых была разработка мероприятий, обеспечивающих необходимую надежность эксплуатации энергосистем.

География грозовой деятельности. Изучение молнии и импульсного разряда. Большое влияние метеорологических условий на поражаемость электрических сетей выявилась при первых же исследованиях молнии, когда со всей остротой встал вопрос о повышенной грозовой аварийности в Донбассе. Это побудило более полно изучить грозовую деятельность в различных районах СССР и составить карты географического распределения гроз.

При помощи гидрометеорологической службы ЭНИН разработал карты числа грозовых дней за год для всей Европейской территории СССР.

¹ Из материалов, представленных к 75-летию журнала «Электричество».

Подробные карты грозовой деятельности Кавказа составил ТНИСГЭИ. Позднее грозовые карты различных районов Советского Союза разрабатывали республиканские академии наук, некоторые научно-исследовательские и проектные организации. Уточненная карта годовой продолжительности гроз для всей территории СССР недавно была составлена ЦНИЭЛ.

Большие работы по изучению импульсного разряда проводились в ВЭИ и ЭНИН. Были изучены фазы лидерного и главного канала, а также влияние неоднородности грунтов на поражаемость. С большим размахом велись ЭНИН работы по изучению молнии в естественных условиях на специальных станциях, а также путем измерений амплитуды и максимальной крутизны токов молнии в опорах линий электропередачи в кооперации с другими организациями. Эти работы позволили выяснить ряд деталей механизма разряда молнии и установить основные параметры токов молнии для целей проектирования грозозащиты. В этой связи следует отметить исследование ТНИСГЭИ гроз и токов молнии в горных условиях, которое выявило факт снижения токов молнии на повышенных отметках. Укажем также на ценные оптические исследования молнии при помощи вращающейся камеры, проведенные Азербайджанской Академией наук.

В целях исследования механизма пробоя и импульсной прочности изоляции были построены крупные генераторы импульсных напряжений (ЛПИ, ЛЭТИ, ВЭИ, ЛЭФИ, ХЭТИ и ЭНИН). Наивысшее напряжение относительно земли — 8 300 кВ — было достигнуто в установке ХЭТИ (1940 г.). Овладение техникой импульсных испытаний и создание совершенных осциллографических установок позволили исследовать импульсную прочность газообразных, жидких и твердых диэлектриков, а также разрядников и аппаратов в целом.

Огромная работа в этой области была произведена ВЭИ, ЛПИ и ЛЭТИ. Были получены необходимые данные для правильной координа-

тически заметных изменений в значениях асимметрии токов и напряжений.

4. Асимметрия токов и напряжений существенно зависит от распределения тяговой нагрузки между фазами подстанций и не зависит от способа питания контактной сети.

5. Асимметрия токов генераторов зависит от распределения нагрузки между подстанциями и должна проверяться при проектировании тяговой сети. Должна также проверяться асимметрия напряжений у потребителей.

6. Расчеты по методу последовательных приближений служат основанием для вывода приближенных формул асимметрии напряжений. Результаты приближенных расчетов всегда можно уточнить, применяя изложенный в статье общий метод.

Литература

1. К. Ф. Вагнер и Р. Л. Эванс. Метод симметричных составляющих. Монография. Госэнергоиздат, 1936.
2. А. Б. Чернин. Короткие замыкания при неполнофазных режимах электрических систем. Монография. Госэнергоиздат, 1952.
3. Н. И. Соколов. Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях. Электричество, № 8, 1949.
4. Г. Т. Адонц. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 9, 1951.
5. Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1946.
6. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. Монография. Госэнергоиздат, 1951.
7. Н. А. Мельников. Метод расчета сложных несимметричных многофазных электрических систем. Труды ВЭИ, вып. 3, Госэнергоиздат, 1954.
8. В. Н. Фадеева. Вычислительные методы линейной алгебры. Монография, 1950.



ции изоляции на подстанциях и проектирования грозозащиты линий. ВЭИ и ЛЭТИ были построены вольт-секундные характеристики для всех основных типов изоляторов, применяемых в СССР. ЛПИ были впервые получены данные по импульсной прочности между стержнями при очень больших искровых промежутках и определены разрядные напряжения для провода против плоскости.

Импульсная прочность древесины, а также комбинированная изоляция фарфор — дерево исследовались в ЛЭТИ и ЛПИ. Были установлены разрядные напряжения для междуфазной изоляции линий 35 и 110 кВ на деревянных опорах, а также общие закономерности разряда по дереву. В разрез с установившимися представлениями было выяснено, что при дожде импульсная прочность комбинированной изоляции не только не падает, но может даже повыситься.

Сооружение линий 400 кВ потребовало экспериментального определения импульсных характеристик гирлянд и аппаратуры 400 кВ, что было успешно выполнено НИИПТ.

Важную теоретическую и экспериментальную работу провели в ЛПИ и ЛЭТИ по изучению закономерностей пробоя искровых промежутков с применением статистического метода. В результате была разрешена задача теоретического определения вольт-секундных характеристик для любой формы волны, т. е. для действительных условий работы изоляции линий и подстанций, где реальная волна может существенно отклоняться от стандартной. Эти исследования получили дальнейшее развитие в ВЭИ.

ЦНИЭЛ исследовал процессы в главном канале. Было установлено значительное повышение градиентов при протекании больших импульсных токов. В целях изучения механизма перехода импульсного перекрытия в дугу короткого замыкания были поставлены оптические и осциллографические исследования процесса распада канала после прохождения импульсного тока и втекания в дугу тока промышленной частоты.

Импульсная корона изучалась ХЭТИ и ЛПИ. На базе опытов ХЭТИ (1940 г.) были впервые получены коэффициенты связи при короне для реальных линий 110 кВ в условиях динамического распространения волны по проводам.

Исследования ЛПИ импульсной короны в условиях статического поля позволили вскрыть физическую сущность этого явления и охарактеризовать верхний возможный диапазон коэффициентов связи. Работы на опытной линии впоследствии подтвердили правильность анализа и дали возможность уточнить коэффициенты связи.

Наиболее широкие экспериментальные исследования затухания волн при импульсной короне были выполнены в СССР в ХЭТИ, что позволило охарактеризовать затухание в зависимости не только от амплитуды, но и от длины волны. Весьма полный теоретический анализ затухания волн с учетом короны, земли и формы волн на протяжении дан в работах ЛПИ. Это исследование сыграло большую роль в выборе длины защищенного подхода.

Импульсная прочность масла, в частности при больших расстояниях между электродами, подробно изучалась ВЭИ, начиная с 30-х годов. Был установлен ряд важных общих закономерностей импульсного пробоя жидкости и получены необходимые расчетные данные, которые в дальнейшем нашли применение при выборе изоляционных расстояний в аппаратах и трансформаторах.

Большой интерес представили исследования механизма импульсного пробоя в жидкости, введенные ЭНИИ, при которых в длинных промежутках был обнаружен лидерный процесс, подобный тому, который имеет место при пробое воздуха.

Зоны защиты молниеотводов и заземления. Уже первые исследования ВЭИ (1930—1931 гг.) позволили установить некоторые принципиальные положения по грозозащите взрывоопасных помещений, а в опытах ЛПИ была доказана правильность представлений равноценности защитного действия одиночного и многократного молниеотвода, что побудило отказаться от общепринятых в то время зон защиты молниеотводами, рекомендованных американскими авторами. Позднее (1936—1938 гг.) ВЭИ разработал методику моделирования при исследовании защитных зон, и тогда впервые были даны формы зон защиты для многократных молниеотводов. По строгости своей методики, тщательности их проведения и практической целесообразности сделанных выводов эти работы следует считать крупнейшим вкладом. Работы были широко использованы в руководящих указаниях по защите от перенапряжений и в многочисленных практических инженерных разработках. Более поздние исследования защитных зон в США (1940—1942 гг.) базировались на методике моделирования, обоснованной ВЭИ. Приняв несколько отличные соотношения между высотами ориентировки лидера и молниеотвода и исследуя разряды из всей опасной области, в США пришли к защитным зонам молниеотводов, практически совпадающим с принятыми в СССР.

Накопившийся опыт по эксплуатации большого количества молниеотводов позволяет утверждать, что принятые в СССР защитные зоны стержневых молниеотводов обеспечивают весьма высокую надежность: случаев прямого поражения молнией защищенной зоны зарегистрировано не было.

По данным эксплуатации линий электропередачи ЦНИЭЛ и ЛПИ определили вероятность поражения проводов при различных защитных углах. Одновременно было показано, что защитные зоны, полученные на моделях, преувеличены. ЦНИЭЛ указал на нецелесообразность применения углов больше 30°; для обеспечения полной надежности следует ориентироваться на углы до 20°.

К систематическому изучению заземлений приступили еще в начале 1930 г. Исследования по установлению коэффициентов использования для различных конструкций заземлителей и сочетаний применяемых электродов как на моделях,

так и в натуре позволили выявить основные закономерности и получить необходимые для практики расчетные коэффициенты (ВЭИ).

ВЭИ, ХЭТИ и некоторые другие организации проводили систематические измерения сопротивлений растекания трубчатых и полосовых заземлителей в различные времена года, а также измерения удельного сопротивления грунтов. Эти работы были обобщены в конкретных рекомендациях для проектирования.

Методику расчета заземлений в широко распространенных неоднородных (слоистых) грунтах дал ТНИСГЭИ. Одновременно был разработан геоэлектрический метод для определения расчетных значений проводимости грунтов без забивки опытных электродов.

В 1939 г. ХЭТИ начал опыты по определению импульсного сопротивления заземлителей в полевых условиях при токах до 8 *ка*. Тщательное проведение этих весьма сложных экспериментов позволило получить обоснованные расчетные параметры для ряда типов сосредоточенных и протяженных заземлителей. В работах ВЭИ была определена пробивная прочность грунта и исследованы импульсные сопротивления заземлений при токах в несколько десятков килоампер. В теоретических работах МЭИ были получены ценные материалы для проектирования протяженных заземлителей, к расчету которых были применены формулы, описывающие распространение волны по длинным линиям.

В результате всех этих исследований были даны конкретные практические рекомендации для расчета заземляющих устройств, более полные, чем опубликованные в иностранных источниках. Разрешение всех этих вопросов позволило применить с достаточной надежностью простые и дешевые конструкции заземлений.

Разрядники. На основе работ ВЭИ (1934—1935 гг.) были созданы и освоены отечественные вентильные разрядники. В 1940—1941 гг. завод «Электроаппарат» при участии ВЭИ выпустил вентильные разрядники, удовлетворявшие основным требованиям энергосистем. ВЭИ были исследованы вопросы электропроводности некоторых видов полупроводников, разработана технология синтеза материалов с ярко выраженной нелинейностью сопротивления и различных видов связующих веществ, а также предложены удачные конструкции искровых промежутков и разрядников. Работы ВЭИ привели к созданию нелинейного материала типа вилит и на его базе — серии унифицированных вентильных разрядников для всего диапазона напряжений 3... 220 *кв*.

В настоящее время построены разрядники для сетей напряжением 400 *кв*.

Все эти типы разрядников успешно освоены заводом «Пролетарий». Выпускаемые сейчас разрядники имеют в целом значительно более низкие вольтамперные характеристики, чем разрядники старых конструкций, и обеспечивают надежную координацию изоляции подстанционной аппаратуры. В силу их высокого вентильного действия они обладают большой пропускной спо-

собностью, вполне удовлетворяющей требованиям при принятых в настоящее время схемах грозозащиты. Большим достоинством этих разрядников является применение в них стандартных элементов и возможность комплектовки разрядников с различными характеристиками.

Кроме унифицированной серии, выпущены специальные разрядники для защиты вращающихся машин с пониженными вольт-секундными и вольтамперными характеристиками. Вилитовые разрядники, изготавливаемые в СССР, безболезненно пропускают токи в несколько десятков килоампер и выдерживают токи молнии в 100... 150 *ка*.

В последнее время обеспечена их повышенная стойкость по отношению к внутренним перенапряжениям ограниченной длительности, возникающим, например, при отключении холостых линий, трансформаторов и т. п. Для предотвращения повреждений разрядников в случае длительных внутренних перенапряжений и при дуговых замыканиях на землю достигнута отстройка от максимальных значений таких перенапряжений путем повышения разрядного напряжения искровых промежутков при переменном токе. Новые конструкции советских вентильных разрядников находятся на уровне современной передовой техники.

Дальнейшие работы должны быть направлены на снижение вольтсекундных характеристик и повышение пропускной способности разрядников без существенного повышения напряжения, что позволит удешевить оборудование, упростить грозозащиту распределительных устройств и повысить ее надежность. Определенные успехи в части улучшения вольтамперных характеристик разрядников достигнуты в последнее время в США.

В отечественных трубчатых разрядниках в качестве газогенерирующего материала используется фибра; для ее упрочнения в разрядниках применяется наружная бакелитовая трубка. По сравнению с американскими, изготавливаемыми целиком из высококачественной фибры, этим разрядникам присущ тот большой недостаток, что они нуждаются в периодической перелакировке наружной поверхности бакелитовой трубки, что очень осложняет их эксплуатацию. Задача выпуска фибры высокого качества для разрядников пока еще не разрешена промышленностью.

Достоинством отечественных трубчатых разрядников являются их более низкие вольт-секундные характеристики, что позволило использовать разрядники для защиты подстанционного оборудования. В конструкции разрядника, предложенной для этой цели Донэнерго, предусмотрен специальный резервуар со стороны закрытого конца, который способствует более интенсивному гашению дуги, что позволило уменьшить внутренний искровой промежуток.

После войны ВЭИ разработал освоенные промышленностью трубчатые разрядники из винилпласта. Эти разрядники не требуют перелакировки наружной поверхности трубок в эксплуатации. Необходимое дутье достигается здесь путем уве-

личения объема воздуха в самой трубке, в силу чего отпадает потребность в специальном резервуаре.

Грозозащита линий электропередачи. В целях выбора рациональных методов защиты линий от молнии был проведен широкий комплексный анализ мероприятий по грозозащите с конкретным учетом их технико-экономической целесообразности, исходя из возможного ущерба в результате поражения линий молнией, что позволило более обоснованно подойти к выбору средств грозозащиты. В настоящее время для защиты от молнии используются: 1) тросы и стержневые молниеотводы; 2) изоляционные и дугогасящие свойства древесины; 3) схемы с изолированной или компенсированной нейтралью; 4) автоматическое повторное включение (трехфазное и однофазное); 5) трубчатые разрядники.

Анализ данных эксплуатации, проведенный в ЦНИЭЛ в содружестве с рядом энергосистем, позволил установить, что, как правило, грозовые перекрытия не приводят к существенным остаточным повреждениям и в 85...100% случаев отключившаяся линия может быть немедленно вновь включена в работу. Последующие — обычно небольшие — ремонты требуются в весьма ограниченном числе случаев. Установление этих важных обстоятельств имело очень большое значение, так как позволило путем применения такого простого и дешевого мероприятия, как АПВ, резко повысить надежность работы сетей. Применение АПВ рекомендуется сейчас для всех типов линий и рассматривается как одно из весьма эффективных средств грозозащиты.

Для применения тросов существенно важно было определить достигаемый уровень грозоупорности и возможное число выключений. МЭИ и ЛПИ разработали удобную методику определения уровней грозоупорности линий, которая учитывает волновое сопротивление опоры, что повышает точность расчетов по сравнению с принятыми за границей. Интересны исследования МЭИ и ВЗЭИ по оценке наведенных перенапряжений. В сочетании с упомянутыми работами ЦНИЭЛ и ЛПИ по определению экранирующего действия тросов они послужили основанием для разработки законченных методов расчета грозоупорности с оценкой возможного числа отключений линий на 100 км и 30 грозовых часов в год. Как показали исследования ЦНИЭЛ, после уточнения некоторых параметров результаты расчетов хорошо согласуются с данными эксплуатации.

При рассмотрении области применения тросов было установлено, что они мало удорожают линии 110...220 кВ на металлических опорах, но существенно увеличивают затраты при деревянных опорах, а также для линий 35 кВ. Эффективность защиты тросами тем выше, чем больше прочность изоляции линии; поэтому при больших рабочих напряжениях легко обеспечивается высокий уровень грозоупорности. Наоборот, при слабой изоляции эффективность тросов существенно снижается. В силу этих обстоятельств защита тросами рекомендуется только для линий 110...220 кВ на металлических опорах, причем большое

внимание уделяется полному использованию их защитных возможностей.

Тщательное соблюдение всех требований — обеспечение низкого импульсного сопротивления заземления (в пределах 10 Ом), использование надежных защитных углов тросов (в основном в пределах 20...35°) — позволило достигнуть весьма высоких эксплуатационных показателей для тросовых линий, существенно лучших, чем за границей, в частности в США. Так, в среднем удельное число выключений в СССР на 100 км длины и 30 грозовых часов в год составляет 0,015 и 0,28 соответственно для линий 220 и 110 кВ, что примерно в 5 раз меньше, чем в США. Защита линий стержневыми молниеотводами применяется редко; они устанавливаются, главным образом, на сильно поражаемых участках линий, выявленных в эксплуатации, и когда подвеска тросов затруднительна или невозможна. Следует указать, что в районах с небольшой грозовой деятельностью признается достаточным применение АПВ и защита тросами не требуется.

При разработке грозозащиты линий с деревянными опорами, помимо повышения импульсной прочности изоляции, большое внимание было уделено особенностям развития длинной электрической дуги. В исследованиях ЦНИЭЛ и ЛПИ было выяснено, что увеличение разрядного промежутка и снижение градиентов рабочего напряжения вдоль него, легко достигаемое при использовании дерева, существенно облегчают самоустранение импульсной дуги. Последние работы ЦНИЭЛ показали, что особенно благоприятные условия для самогашения дуги имеют место при разряде по дереву. Длительность коротких замыканий в подобных условиях определяется малыми долями периода и, естественно, не оказывает влияния на работу потребителей.

Используя изоляционные и дугогасящие свойства дерева, оказывается возможным существенно сократить число грозовых отключений и в сочетании с АПВ обеспечить должную надежность эксплуатации линий с деревянными опорами, вплоть до 110 кВ, не прибегая к тросам. По этому пути идет в настоящее время практика грозозащиты в СССР.

Сети 35 кВ работают, как правило, с изолированной или компенсированной нейтралью. Это имеет большое значение для грозозащиты линий на металлических опорах. Перекрытие на землю одной фазы не приводит к короткому замыканию и не требует в подобных случаях выключения линии. Поэтому при перекрытии изоляции провод ведет себя подобно тросу и подвеска специального троса не является здесь столь важной, как в сетях с глухо заземленной нейтралью. Защита тросом в таких случаях не предусматривается, но принимаются меры к недопущению перекрытия изоляции второй фазы путем увеличения гирлянды на один изолятор (по сравнению с линиями на деревянных опорах) и всемерному улучшению заземления опор.

Трубчатые разрядники применяются для защиты отдельных опор, имеющих ослабленную по

сравнению с остальной линией изоляцию. Защита разрядниками опор с нормальной изоляцией признается нецелесообразной. Как показали исследования ЦНИЭЛ, при частой установке разрядников они сами вызывают выключения вследствие повреждения трубки (при перекрытии или разрыве) или затяжного гашения дуги, при котором срабатывает релейная защита. Подобные случаи особенно часты при использовании современных быстродействующих защит. Частая установка разрядников весьма усложняет эксплуатацию, но не позволяет сколько-нибудь существенно снизить число грозовых отключений.

Грозозащита станций и подстанций. Станции и подстанции подлежат защите от прямых ударов молнии и волн, набегающих с линии. Защита от прямых ударов осуществляется при помощи стержневых или — реже — тросовых молниеотводов в соответствии с рекомендациями, основанными на упомянутых выше работах ВЭИ.

Принятые в СССР меры по обеспечению надежной защиты от набегающих волн базируются на обширных исследованиях научно-исследовательских организаций, заводов и энергосистем. Первые работы в области импульсной прочности и грозоупорности трансформаторов были проведены еще в ЛЭФИ. Систематическое изучение импульсной прочности изоляционных конструкций и отдельных узлов с широким применением моделирования, испытания на макетах и в натуре широко проводилось ВЭИ и заводами. В результате были получены необходимые данные для выбора изоляционных расстояний и конструкций.

Исследования перенапряжений в трансформаторах систематически проводились ВЭИ и МТЗ. В результате была разработана весьма полная и строгая теория электромагнитных процессов в обмотках.

Особенно следует отметить исследования волновых процессов в целях достижения практически полного устранения колебаний с применением нерезонирующих, полурезонирующих, слабо колеблющихся обмоток и пр. Сочетая теоретические и экспериментальные исследования, оказалось возможным дать законченные рекомендации, которые были положены в основу советских конструкций трансформаторов, отличающихся высокой грозоупорностью.

По грозозащите подстанций советскими учеными и инженерами были предложены простые и конструктивные решения. Особенно большое значение имела разработка принципов грозозащиты подстанций с подходящими линиями без тросов. Решение было найдено путем надежной защиты подхода линии к подстанциям при помощи тросов или стержневых молниеотводов. В случае деревянных опор в начале и конце защищенного подхода ставились еще трубчатые разрядники. Таким путем достигалось ограничение набегающей с незащищенной части линии волны, амплитуда и крутизна которой снижались вследствие затухания при движении вдоль подхода. На подстанции устанавливались вентильные разрядники.

Ввиду сложности схем грозозащиты больших подстанций, содержащих к тому же нелинейные сопротивления и разрядники, теоретические расчеты перенапряжений представляют большие трудности. Поэтому в исследовании этих схем широкое распространение получил метод моделирования. Исследования на пространственных моделях ХЭТИ применил еще в 1935 г. Результаты их были использованы при разработке некоторых практических мероприятий. Позднее ЛЭТИ применил модели уменьшенного масштаба и, соответственно, сокращенные волны. В лаборатории ВЭС Мосэнерго была предложена цепная модель подстанции, большим достоинством которой является значительное увеличение масштаба времени, что позволяет использовать вибрационный осциллограф вместо катодного, существенно упрощая таким образом технику измерений. Дальнейшее усовершенствование цепные схемы получили в ЛПИ, где была разработана оригинальная установка — анализатор грозозащиты подстанций, на котором производились многочисленные испытания моделей наиболее распространенных типов распределительных устройств. Работы на модели позволили определить амплитуду и форму опасных для подстанций волн и уточнить допустимые расстояния между разрядниками и защищаемым оборудованием.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса затухания волны ХЭТИ и ЛПИ дали возможность оценить крутизну и амплитуду набегающей на подстанцию волны и обоснованно выбрать длину защищенного подхода.

Разработанные на основе всех этих исследований практические рекомендации привели к созданию весьма надежных схем защиты, оправдавших себя в эксплуатации. Случаи повреждений изоляции подстанций с нормально принятой защитой при грозовых перенапряжениях исключительно редки. Одной из главных причин таких повреждений являются перекрытия между линейными выводами и между линейными выводами и изолированной нейтралью.

Мероприятия по борьбе с такими перенапряжениями, обусловленными колебаниями напряжения изолированной нейтрали трансформаторов и на шинах в случае тупиковых подстанций, были разработаны ОРГЭС и ЦНИЭЛ.

Для небольших подстанций, в первую очередь 6...10 кВ, где напряжения в различных точках практически одинаковы, а следовательно, одинаковы напряжения на разряднике и защищаемом оборудовании, рекомендуются упрощенные схемы, не требующие защиты подхода.

Защита вращающихся машин. Экспериментальные исследования волнового сопротивления машин и скорости распространения волны в обмотках были проведены на заводе «Электросила». Дальнейшие исследования в этой области были выполнены МЭИ. Обобщение результатов всех проведенных измерений позволило установить основные закономерности распространения волн.

Разработке рациональных схем грозозащиты вращающихся машин был посвящен ряд теоретических и экспериментальных исследований МЭИ.

Особый интерес имеют работы по схемам с кабельными вставками, защитные свойства которых с достаточной полнотой были выяснены впервые в этих работах. В результате этих исследований МЭИ дал практические рекомендации, позволяющие ограничить напряжение на генераторах величиной, лежащей в пределах амплитуды заводского испытательного напряжения при весьма суровых расчетных условиях. Предложения эти получили широкое распространение. ЦНИЭЛ провел анализ и экспериментальную проверку схем защиты в условиях, практически соответствующих эксплуатации. В результате исследований предложена схема повышенной надежности для машин при длинных кабельных вставках и определено затухание импульсных волн при движении их по кабелям.

В работах по грозозащите вращающихся машин недостаточно внимания было уделено разработке упрощенных схем, которые имеют большое значение для двигателей менее ответственного назначения. Опыт использования упрощенных схем защиты в США следует тщательно изучить.

Заключение. Систематическая и правильно ориентированная работа советских ученых и инженеров позволила добиться серьезных успехов в области грозозащиты энергосистем и обеспечила резкое снижение их грозовой аварийности.

Существенно подчеркнуть, что современное направление работ в области грозозащиты позволило найти достаточно надежные и эффективные средства защиты от молнии путем сравнительно недорогих и конструктивных мероприятий.

Огромное значение для внедрения совершенных и надежных методов грозозащиты имели «Руководящие указания по защите от перенапряжений электрических установок переменного тока 3 ... 220 кВ». Впервые Руководящие указания, разработанные по заданию Наркомата электростанций и одобренные им, были опубликованы в 1935 г. В дальнейшем они систематически совершенствовались на базе новейших исследований и изучения опыта эксплуатации. К разработке Руководящих указаний были привлечены представители различных научных школ и направлений и инженеры-производственники, что способствовало наиболее полному и объективному решению всех вопросов. Особенно следует отметить здесь роль Л. И. Сиротинского, бесменного председателя всех комиссий по разработке «Руководящих указаний». Наглядным итогом проведенных в СССР работ в области грозозащиты является достигнутое снижение грозовых аварий. Число их за 20 лет (с 1934 по 1954 г.), приведенное к одинаковой протяженности сетей, снизилось примерно в 20 раз.

[3.5. 1955]



ОТ РЕДАКЦИИ

В итоге широкого и в целом успешного применения монтажными и эксплуатационными организациями включения силовых трансформаторов без предварительной сушки или подогрева, а также в связи с результатами исследований ряда организаций и в том числе Московского трансформаторного завода по методике определения увлажненности трансформаторов выявилась необходимость в обмене мнениями по вопросу об условиях включения трансформаторов без сушки. Ниже публикуются в порядке обсуждения статьи работников промышленности, эксплуатации и монтажа по этому важному для эксплуатации и строительства вопросу.

О включении трансформаторов без сушки

Инж. А. К. АШРЯТОВ

Московский трансформаторный завод имени Куйбышева

Введение. До 1946 г. определение возможности включения без сушки вводимых в эксплуатацию трансформаторов производилось по инструкциям заводов-изготовителей [Л. 1]. Трансформаторы на 220 кВ, транспортируемые на место установки без масла в баках, заполненных азотом или воздухом, и герметизированные, подвергались, как правило, на монтаже контрольной сушке. В 1946 г. Московский трансформаторный завод им. Куйбышева (МТЗ) выпустил руководящие указания по ускорению монтажа и включения в сеть масляных силовых трансформаторов напряжением до 110 кВ. Согласно этим указаниям масляные трансформаторы, отправляемые к месту установки незалитыми маслом, разрешалось включать

в сеть без сушки при соблюдении следующих основных условий:

1. Испытание избыточным давлением воздуха 0,15 атм показывает исправность уплотнений.

2. Продолжительность пребывания выемной части трансформатора на воздухе при ревизии (осмотре) не превышает 8 ... 12 час.

3. Испытание вторичной пробы масла, взятой не менее чем через 24 часа после заливки, не показывает наличия в ней следов влаги и снижения пробивного напряжения более чем на 15% по сравнению с данными испытания пробы после заливки.

4. Измерение сопротивления изоляции обмоток на корпус и между собой не показывает сни-

жения сопротивления более чем на 30% по сравнению с данными заводского протокола.

5. Трансформаторы мощностью 2400 кВА и выше напряжением до 110 кВ должны подвергаться дополнительному подогреву до достижения температуры верхних слоев масла 60...70°С с последующей повторной проверкой по пп. 3 и 4.

В руководящих указаниях завода рекомендовалось трансформаторы напряжением 110 кВ и выше после монтажа, перед включением прогреть током до достижения температуры верхних слоев 70°С с целью удаления воздушных включений из изоляции и для выявления возможной течи в уплотнениях.

Затруднения, испытываемые в эксплуатации при подогреве трансформаторов до 60...70°С, заставили искать способов контроля увлажненности изоляции, не требующих подогрева. В 1947—1948 гг. Центральная научно-исследовательская лаборатория Министерства электростанций (ЦНИЭЛ МЭС) разработала и предложила емкостный метод контроля влажности изоляции трансформаторов, заключающийся в сравнении емкостей обмоток испытываемого трансформатора, измеренных при частотах 2 и 50 Гц. Метод нашел широкое распространение в эксплуатации, особенно после опубликования Техническим управлением МЭС в апреле 1951 г. эксплуатационного циркуляра 3/Э [Л. 2]. В качестве основного критерия для оценки общего увлажнения изоляции трансформатора циркуляром было принято отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ при температуре 10...20°С.

Несмотря на возражения МТЗ, циркуляр предлагал решать вопрос о возможности включения трансформаторов без сушки, руководствуясь только данными контроля увлажненности изоляции относительно корпуса и между обмотками, и допускал включение без сушки даже в том случае, если требования заводских инструкций не удовлетворялись. Согласно циркуляру контроль увлажненности сводился к следующим испытаниям:

- 1) к определению отношения емкостей при частотах 2 и 50 Гц;
- 2) к измерению тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, если отсутствовала возможность измерений по п. 1;
- 3) к измерению 15- и 60-секундных значений сопротивления изоляции и определению их отношения R_{60}/R_{15} .

При отсутствии приборов для измерений по пп. 1 и 2 и в сомнительных случаях допускалось решение вопроса о сушке на основании сравнения результатов измерения емкостей в нагретом (порядка 70°С) и холодном (10...30°С) состоянии трансформатора ($\frac{C_2}{C_x}$).

В циркуляре были даны предельные значения показателей неувлажненных трансформаторов ($\frac{C_2}{C_{50}}$, $\frac{C_2}{C_x}$ и $\operatorname{tg} \delta$), одинаковые для всех типов

и никак не обусловленные состоянием трансформатора — новый ли он или бывший в эксплуатации.

Пользуясь указаниями и нормами этого циркуляра, монтажные организации в последнее время практиковали включение в работу без сушки и прогрева мощных и высоковольтных трансформаторов, длительное время находившихся без масла.

В связи с изложенными обстоятельствами в начале 1954 г. МТЗ провел исследование по экспериментальной проверке методов и норм контроля увлажненности изоляции, предусмотренных упомянутым выше циркуляром применительно к изготовляемым трансформаторам [Л. 3]. В настоящей статье приводятся результаты этого исследования и даются рекомендации по вопросам включения трансформаторов без сушки.

В работе использовались результаты испытаний трансформаторов МТЗ на различных стадиях производства — до сушки и заливки их маслом, после сушки и заливки масла. Были также использованы данные совместных испытаний ЦНИЭЛ МЭС и лаборатории МТЗ по проверке метода «емкость — частота» (1948 г.). Использовались также материалы по испытаниям трансформаторов на месте их монтажа перед вводом в эксплуатацию.

Испытания межкатушечной изоляции обмоток 220 кВ производились на моделях. Температурные зависимости характеристик увлажненной изоляции были сняты на трехфазном двухобмоточном трансформаторе типа ТДГ-15000/110 мощностью 15000 кВА, 110 кВ, который подвергался искусственному увлажнению на заводе.

Увлажнение трансформатора типа ТДГ-15000/110* производилось следующим образом.

Выемная часть трансформатора, ранее проходившая сушку и пропитку маслом под вакуумом, увлажнялась в течение 33 суток. В целях увлажнения на дно бака, свободного от масла, была налита вода; крышка снята. Относительная влажность воздуха помещения колебалась в пределах 65...80%. Затем для достижения более глубокого увлажнения изоляции на верхнее ярмо выемной части трансформатора были поставлены противни с водой, а бак трансформатора с установленной крышкой периодически подогревался индукционным методом. Температура выемной части и воздуха в баке контролировалась термометрами. Этим способом трансформатор увлажнялся 11 суток.

После этого трансформатор был полностью собран, залит маслом, прогрет постоянным током (в обмотке ВН) до достижения температуры верхних слоев 70°С и затем в режиме остывания были сняты температурные зависимости характеристик увлажненной изоляции. После остывания трансформатор был демонтирован, а выемная часть подвергалась сушке по заводской инструкции. В процессе сушки выделялось

* В исследовании увлажнения этого трансформатора принимали участие инженеры МТЗ Л. С. Горник, А. Е. Васильев и Т. С. Титова.

25 л воды, что подтвердило значительное увлажнение трансформатора.

После сушки трансформатор был вновь собран, залит маслом, подогрет до температуры верхних слоев 70°С, и затем в режиме остывания были повторно сняты температурные зависимости характеристик высушенной изоляции.

Для измерения емкости при частотах 2 и 50 гц применялся прибор типа ПКВ-2. При измерениях свободные обмотки заземлялись. Измерения емкости и $\operatorname{tg} \delta$ между каждой обмоткой и корпусом и между обмотками при изолированных свободных обмотках производились на заводе при помощи низковольтного моста переменного тока при 100 в. Измерения на монтаже в большинстве случаев производились мостом типа МД-16 при напряжениях до 10 кв.

Для измерений 15- и 60-секундных значений сопротивления изоляции между каждой обмоткой и корпусом и между обмотками при изолированных свободных обмотках применялся мегомметр на 2 500 в до 10 000 мгом с приводом от электродвигателя. Температура масла замерялась при помощи термометра сопротивления.

Результаты исследования. Метод емкость — частота. Разработанный ЦНИЭЛ МЭС метод емкость — частота основан на зависимости диэлектрической проницаемости увлажненной твердой изоляции от частоты вследствие явления внутрислойной поляризации. Метод был подробно описан в журнальной литературе [Л. 3 и 4].

Как известно, для контроля увлажненности изоляции по этому методу достаточно измерить при температуре 10 ... 20°С емкость испытываемой обмотки при частотах 2 и 50 гц. Если отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ не превышает значений 1,2 ... 1,3, то изоляция считается неувлажненной [Л. 2 и 4].

По данным В. Б. Кулаковского экспериментальная проверка метода на новых трансформаторах выпуска МТЗ, а также на трансформаторах, бывших в эксплуатации, показала результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Состояние трансформаторов	Число испытанных трансформаторов	Пределы отношения
Неувлажненные трансформаторы выпуска МТЗ, не бывшие в эксплуатации	45	1,0 ... 1,3
Трансформаторы, бывшие в эксплуатации, подвергавшиеся ремонту и сушке в собственном баке или сушке горячим воздухом	7	1,15 ... 1,4
Трансформаторы с увлажненной изоляцией (в основном простоявшие несколько лет без масла)	8	1,28 ... 2,55
Трансформаторы в процессе сборки и разной степени увлажненности до сушки	16	1,04 ... 1,78
Они же после сушки	16	1,01 ... 1,15

Табл. 1 показывает, что наряду с неувлажненными трансформаторами заведомо увлажненные трансформаторы, как, например, простоявшие несколько лет без масла, или трансформаторы разной степени увлажненности до сушки имели значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ не только не превосходящие, но намного не достигающие предельного значения 1,3, нормированного для неувлажненных трансформаторов.

В табл. 2 даны отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\operatorname{tg} \delta$ для трансформаторов, испытанных на заводе до и после сушки.

Как видно из табл. 2, измерения на 16 трансформаторах в процессе их производства до и после сушки и заливки маслом показали малую чувствительность отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ к увлажнению.

При температурах 10 ... 20°С отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ в ряде случаев изменялось после сушки сравнительно мало, тогда как такой показатель, как $\operatorname{tg} \delta$, уменьшился после сушки весьма значительно. Например, на однофазном трансформаторе мощностью 20 000 кВа, 220 кв измерения до сушки при температуре 21°С показали отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ в пределах 1,22 ... 1,28, т. е. ниже предельной нормы 1,3. После сушки с выходом из трансформатора 164 л влаги измерения в масле при температуре 28°С показали уменьшение отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ всего до 1,11 ... 1,13, тогда как значения $\operatorname{tg} \delta$ уменьшились после сушки: для обмотки высшего напряжения (ВН) — в 17,5 раза, для обмотки среднего напряжения (СН) — в 7,5 раза, а для обмотки низшего напряжения (НН) — в 10,7 раза. Аналогичные результаты были получены и на других трансформаторах (табл. 2).

В табл. 3 приведены значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и другие характеристики моделей межкатушечной изоляции 220 кв обмотки, полученные при измерениях на воздухе и в масле при 15 ... 56°С до и после сушки.

Как видно из табл. 3, измерения в воздухе и масле при 15°С дали практически одинаковые результаты для отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\operatorname{tg} \delta$. Для высушенной модели при 15°С отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ мало изменилось, тогда как значение $\operatorname{tg} \delta$ уменьшилось в 4 ... 6 раз. Эти данные подтверждают малую чувствительность отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ при измерениях в холодном состоянии (15°С).

На рис. 1 показано отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ в зависимости от температуры верхних слоев масла для обмотки ВН трансформатора типа ТДГ-15000/110 в увлажненном состоянии и после сушки.

Таблица 2

Тип и заводской номер трансформатора	Испытываемая обмотка	До сушки (без кожуха и масла)			После сушки (в кожухе, залитые маслом)			Кратность изменения после сушки		Выход влаги после сушки, л
		температура, °C	tg δ, %	$\frac{C_2}{C_{50}}$	температура, °C	tg δ, %	$\frac{C_2}{C_{50}}$	tg δ	$\frac{C_2}{C_{50}}$	
ОВТГ-20000/220 № 554938	В-К	21	7,0	1,26	28	0,4	1,11	17,5	1,135	164,4
	С-К	21	6,0	1,22	28	0,8	1,13	7,5	1,08	
	Н-К	21	8,0	1,28	28	0,75	1,11	10,7	1,153	
ТДТГ-31500/110 № 551800	В-К	15	8,0	1,40	21	0,25	1,07	32,0	1,31	82,0
	С-К	15	10,0	1,46	21	0,50	1,04	20,0	1,40	
	Н-К	15	9,0	1,49	21	0,30	1,04	30,0	1,43	
ТМТ-5600/110	В-К	21	6,0	1,08	30	0,6	1,03	10,0	1,05	56,8
	С-К	21	7,0	1,25	30	0,8	1,01	8,7	1,24	
	Н-К	21	6,0	1,39	30	0,7	1,03	8,6	1,35	
ТДТГ-15000/110	В-К	6	4,3	1,06	5	0,9	1,0	4,8	1,06	78,0
	С-К	6	3,8	1,10	5	1,45	1,0	2,6	1,10	
	Н-К	6	4,8	1,11	5	0,7	1,0	6,8	1,11	
ТД-31500/35 № 553104	В-К	9	3,0	1,08	7	0,4	1,03	7,5	1,05	39,0
	Н-К	9	5,0	1,19	7	0,3	1,0	16,7	1,19	
ТДГ-20000/110 № 551817	В-К	11	9,5	1,33	6	0,4	1,0	23,7	1,33	55,6
	Н-К	11	9,5	1,36	6	0,4	1,0	23,7	1,36	
ТДГ-20000/110 № 552383	В-К	10	—	1,36	25	0,9	1,11	—	1,22	56,5
	Н-К	10	—	1,53	25	0,7	1,15	—	1,33	
ТМ-5600/35 № 552511	В-К	12,5	10	1,42	12	0,8	1,05	12,5	1,35	Не измерялся
	Н-К	12,5	16	1,71	12	1,5	1,05	10,7	1,63	
ТМ-5600/35 № 553764	В-К	12,5	6	1,34	8	0,35	1,07	17,1	1,25	То же
	Н-К	12,5	9	1,52	8	0,4	1,0	22,5	1,52	
ТМ-3200/35 № 553812	В-К	12	1,5	1,09	8,5	0,5	1,0	3,0	1,09	" "
	Н-К	12	2,8	1,0	8,5	0,8	1,0	3,5	1,0	
ТМ-3200/35 № 553767	В-К	12,5	7,0	1,22	3,0	0,35	1,07	20,0	1,14	" "
	Н-К	12,5	21,0	1,74	3,0	0,5	1,0	42,0	1,74	
ТМ-3200/35 № 553814	В-К	12	2,9	1,14	3	0,4	1,0	7,2	1,14	" "
	Н-К	12	2,3	1,00	3	0,8	1,0	2,9	1,0	
ТМ-3200/35 № 553813	В-К	12	1,5	1,04	3	0,4	1,0	3,7	1,04	" "
	Н-К	12	2,5	1,04	3	0,6	1,0	4,2	1,04	
ТМ-5600/35 № 551933	В-К	12	—	1,46	12	0,6	1,0	—	1,46	То же; изоляция вводов НН была загрязнена
	Н-К	12	—	1,63	12	24,0	1,0	—	1,63	
ТМ-5600/35 № 554594	В-К	3	2,1	1,0	10	0,3	1,0	7,0	1,0	Не измерялся
	Н-К	3	5,5	1,23	10	1,0	1,0	5,5	1,23	
ТМ-1000/10 № 550019	В-К	12	2,0	1,21	12	0,1	1,0	20,0	1,21	То же
	Н-К	12	4,0	1,14	12	2,1	1,06	1,9	1,07	

Таблица 3

Значения $\text{tg } \delta$, $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\frac{C_2}{C_x}$ и $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ при различных состояниях модели межкатушечной изоляции обмотки 220 кв

Состояния модели и условия измерения		Температура, °C	Измерено мостом переменного тока			Измерено прибором ПКВ-2			Измерение мегомметром 2 500 в, 10 000 мгом		
			С, пф	tg δ, %	$\frac{C_2}{C_x}$	C ₂ , пф	C ₅₀ , пф	$\frac{C_2}{C_{50}}$	R ₁₅ , мгом	R ₆₀ , мгом	$\frac{R_{60}}{R_{15}}$
Не сушилась и не пропитывалась	Измерено:										
	в воздухе	15	726	2,6	1 100	900	1,22	4 000	4 500	1,12	
	в масле после 24 час выдержки	15	1 175	2,5	1 800	1 500	1,2	7 500	9 000	1,2	
	то же, но в горячем масле	56	1 560	30	1,32	5 250	2 000	2,6	35	35	1,0
Сушилась и пропитывалась по заводской инструкции	Измерено:										
	в воздухе	15	715	0,6	1 000	880	1,14	9 000	10 000	1,67	
	в масле после 24 час выдержки	15	1 170	0,4	1 450	1 300	1,12	3 000	5 000	1,67	
	то же, но в горячем масле	56	1 190	1,58	1,02	1 800	1 400	1,29	700	1 000	1,43

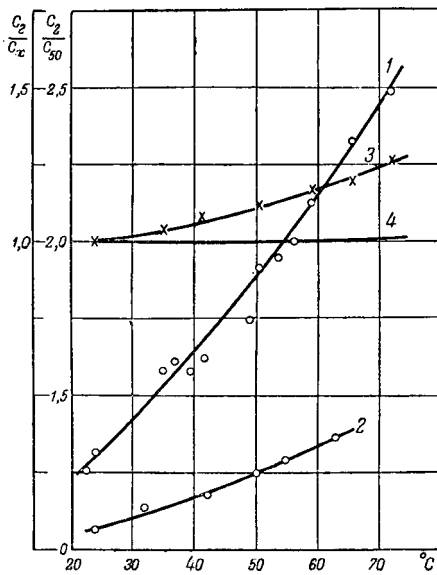


Рис. 1. Отношения емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\frac{C_2}{C_x}$ в зависимости от температуры верхних слоев масла для обмотки ВН трансформатора типа ТДГ-15000/110 в увлажненном состоянии и после сушки.

- 1 — $\frac{C_2}{C_{50}}$ в увлажненном состоянии; 2 — $\frac{C_2}{C_{50}}$ после сушки;
- 3 — $\frac{C_2}{C_x}$ в увлажненном состоянии; 4 — $\frac{C_2}{C_x}$ после сушки.

Как видно из рисунка, отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ для увлажненного трансформатора (кривая 1) имеет сильно выраженную температурную зависимость. Если при нагреве с 20 до 60°С отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ для увлажненной изоляции изменилось с 1,22 до 2,15, т. е. возросло на 76%, то после сушки оно возросло с 1,09 до 1,31, только на 20%. Таким образом, при нагреве до 60°С чувствительность отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ возросла более чем на 50%. Данные измерений на моделях межка-

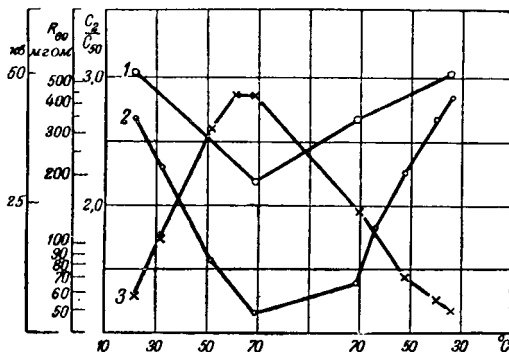


Рис. 2. Изменение пробивного напряжения масла (кривая 1), сопротивления изоляции R_{60} (2) и отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ (3) обмотки НН увлажненного трансформатора типа ТДГ-60000/110 в процессе длительного прогрева в масле.

тушной изоляции, приведенные в табл. 3, также показывают повышение чувствительности отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ к увлажнению с увеличением температуры.

На рис. 2 показано изменение отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для обмотки НН увлажненного трансформатора типа ТДГ-60000/110 в процессе длительного прогрева в масле. Этот трансформатор был увлажнен при транспортировке и хранении в течение 1,5 мес. без масла с нарушенной герметичностью уплотнений. Как видно из рис. 2, перед прогревом при 20°С отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ было меньше предельного значения 1,3. В процессе прогрева, уже при 40°С, отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ возросло до 2,1. После прогрева и остывания до той же температуры 40°С оно снизилось до 1,18. Этот случай показывает, что оценка увлажненности изоляции трансформатора по результатам измерения $\frac{C_2}{C_{50}}$ при температурах до 20°С и предельной норме 1,3 может привести к ложным заключениям.

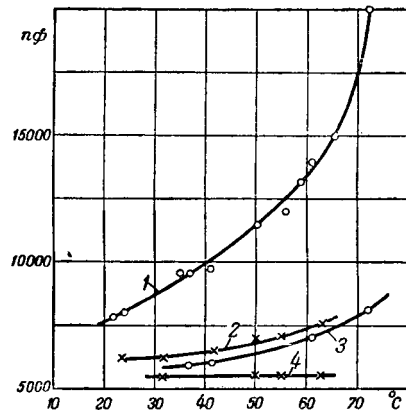


Рис. 3. Емкости C_2 и C_{50} в зависимости от температуры обмоток ВН трансформатора типа ТДГ-15000/110 в увлажненном состоянии и после сушки.
1 — C_2 после увлажнения; 2 — C_2 после сушки; 3 — C_{50} после увлажнения; 4 — C_{50} после сушки.

На рис. 3 дана зависимость емкостей C_2 и C_{50} от температуры для обмотки ВН трансформатора типа ТДГ-15000/110. Как видно из рисунка, при неувлажненной изоляции с повышением температуры возрастает только значение емкости C_2 , тогда как значение емкости C_{50} остается практически постоянным. На рис. 4 показана зависимость отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\frac{C_2}{C_x}$ от температуры для обмоток ВН неувлажненных трансформаторов различных типов, заполненных маслом с разными значениями $\text{tg } \delta$ масла. Как видно из рисунка, значения емкости C_2 в сильной степени зависят от $\text{tg } \delta$ масла, тогда как значения

емкости C_{50} и отношения $\frac{C_2}{C_x}$ почти не зависят от $\text{tg } \delta$ масла.

емкости C_{50} , а следовательно, отношения $\frac{C_2}{C_x}$ практически не зависят от $\text{tg } \delta$ масла.

Резюмируя приведенные результаты испытаний по методу емкость — частота, можно сделать следующее заключение:

1. Измерения в холодном состоянии в воздухе и масле при $10 \dots 20^\circ\text{C}$ как на неувлажненных, так и на заведомо увлажненных трансформаторах могут дать значения отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ в пределах $1,04 \dots 1,3$.

2. Метод емкость — частота при отношениях $\frac{C_2}{C_{50}} > 1,3$ в определенных случаях может показать увлажнение изоляции, но при малых значениях ($\frac{C_2}{C_{50}} < 1,3$) он не может свидетельствовать об отсутствии увлажнения.

3. Метод емкость — частота при установленной для отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ предельной норме $1,3$ может обнаружить только сильное увлажнение трансформатора. Снижение же этой нормы, как показывают данные табл. 1, может привести к отбраковке и сушке неувлажненных трансформаторов.

Метод $\text{tg } \delta$. Как и все другие известные методы, этот метод позволяет определять общее увлажнение изоляции по отношению к корпусу или между обмотками испытываемого трансформатора. Измерения по этому методу обычно производятся мостом переменного тока при напряжении до 10 кВ . Во избежание ошибок при измере-

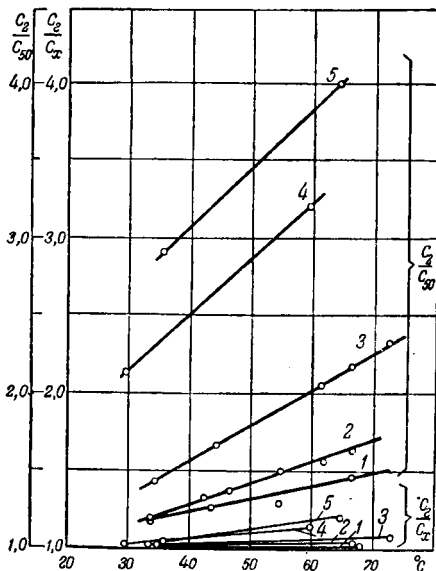


Рис. 4. Отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\frac{C_2}{C_x}$ в зависимости от температуры обмоток ВН неувлажненных трансформаторов, заполненных маслом с различными значениями $\text{tg } \delta$.

1—для трансформатора типа ОДТГ-60000/220, залитого маслом со значением $\text{tg } \delta = 0,23\%$ при $t = 26^\circ\text{C}$; 2—тип ОДТГ-30000/220, $\text{tg } \delta = 0,57\%$, $t = 26^\circ\text{C}$; 3—тип ОЦГ-46700/220, $\text{tg } \delta = 1,5\%$, $t = 33^\circ\text{C}$; 4—тип ОДТГ-40000/220, $\text{tg } \delta = 6,6\%$, $t = 29^\circ\text{C}$; 5—тот же тип, что и в 4, но другая фаза, $\text{tg } \delta = 10\%$, $t = 29^\circ\text{C}$.

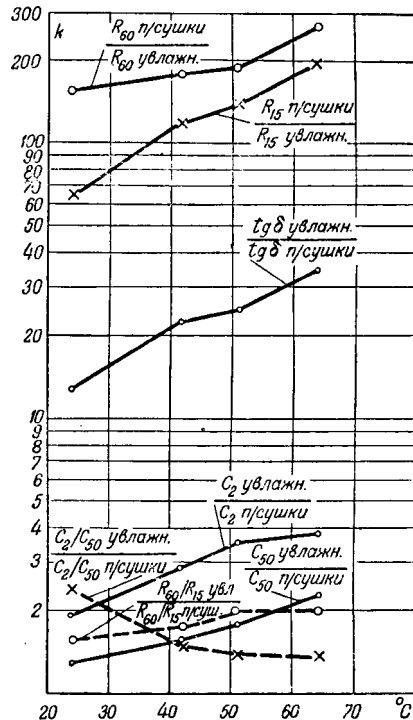


Рис. 5. Коэффициент k чувствительности к увлажнению показателей R_{60} , R_{15} , $\text{tg } \delta$, C_2 и C_{50} в зависимости от температуры.

ниях в холодном масле в этом случае необходимо принять меры для удаления воздушных включений (пузырьков воздуха) из лабиринтов изоляции, например путем заполнения трансформатора маслом под вакуумом. Однако это не всегда осуществимо, поэтому, если отсутствует сильное влияние внешних электромагнитных полей, предпочтительно производить измерения на низком напряжении (до 100 В , если позволяет чувствительность моста).

Состояние поверхности вводов также может оказать влияние на результаты измерений $\text{tg } \delta$. Перед измерением следует тщательно протирать вводы или применять охранные кольца.

Результаты исследований показывают, что метод контроля увлажненности по измерению $\text{tg } \delta$ является более чувствительным, чем все другие методы, нормированные эксплуатационным циркуляром З/Э.

На рис. 5 показана чувствительность различных методов к увлажнению в зависимости от температуры верхних слоев масла по данным измерений на обмотке НН трансформатора ТДГ-15000/110 в увлажненном состоянии и после сушки. Коэффициент чувствительности k , приведенный на рисунке, показывает, во сколько раз после сушки изменяется данный показатель при данной температуре.

Из приведенных на рис. 5 кривых видно, что наиболее чувствительным к увлажнению является показатель R_{60} , который при $24 \dots 64^\circ\text{C}$ изменяется после сушки в $160 \dots 270$ раз; далее по степени чувствительности за R_{15} следует $\text{tg } \delta$

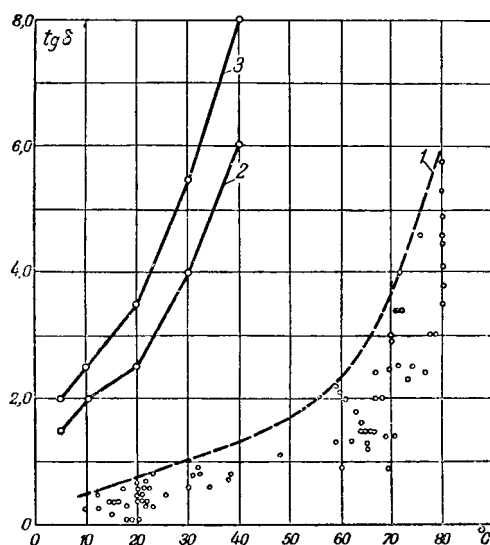


Рис. 6. $\operatorname{tg} \delta$ в зависимости от температуры для обмоток ВН и НН трансформаторов 220 кВ по данным измерений на 36 трансформаторах на монтаже и предельные значения для неувлажненных трансформаторов по эксплуатационному циркуляру 3/Э.

1—огибающая максимальных значений по данным измерений на монтаже; 2—предельные значения по эксплуатационному циркуляру для обмоток с номинальным напряжением 50 кВ и выше; 3—то же, но для обмоток с номинальным напряжением 35 кВ и ниже.

с кратностью изменения после сушки в 13...35 раз; на последнем месте находятся показатели C_2 и C_{50} емкостного метода с кратностью изменения 2...4 раза. Кривые рис. 5 показывают значительное возрастание чувствительности показателей R_{60} , $\operatorname{tg} \delta$, C_2 и C_{50} с увеличением температуры.

На рис. 6 показаны значения $\operatorname{tg} \delta$ в зависимости от температуры для обмоток ВН и НН 36 различных трансформаторов на 220 кВ по данным измерений на монтаже перед вводом в эксплуатацию. Предельные значения $\operatorname{tg} \delta$ (рис. 6), нормированные в эксплуатационном циркуляре 3/Э, превышают в 3...4 раза огибающую максимальных значений $\operatorname{tg} \delta$, полученных при измерениях на монтаже. Следовательно, эти нормы завышены и непригодны для оценки увлажненности изоляции новых трансформаторов. Данные зарубежной журнальной литературы [Л. 6] по измерениям на новых трансформаторах подтверждают справедливость приведенного выше заключения.

Испытания неувлажненных трансформаторов на заводе и на монтаже показывают, что значения $\operatorname{tg} \delta$ для разных обмоток (ВН, СН и НН) одного и того же трансформатора приблизительно одинаковы. С другой стороны, как показывают результаты исследования, внутренняя обмотка, ближайшая к сердечнику, быстрее подвергается увлажнению. Поэтому было бы неправильным для оценки увлажненности изоляции устанавливать различные нормы для разных обмоток одного и того же типа трансформатора. Оценку увлажненности изоляции следует производить по наихудшим показателям.

Метод абсорбции. Испытания, проведенные с трансформатором типа ТДГ-15000/110, показа-

ли, что наиболее чувствительными к увлажнению внутренней обмотки¹ НН трансформатора оказались абсолютные значения сопротивления изоляции R_{15} и R_{60} : коэффициент чувствительности k показателей R_{15} и R_{60} (рис. 5) при температуре верхних слоев масла 65°С достигал 200...270, а при 24°С — 65...155. Однако результаты исследований дают основание предполагать, что абсолютные значения R_{15} , R_{60} и отношение $\frac{R_{30}}{R_{15}}$, полученные при измерениях в холодном состоянии (10...20°С), в сильной степени зависят от состояния поверхности изоляции и поэтому могут приводить к нестабильным и неправильным результатам, особенно для наружных обмоток. Это видно, например, из результатов измерений, проведенных на трансформаторе типа ТДГ-15000/110 при 35...22,5°С до и после увлажнения (табл. 4).

Таблица 4

Условия измерения	Температура верхних слоев масла, °С	Сопротивление изоляции обмотки ВН—корпус		$\frac{R_{60}}{R_{15}}$
		R_{60} , МГОМ	R_{15} , МГОМ	
После увлажнения и нагрева при остывании	35	37	30	1,085
То же, но через 4 суток	24	465	330	1,41
То же, но через 6 суток	22,5	605	410	1,47
До увлажнения	23	1 000	700	1,43

Как видно из данных табл. 4, за время остывания трансформатора с 35 до 22,5°С, т. е. на 9°С в течение 6 суток, значения R_{15} , R_{60} и отношения $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ резко улучшились, приближаясь к значениям, которые трансформатор имел до увлажнения.

Измерения на моделях межкатушечной изоляции (табл. 3) показали еще более разительную картину. Например, в масле при 15°С измерения до сушки модели дали абсолютные значения R_{15} и R_{60} , почти в 2 раза превышающие значения, измеренные в тех же условиях, но после сушки модели.

После прогрева в масле до 56°С невысушенная модель показала уменьшение абсолютных значений R_{15} и R_{60} не менее чем в 20 раз по сравнению с данными измерений на высушенной модели.

На рис. 7 показано отношение $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ в зависимости от температуры для обмоток ВН и НН трансформаторов 220 кВ различных типов по данным измерений на монтаже перед вводом в эксплуатацию. Как показывают результаты этих измерений, отношение $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ имеет сильно выраженную температурную зависимость при большом разбросе, особенно при 10...20°С.

¹ Эта обмотка оказалась наиболее увлажненной.

На основании всех приведенных выше результатов испытаний можно утверждать, что измерение в холодном состоянии как абсолютного значения R_{60} , так и отношения $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ в ряде случаев может показать удовлетворительное состояние изоляции заведомо увлажненных трансформаторов. Поэтому результаты таких измерений нельзя рассматривать как достаточные для определения отсутствия увлажнения изоляции и включения трансформатора без сушки или подогрева.

Метод емкость — температура. Метод был разработан на МТЗ И. Г. Хейлем в 1945 г. Описание метода было дано в статье Б. Б. Гельперина [Л. 7], а теоретическое обоснование — в статьях Л. Г. Мамиконянца и В. Б. Кулаковского [Л. 3 и 4].

Сущность метода заключается в том, что если при нагреве трансформатора с 20 до 70...80°С его емкость, измеренная при частоте 50 гц, меняется не более чем на 20%, то можно считать, что трансформатор не требует сушки. Допуск на изменение емкости неувлажненного трансформатора при нагреве до 70°С был позже увеличен до 30% [Л. 2].

Измерения, произведенные на МТЗ на ряде неувлажненных трансформаторов 110 и 220 кВ, нагретых до 70°С, показали, что емкости обмоток при 50 гц практически мало зависят от температуры, и поэтому отношение $\frac{C_z}{C_x}$ для неувлажненной изоляции обмоток близко к единице (рис. 1 и 4). Это подтверждается также испытаниями на монтаже перед вводом в эксплуатацию трансформатора 110 и 220 кВ различных типов при 60...80°С. Например, в 59 случаях из 70 значения $\frac{C_z}{C_x}$ было в пределах 1,0...1,05,

в десяти случаях в пределах 1,06...1,16 и только в одном случае для обмотки НН трансформатора было измерено $\frac{C_{80}}{C_{20}} = 1,23$; при этом обмотки ВН

и СН этого трансформатора имели значение $\frac{C_{80}}{C_{20}}$ не более 1,025. Эти результаты явно указывали на увлажнение изоляции обмотки НН, что подтверждалось и другими измерениями. Так, измерения $\text{tg } \delta$ обмоток при 20°С показали: для обмотки НН $\text{tg } \delta = 3,2\%$, а для обмоток ВН и СН $\text{tg } \delta = 0,5\%$.

Как видно из рис. 5, чувствительность к увлажнению отношения $\frac{C_z}{C_x}$ того же порядка, что и отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ в тех случаях, когда оно показывает на увлажненное состояние.

Важным преимуществом метода емкость — температура является независимость C_{50} , а следовательно, и отношения $\frac{C_z}{C_x}$ от $\text{tg } \delta$ масла, кото-

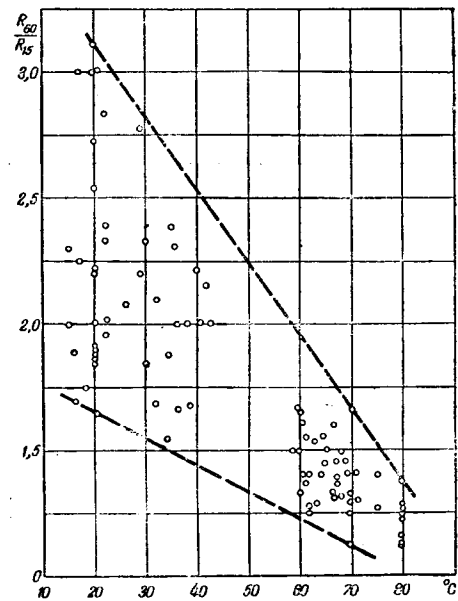


Рис. 7. Отношение $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ в зависимости от температуры верхних слоев масла для обмоток ВН и НН трансформаторов 220 кВ (по данным измерений на монтаже).

рым залит трансформатор. Необходимость нагрева трансформатора для целей измерений является недостатком метода.

Условия включения вновь изготовленных трансформаторов без сушки. При определении необходимых и достаточных условий для включения трансформаторов без сушки МТЗ исходит из следующего беспорядочного положения: все вновь изготовленные трансформаторы могут и должны включаться в работу практически в неувлажненном состоянии. Проверка отсутствия увлажнения должна производиться надежными и объективными методами.

Отсутствие увлажненности изоляции обмоток трансформатора относительно корпуса и между собой может быть проверено следующими методами: измерение 15- и 60-секундных значений сопротивления изоляции, измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь и др. Такая проверка является необходимым, но недостаточным условием включения трансформатора без сушки. Необходимо еще убедиться в том, что при перевозке трансформатора от завода до места установки или хранения на площадке не могли возникнуть местные увлажнения изоляции, например между витками, отдельными катушками или между фазами, которые не могут быть обнаружены путем измерений. Уверенность в отсутствии местных увлажнений изоляции могут дать только такие косвенные методы испытаний, как проверка герметичности уплотнений, испытание пробы масла на снижение пробивного напряжения и отсутствие следов влаги и др.

В табл. 5 приведены основные условия, необходимые, по нашему мнению, для возможности включения трансформаторов без сушки. Эти

Таблица 5

Основные условия включения трансформаторов без сушки

№ п/п.	Типы трансформаторов и условия их транспортировки	Перечень обязательных испытаний и условий				
		Герметичность уплотнений	Испытание пробы масла	Измерение R_{60} , R_{15} и $\text{tg } \delta$ обмоток	Прогрев в масле до 70°C	Пребывание на воздухе при осмотре не более
1	Мощностью до 1800 <i>кв</i> а и напряжением до 35 <i>кв</i> , отправляемые с маслом и установленным расширителем	Наличие масла в расширителе в пределах отметок маслоуказателя	Пробивное напряжение согласно ПТЭ	Не обязательно	Не требуется	16...12 час при относительной влажности воздуха 65...75%
2	Мощностью 2400 <i>кв</i> а и выше и напряжением до 35 <i>кв</i> , отправляемые с маслом, но без установленного расширителя	Проверяется давлением столба масла $H=1,5 \text{ м}$	Пробивное напряжение не ниже 30 <i>кв</i> . Отсутствие следов влаги	R_{60} не менее 70% и $\text{tg } \delta$ не более 130% данных заводского протокола	Требуется в случае неудовлетворительных результатов измерений в холодном состоянии	По п. 1
3	То же, что и в п. 2, но напряжением 110 <i>кв</i> и выше	По п. 2	Пробивное напряжение не менее 75% данных заводского протокола. Отсутствие следов влаги	По п. 2	По п. 2	По п. 1
4	То же, что и в п. 3, но отправляемые без масла с заполнением бака воздухом	Проверяется избыточным давлением сухого воздуха 0,25 <i>ати</i>	Пробивное напряжение остатков масла не ниже 30 <i>кв</i> . Отсутствие следов влаги	По п. 2	По п. 2, но при заполнении маслом без вакуума обязателен прогрев током 1,25 номинального до 80°C	По п. 1

Примечания: 1. Для трансформаторов по пп. 2 — 4 обязательна окончательная заливка маслом при установленном расширителе не позже чем через 3 мес. после отправки их с завода.

2. Для трансформаторов 220 *кв*, транспортируемых согласно п. 4, при монтаже обязательна заливка маслом под вакуумом около 60 *см* рт. ст. (с усилением крышки специальной балкой). Для трансформаторов 110 *кв*, транспортируемых согласно п. 4, обязательна заливка под вакуумом 35 *см* рт. ст. предварительно вакуумированным маслом (с применением промежуточного бачка).

условия даны в зависимости от типа трансформатора и способа его транспортирования.

Трансформаторы на 110 и 220 *кв*, отправляемые на место установки незалитыми маслом (в баках, заполненных воздухом), независимо от результатов испытания, герметичности уплотнения и других показателей мы рекомендуем про-

гревать в масле до 70°C , хотя этот прогрев и не обязателен согласно Временной инструкции № 1/55, утвержденной Техническим управлением МЭП. Эта рекомендация вызвана тем, что вследствие трудностей сохранения герметичности уплотнения временных крышек таких трансформаторов, особенно при транспортировке, может произойти обмен воздуха в баке и, как следствие, — поверхностное или даже местное увлажнение изоляции, которое не может быть найдено или устранено без нагрева. О том, что увлажнение может иметь место и при отсутствии нарушений в уплотнении, испытываемых избыточным давлением воздуха, показывают приведенные на рис. 8 результаты прогрева трансформатора типа ОДТГ-30000/220 (фаза № 635343). Эта фаза при измерениях в холодном состоянии показала по сравнению с двумя другими фазами повышенное значение $\text{tg } \delta$ для обмоток СН и НН. Фаза была подвергнута нагреву током к. з., равным 1,25 номинального до температуры верхних слоев масла 80°C с выдержкой при этой температуре в течение 34 *час*. Как показывают кривые рис. 8, изоляция обмоток СН и НН после прогрева значительно улучшилась.

Измерения, произведенные в режиме остывания после прогрева (табл. 6), показали, что значения сопротивления изоляции обмоток близки к данным протокола заводского испытания.

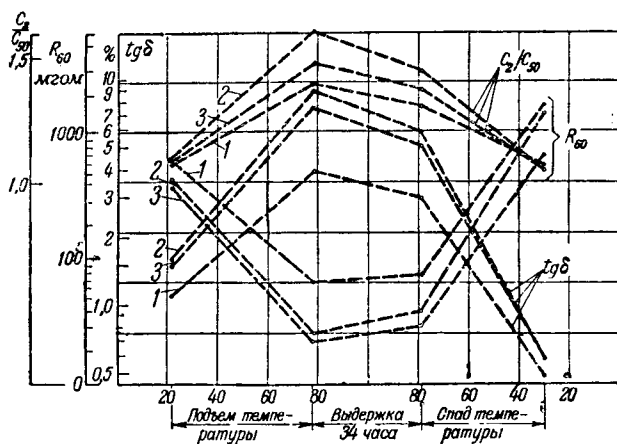


Рис. 8. Изменение отношения $\frac{C_2}{C_{10}}$, сопротивления изоляции R_{60} и $\text{tg } \delta$ обмоток ВН, СН и НН трансформатора типа ОДТГ-30000/220 в результате длительного прогрева в масле при 80°C .

1 — обмотка ВН; 2 — СН; 3 — НН.

Таблица 6

Изменение показателей $\text{tg } \delta$, $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ обмоток трансформатора типа ОДТГ-30000/220 после длительного прогрева в масле при 80° С

Условия измерения	Температура, °С	Испытываемая обмотка	Сопротивления изоляции, м.ом		$\frac{R_{60}}{R_{15}}$	$\frac{C_2}{C_{50}}$	tg δ , %
			R ₁₅	R ₆₀			
Измерено на монтаже до прогрева	22	В—К	450	650	1,44	1,08	1,1
		С—К	300	460	1,54	1,095	1,6
		Н—К	270	400	1,49	1,09	1,4
То же, но после прогрева в процессе остывания	30	В—К	1 200	1 800	1,60	1,07	0,5
		С—К	900	1 600	1,78	1,06	0,6
		Н—К	700	1 200	1,72	1,06	0,6
То же	65	В—К	180	230	1,28	1,20	1,75
		С—К	100	122	1,22	1,27	3,0
		Н—К	68	85	1,25	1,24	2,85
На заводе после прогрева перед испытанием повышенным напряжением	66	В—К	140	190	1,35	—	—
		С—К	100	125	1,25	—	—
		Н—К	65	90	1,38	—	—

Таблица 7

Результаты испытания моделей межкатушечной изоляции обмоток 220 кВ (конструкция без шайб)

№ п/п	Технология обработки	Номер модели	tg δ обмотки		Пробивное напряжение канала (действующее значение), кВ		
			при температуре, °С	%	минимальное	максимальное	среднее
1	Без пропитки лаком и сушки выдерживались в холодном масле 24 . . . 32 часа и в нагретом масле 0,5 часа Температура масла 55 . . . 60° С	3	61	> 50	35	40	37
		4	56	30	39	60	46
2	Пропитывались лаком и запекались. Сушились и пропитывались маслом по заводской инструкции. Затем выдерживались в воздухе 8 . . . 12 час. Вторично пропитывались маслом без вакуума в течение 24 . . . 32 час, включая время нагрева масла. Температура масла 75 . . . 85° С	2	82	4,6	49,5	65	56
		25	80	4,0	45,2	67,5	54,4
3	По п. 2, но со вторичной пропиткой маслом 10 час, включая нагрев масла и прогрев обмотки при плотности тока 5,4 а/мм ² (1,5 номинальной). Температура масла 75 . . . 85° С	27	70	2,9	57,0	77,5	66,9
		23	78	4,5	66,0	97,5	85,9
		24	80	4,0	75	95,0	84,4
4	По п. 2, но пропитка под вакуумом в испытательном баке, помещенном в вакуумсушильный шкаф. После вакуумировки модели не вынимались из бака. Температура масла 75 . . . 85° С	26	70	3,1	65	97,5	83,1
		15	80	3,8	80	85	84
5	По п. 4, но температура масла при испытании 17 . . . 27° С	14	15	0,5	62,5	75	71,3

Примечание. При испытаниях по пп. 1 и 2 наблюдалось выделение пузырьков воздуха из масла.

Прогрев трансформаторов, в особенности трансформаторов на 220 кВ, перед включением в работу является существенно важным для удаления воздушных включений (пузырьков воздуха) из лабиринтов изоляции, появляющихся при заливке трансформатора маслом. Об эффективности удаления воздушных включений из изоляции путем прогрева свидетельствуют результаты испытания повышенным напряжением моделей

межкатушечной изоляции обмотки 220 кВ, приведенные в табл. 7.

Как видно из табл. 7, при прогреве и плотности тока 5,4 а/мм² минимальная пробивная прочность канала возросла не менее чем на 44%, а средняя пробивная прочность — на 43%.

Выводы. 1. Как показали результаты исследования, указания и нормы эксплуатационного циркуляра З/Э позволяют включать увлажненные

трансформаторы без сушки. Этот циркуляр имеет следующие дефекты:

1) Допускает включение трансформаторов любых мощностей и напряжений на основании контроля в холодном состоянии общей увлажненности изоляции относительно корпуса и между обмотками, не считаясь с возможностью местных увлажнений изоляции (витковой, межкатушечной, междуфазовой и др.).

2) Как показали наши исследования, принятое циркуляром в качестве основного критерия для оценки общего увлажнения отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$, определяемое при 10...20°С, недостаточно чувствительно и поэтому зачастую может привести к неправильному заключению.

3) Циркуляром нормированы завышенные значения показателей $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\frac{C_2}{C_x}$ и $\text{tg } \delta$. Нормы даны одинаковые для трансформаторов всех мощностей и напряжений независимо от их состояния (новый или бывший в эксплуатации). В эти нормы могут укладываться показатели увлажненных трансформаторов.

2. Определение общего увлажнения изоляции трансформатора в холодном состоянии (10...20°С) по измерениям сопротивления изоляции R_{15} , R_{60} и отношению $\frac{R_{60}}{R_{15}}$, а также по отношению емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ является ненадежными

и, как показывают проведенные испытания, в отдельных случаях дает неверные результаты. По этим измерениям можно получить более достоверные результаты только в нагретом состоянии трансформатора.

Более надежным и достаточно чувствительным методом контроля общей увлажненности изоляции в холодном состоянии (при положительных температурах) является измерение $\text{tg } \delta$ обмоток. Для учета влияния свойств трансформа-

торного масла на результаты измерений следует контролировать $\text{tg } \delta$ масла, которым залит трансформатор.

3. Помимо контроля общего увлажнения изоляции, для решения вопроса о допустимости включения трансформатора без сушки необходимо также убедиться в отсутствии местных увлажнений в изоляции. Для этой цели возможно применение косвенных методов испытаний (проверка герметичности уплотнений, пробивного напряжения масла или остатков масла и др.).

4. Как показывает опыт монтажа трансформаторов 110 и 220 кв, прогрев в масле при 70...80°С является эффективным средством устранения неглубокого увлажнения изоляции, возникающего при транспортировании или хранении трансформатора вследствие несовершенства уплотнений или по другим причинам. Прогрев током обмоток трансформатора желателен для эффективного устранения увлажнений в продольной (витковой) изоляции, а также для удаления воздушных включений из лабиринтов изоляции.

Литература

1. НКЭП, Главэлектромашпром. Инструкция по монтажу, сушке и включению трансформаторов. Госэнергоиздат, 1941.
2. Техническое управление МЭС. Эксплуатационный циркуляр 3/Э. Определение необходимости сушки трансформаторов, апрель 1951.
3. Л. Г. Мамиконянц. Контроль влажности изоляции электрических машин и трансформаторов по изменению емкости их обмоток. Электрические станции, № 4, 1947.
4. В. Б. Кулаковский. Контроль влажности изоляции по методу емкость — частота. Электричество, № 2, 1951.
5. И. А. Сыромятников. Определение степени увлажненности и сушка трансформаторов и генераторов. Электричество, № 8, 1952.
6. W. L. Teague и M. H. Mc Whirter. Диэлектрические измерения новой изоляции силовых трансформаторов. Тр. АИЕЕ, ч. III, стр. 743, 1952.
7. Б. Б. Гельперин. Новый метод определения влажности изоляции. Электрические станции, № 6, 1945.

[16. 10. 1954]



О способах оценки увлажненности трансформаторов

Инж. С. А. ГОРОДЕЦКИЙ

Трест „Кавэлектромонтаж“ Минметаллургхимстроя

В связи со статьей А. К. Ашрятова «О включении трансформаторов без сушки» нами здесь изложены основные соображения по вопросу о возможности применения метода «емкость — частота» и метода абсорбции для целей контроля влажности изоляции трансформаторов. Кроме того, рассмотрены основные условия включения трансформаторов без сушки, сформулированные на базе нашего опыта включения без сушки трансформаторов на различные напряжения на общую мощность 1,5 млн. квт.

Контроль влажности изоляции по методу емкость — частота. Весьма существенное влияние на

результаты измерений $\frac{C_2}{C_{50}}$ оказывает температура, при которой производятся измерения. Между тем ни в одной из позиций табл. 1, на которой А. К. Ашрятов главным образом базируется при оценке возможностей метода емкость — частота, даже ориентировочно не указаны значения температур, при которых производились измерения, что является существенным недостатком этой таблицы и делает спорными выводы автора.

Относительно трансформаторов поз. 1, табл. 1 В. Б. Кулаковский указывает [Л. 1], что измерения этих трансформаторов производились при

температуре обмоток 12... 25° С. «Измерения показали, — пишет В. Б. Кулаковский, — что 85% всех трансформаторов имеют максимальное значение $\frac{C_2}{C_{50}}$ ниже 1,2, для остальных — оно лежит в пределах 1,2... 1,3».

Наличие этих пояснений позволяет сказать, что измерения для трансформаторов поз. 1 дали положительные результаты, подтверждающие целесообразность применения метода емкость — частота.

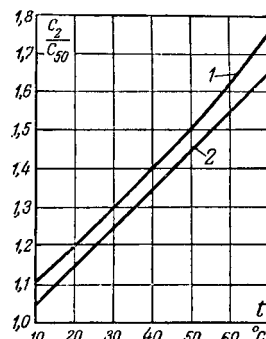
Отсутствие данных относительно температуры и результатов измерения изоляции другими способами не позволяет сделать какие-либо выводы в отношении поз. 3, а также 4, для которых нет данных ни о температуре, ни о степени увлажненности. Между тем на основании поз. 3 и 4 табл. 1 А. К. Ашрятов приходит к выводу, что заведомо увлажненные трансформаторы имели значения $\frac{C_2}{C_{50}}$, значительно превосходящие 1,3.

В табл. 2 А. К. Ашрятов приводит значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\text{tg } \delta$ для 16 трансформаторов, прошедших сушку на Московском трансформаторном заводе. Данные табл. 2 показывают, что после сушки $\frac{C_2}{C_{50}}$ значительно снижается, и ни в одном случае это отношение не превосходит значения 1,11 для обмоток высшего напряжения и 1,15 для обмоток низшего напряжения при $t = 25... 28^\circ \text{C}$. Это обстоятельство указывает на возможность применения метода емкость — частота совместно с другими изоляционными измерениями $\left| \frac{R_{60}}{R_{15}}, \text{tg } \delta \right|$ для контроля увлажненности обмоток трансформаторов и служит подтверждением целесообразности внедрения прибора для контроля влажности изоляции (ПКВ).

К другому выводу приводят данные табл. 2 А. К. Ашрятова. Автор указывает, что измерения показали малую чувствительность отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ к увлажнению. В подтверждение А. К. Ашрятов приводит также результаты измерений отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и других величин на моделях межкатушечной изоляции, емкость которых не превышает 900 пф. По этому поводу следует отметить, что конструкция приборов ПКВ, особенно в 1948—1952 гг., не позволяла контролировать увлажнение трансформаторов, емкость которых меньше 1000 пф [Л. 4]. Поэтому результаты измерений на указанных моделях, а следовательно, и выводы А. К. Ашрятова в этой части нам представляются сомнительными.

Практика применения метода емкость — частота позволяет утверждать обратное: отношение емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ в сочетании с данными других измерений изоляции достаточно четко характе-

Рис. 1. Предельные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ для неувлажненных трансформаторов на номинальное напряжение до 35 кВ включительно (кривая 1) и на напряжение 110 кВ (кривая 2) (при измерениях в масле $\text{tg } \delta$ масла не должен превышать 1% при $t = 20... 30^\circ \text{C}$).



ризует увлажненность изоляции трансформаторов [Л. 1, 3—9].

Отмечая, что увеличение температуры повышает чувствительность отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ к увлажнению, А. К. Ашрятов приходит к выводу, что данные измерения $\frac{C_2}{C_{50}}$ при температурах до 30° С могут привести к ложным выводам. Между тем результаты измерений $\frac{C_2}{C_{50}}$ для неувлажненной изоляции, произведенных на большой группе трансформаторов (включая трансформатор, приведенный А. К. Ашрятовым на рис. 1), показали, что между этим отношением и температурой существует линейная зависимость. Поэтому нет необходимости для измерения $\frac{C_2}{C_{50}}$ подогревать трансформатор до 60... 70° С.

Приведенные на рис. 1 настоящей статьи предельные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ в зависимости от температуры для неувлажненных трансформаторов разных напряжений подтверждаются данными практики. Эти кривые дают возможность производить измерения $\frac{C_2}{C_{50}}$ при температурах порядка 10... 30° С, что подтверждается также результатами измерения этого отношения на большой группе трансформаторов различных мощностей (см. таблицу). Изоляция трансформаторов была одновременно измерена другими способами.

Метод емкость — частота, равно как и метод $\text{tg } \delta$, мало чувствителен к местным дефектам изоляции, что является их недостатком. Имели место случаи, когда при удовлетворительных отношениях $\frac{C_2}{C_{50}}$ измерением абсолютного 60-секундного значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции выявлялся местный дефект изоляции. Поэтому метод емкость — частота должен обязательно применяться в сочетании с другими изоляционными измерениями, в первую очередь совместно с методом абсорбции, что неоднократно отмечалось [Л. 1, 2, 5, 6, 7, 9].

Приведенные А. К. Ашрятовым данные совершенно недостаточны для того, чтобы отказаться от применения метода емкость — частота для контроля влажности изоляции обмоток трансформаторов. Шестилетний опыт применения этого ме-

Результаты испытания изоляции обмоток трехфазных трансформаторов, включенных без сушки и подогрева

Трансформатор	Число трансформаторов данного типа	Температура обмотки при измерении, °С	$\frac{R_{60}}{R_{15}}$	$\frac{C_2}{C_{50}}$	tg δ	Пробивное напряжение масла, кВ
40 500 кВа, 110/10 кВ	2	20 22	1,8	1,05 1,08	0,3	50 52
		20 22	1,5 3	1,03 1,04	0,4 0,45	
31 500 кВа, 110/35/6 кВ	6	15 25	1,75 2,2	1,03 1,1	0,3 0,7	42 55
		15 25	1,6 2,0	1,04 1,15	0,6 1	
30 000 кВа, 110/6 кВ	1	20	1,5	1,17	1,2	44
		20	1,4	1,15	1,4	
20 000 кВа, 110/35/6 кВ	8	10 25	1,7 2,0	1,05 1,18	0,4 0,7	43 51
		10 25	1,4 2,0	1,06 1,09	0,2 1,3	
15 000 кВа, 110,35/6 кВ	10	15 30	1,5 1,9	1,05 1,1	0,2 0,7	42 45
		15 30	1,35 2,0	1,05 1,15	0,4 1,1	
Автотрансформатор						
12 800 кВа, 35,30 кВ	2	10 12	1,6 1,8	1,03 1,05	0,2 0,4	42
10 000 кВа, 110/35,6 кВ	12	10 30	1,5 2,0	1,04 1,1	0,7 0,92	40 46
		10 30	1,4 1,9	1,05 1,15	0,5 1,3	
Автотрансформатор						
9 620 кВа, 10,5 кВ	7	10 15	1,45 1,7	1,05 1,08	—	40 45
9 620 кВа, 10,5/0,8 кВ	7	10 15	1,5 1,8	1,04 1,1	—	40 44
Автотрансформатор						
9 350 кВа, 6,3 кВ	6	18 30	1,4 1,65	1,05 1,12	—	38 42
9 350 кВа, 6,3/0,77 кВ	7	20 30	1,4 1,8	1,06 1,15	—	41 44
7 500 кВа, 35/6 кВ	15	12 30	1,6 2	1,03 1,11	0,7 1,1	41 49
6 300 кВа, 35/6 кВ	4	10 20	1,6 1,8	1,02 1,08	—	42 46
5 600 кВа, 35/6 кВ	30	10 20	1,54 2,1	1,02 1,1	0,2 0,7	41 52
5 000 кВа, 20/6 кВ	1	10	1,6	1,08	—	40
4 200 кВа, 22/6 кВ	1	30	2	1,2	—	38
		30	1,86	1,24	—	
3 500 кВа, 30/0,8 кВ	4	10 15	1,4 1,7	1,08 1,20	0,4 0,9	42 47
3 200 кВа, 35,6 кВ и		15 30	1,4 1,8	1,06 1,15	—	40 50
6/1,5 кВ	20	15 30	1,32 1,7	1,05 1,17	—	
1 800 кВа, 35/10 кВ и 35/6 кВ	15	10 25	1,45 1,8	1,05 1,11	—	41 50
		10 25	1,3 1,9	1,06 1,16	—	
1 250 кВа, 6/0,4 кВ	4	15 20	1,5 2	1,05 1,12	—	38 43
1 090 кВа, 6/0,7 кВ	20	15 25	1,4 1,85	1,06 1,18	—	40 52
1 000 кВа, 10,0,4 кВ и						
6/0,4 кВ	52	7 35	1,3 2,1	—	—	35 54
Итого		234 трансформатора общей мощностью 1 544 280 кВа.				

Примечание. В тех позициях таблицы, где приведены данные двух измерений, верхняя строка относится к обмотке ВН а нижняя — к обмотке НН.

тогда показывает, что этот метод в сочетании с другими измерениями оправдал себя и его следует применять и в дальнейшем при решении вопроса о возможности включения силовых трансформаторов без сушки.

Метод абсорбции. Последние 3 года контроль влажности изоляции обмоток трансформаторов методом абсорбции совместно с другими изоляционными измерениями успешно применяется энергосистемами и монтажными организациями [Л. 6—9]. К сожалению, А. К. Ашрятов, несмотря на большие возможности измерения коэффициента абсорбции в различных условиях для трансформаторов всех габаритов, не рассмотрел возможности применения этого метода МТЗ. По существу, автор ограничился утверждениями, что: 1) измерения абсолютных значений R_{15} и R_{60} и отношения $\frac{R_{30}}{R_{15}}$ при температурах порядка 10...20°С могут давать нестабильные ре-

зультаты; 2) измерение абсолютного значения R_{60} , а также $\frac{R_{30}}{R_{15}}$ в холодном состоянии в ряде случаев может показать удовлетворительное состояние изоляции заведомо увлажненных трансформаторов.

На рис. 7 А. К. Ашрятов привел результаты измерений коэффициента абсорбции для обмоток ВН и НН неувлажненных трансформаторов напряжением 220 кВ различных типов, для которых он отмечает большой разброс значений $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ при 10...20°С. Выводы А. К. Ашрятова, сделанные на основании результатов измерения $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ на моделях межкатушечной изоляции, ввиду малых размеров этих моделей вызывают сомнения, так же как и выводы в отношении измерения $\frac{C_2}{C_{50}}$. Измерения коэффициента абсорбции

на большой группе трансформаторов, несмотря на значительный разброс значений $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ при 10...30°С, позволяют установить предельно допустимые коэффициенты абсорбции для неувлажненных трансформаторов. Согласно таблице настоящей статьи коэффициент абсорбции неувлажненных трансформаторов был в пределах 1,3...3,0, а для большинства трансформаторов он достигал 1,5...1,8 при 10...30°С.

На рис. 2 настоящей статьи приведены кривые абсорбции обмоток высшего напряжения до и после сушки. На основании данных практики можно считать, что для вновь вводимых в эксплуатацию силовых трансформаторов при неувлажненной изоляции и температуре порядка

10...30°С коэффициент абсорбции $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ должен быть не менее: 1) 1,3 для трансформаторов напряжением 35 кВ и ниже и 2) 1,5 для трансформаторов напряжением 110 кВ.

Это увязывается также с результатами измерений, приведенными А. К. Ашрятовым на рис. 7, где для трансформаторов напряжением 220 кВ при 20...30°С коэффициенты абсорбции находятся в пределах 3,1...2,8 для обмоток высшего напряжения и 1,65...1,55 — для обмоток низшего напряжения.

Следует подчеркнуть, что метод абсорбции только в том случае дает надежные результаты, если приняты все меры для устранения поверхностной утечки с выводов трансформаторов. Уместно напомнить, что не только в условиях монтажа, но и на заводах, изготавливающих трансформаторы, имели место случаи измерения сопротивления изоляции обмоток со значительными погрешностями [Л. 7]. Эти обстоятельства часто упускают из виду, что приводит к неправильным выводам о результатах измерений, произведенных методом абсорбции.

По нашему мнению, коэффициент абсорбции является одним из основных критериев для оценки увлажненности изоляции трансформаторов. По этому способу хорошо выявляются местные увлажнения или дефекты изоляции. И в тех случаях, когда результаты измерения отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ (или $\text{tg } \delta$) являются удовлетворительными, а R_{60} и коэффициент абсорбции $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ имеют явно заниженные значения, то причиной чаще всего является сосредоточенное увлажнение в какой-либо детали или местный дефект изоляции трансформатора. При неувлажненной изоляции трансформатора $\frac{R_{60}}{R_{15}}$, $\text{tg } \delta$ и $\frac{C_2}{C_{50}}$ находятся в допустимых пределах и, как это следует из таблицы настоящей статьи, между собой увязываются.

Изложенное показывает, что метод абсорбции, успешно применяемый в сочетании с другими изоляционными измерениями для решения вопроса о возможности включения трансформаторов без

сушки и подогрева, не нашел по существу должного отражения в статье А. К. Ашрятова. Выводы автора, что при измерениях в холодном состоянии отношение $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ может показать удовлетворительное состояние изоляции на увлажненных трансформаторах, совершенно не обоснованы и опровергаются практикой применения этого метода.

Основные условия включения трансформаторов без сушки. В табл. 5 А. К. Ашрятов привел основные условия, выполнение которых необходимо для включения трансформаторов без сушки. При сопоставлении этих условий с данными нашей практики, а также «Инструкцией по оценке влажности изоляции трансформаторов перед вводом в эксплуатацию и условиями включения их без сушки», опубликованной в начале 1955 г. [Л. 10] взамен эксплуатационного циркуляра 3/Э, можно сделать следующие замечания:

1. Из числа обязательных испытаний автором исключено определение отношения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и вместо этого предложено измерение угла диэлектрических потерь в изоляции обмоток ($\text{tg } \delta$) для всех трансформаторов мощностью 2400 кВА и выше независимо от напряжения. Как показал опыт, вместо определения $\text{tg } \delta$ обмоток трансформаторов во многих случаях можно ограничиться измерениями емкости при двух частотах приборов ПКВ. Это обстоятельство отмечено было также в докладах М. В. Хомякова (Мосэнерго) и В. Н. Звездкина (Ленэнерго) на второй научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной изоляции в ноябре 1953 г. [Л. 11]. Следует учесть, что подготовка к измерениям, а также измерения $\frac{C_2}{C_{50}}$ прибором ПКВ производятся значительно проще, чем измерения $\text{tg } \delta$ высоковольтным мостом типа МД-16. По нашему мнению, измерения $\text{tg } \delta$ обмоток трансформаторов следует производить для трансформаторов напряжением 110 кВ и выше в случае отсутствия прибора ПКВ или других каких-либо сомнительных случаях.

Для трансформаторов напряжением до 35 кВ включительно вместо измерения $\text{tg } \delta$ обмоток можно ограничиться определением отношений $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ и $\frac{C_2}{C_{50}}$ при 10...30°С.

2. В графе «Измерение R_{60} , R_{15} и $\text{tg } \delta$ обмоток» в поз. 2 для отношения $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ допуск не

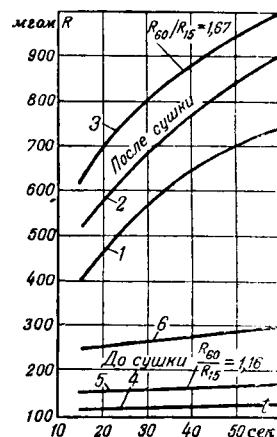


Рис. 2. Кривые абсорбции обмоток высшего напряжения до (1, 2, 3) и после (4, 5, 6) сушки трансформаторов при $t = 15 \dots 30^\circ\text{C}$: 1, 4 — трансформаторы 3200 кВА, 35/0,8 кВ; 2, 5 — 1800 кВА, 35/6 кВ; 3, 6 — 1000 кВА, 6/0,4 кВ.

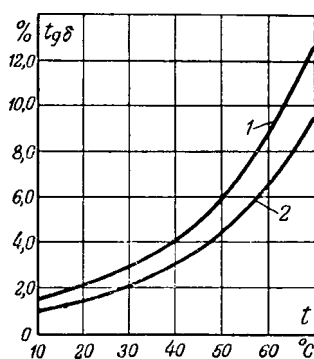


Рис. 3. Предельные значения $\text{tg } \delta$ для неувлажненных трансформаторов на номинальное напряжение до 35 кВ включительно (кривая 1) и на напряжение 110 кВ (кривая 2) (при измерениях в масле $\text{tg } \delta$ масла не должен превышать 1% при $t=20 \dots 30^\circ \text{C}$).

указан. По аналогии с указаниями „Инструкции по оценке влажности изоляции трансформаторов“ [Л. 10] следует считать, что и в данном случае производится измерение коэффициента абсорбции, а при решении вопроса о допустимости включения трансформатора без сушки эта величина во внимание не принимается. Таким образом, новые методы контроля влажности изоляции: емкость — частота и метод абсорбции, оправдавшие себя в практической деятельности большого числа организаций и предприятий и рекомендованные в ноябре 1953 г. решениями Второй научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной изоляции, исключены из предложенной А. К. Ашрятовым табл. 5 и „Инструкции по оценке влажности изоляции трансформаторов“, выпущенной большим тиражом.

С этим нельзя согласиться. Отсутствие в протоколах заводского испытания результатов контроля влажности изоляции методами емкость — частота и абсорбции крайне осложняет измерения на месте монтажа и в эксплуатации, так как исключается возможность сопоставления результатов измерений с протоколом заводского испытания.

3. Для всех трансформаторов по поз. 2... 4 табл. 5 в случае неудовлетворительных результатов измерения R_{60} и $\text{tg } \delta$ в холодном состоянии А. К. Ашрятов рекомендует производить повторные измерения этих величин после прогрева в масле до 70°C . Между тем при неудовлетворительных результатах измерения в холодном состоянии (при температурах порядка $10 \dots 30^\circ \text{C}$) целесообразно провести повторные измерения при низшей из температур, указанных в протоколе заводского испытания, и сопоставить их с результатами измерения на монтаже в соответствии с указаниями, приведенными в Инструкции [Л. 10]. При неудовлетворительных результатах повторных измерений следует осуществить прогрев трансформатора в масле при $60 \dots 70^\circ \text{C}$.

4. В графе «Испытание пробы масла», пп. 1 и 2, приведены завышенные значения пробивного напряжения масла. Вместо них следует привести указания п. 14,6 Инструкции. До включения трансформатора в эксплуатацию пробивное напряжение масла должно быть не ниже значений, предусмотренных § 974 ПТЭ.

5. В графе „Прогрев в масле до 70°C “ следует указать, что, кроме измерения R_{60} и $\text{tg } \delta$ обмоток, производится также определение $\frac{C_2}{C_x}$ и пробивного напряжения масла до и после нагрева.

А. К. Ашрятов отмечает, что отношение $\frac{C_2}{C_x}$ для неувлажненной изоляции близко к единице, причем в 59 из 70 случаев значения $\frac{C_2}{C_x}$ находились в пределах $1,0 \dots 1,05$. На основании нашего опыта применения метода емкость — температура для неувлажненной изоляции трансформатора могут быть приняты следующие соотношения для $\frac{C_2}{C_x}$: $\frac{C_{70}}{C_{20}} \leq 1,2$ для трансформаторов напряжением 35 кВ и ниже; $\frac{C_{70}}{C_{20}} \leq 1,15$ для трансформаторов на 110 кВ. Эти данные справедливы, если $\text{tg } \delta$ масла не превышает 1% при $20 \dots 30^\circ \text{C}$.

Снижение пробивного напряжения масла после прогрева, как известно, должно быть не более 15% значения, полученного до нагрева.

6. Графу «Испытание пробы масла», поз. 4, следует дополнить указаниями, приведенными в п. 20,г Инструкции.

7. При оценке влажности изоляции трансформатора часто возникает необходимость руководствоваться не только сопоставлением результатов измерений на монтаже с протоколами заводского испытания, но и нормативами, устанавливающими значения предельного увлажнения изоляции трансформаторов.

Предельные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\text{tg } \delta$ в зависимости от температуры для неувлажненной изоляции трансформаторов приведены на рис. 1 и 3 настоящей статьи; значения $\frac{C_2}{C_x}$ и $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ указаны выше.

В связи с выводами, сделанными А. К. Ашрятовым в отношении эксплуатационного циркуляра 3/Э [Л. 2], приводим некоторые соображения, связанные с практикой применения этого циркуляра. Необходимо отметить, что выпуск Техническим управлением МЭС в 1951 г. эксплуатационного циркуляра 3/Э способствовал широкому внедрению включения трансформаторов без сушки.

Применение циркуляра в течение 3 лет дало возможность выявить следующие его недостатки:

1. Метод емкость — частота $\left(\frac{C_2}{C_{50}}\right)$ не может служить основным критерием для оценки общего увлажнения изоляции трансформатора. Этот метод должен применяться только в сочетании с другими изоляционными измерениями.

2. Коэффициент абсорбции как один из основных критериев для оценки увлажнения изоляции

трансформатора не нашел должного отражения в циркуляре¹.

3. Предельные значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\frac{C_2}{C_x}$ приведены в циркуляре независимо от номинального напряжения трансформаторов.

4. В циркуляре не указаны минимальные допускаемые значения пробивного напряжения масла для неувлажненных обмоток трансформаторов.

Выводы. 1. Эксплуатационный циркуляр 3/Э, несмотря на его недостатки, способствовал широкому внедрению включения трансформаторов без сушки. При наличии данных о включении без сушки (на основании циркуляра 3/Э) большого числа трансформаторов различных напряжений и мощностей нам не известно ни одного случая включения без сушки увлажненного трансформатора.

2. Несмотря на недостатки метода емкость — частота, мы считаем, что этот метод, в сочетании с другими изоляционными измерениями, оправдал себя на практике и его следует применять и в дальнейшем при решении вопроса о возможности включения силовых трансформаторов без сушки.

3. Коэффициент абсорбции является одним из основных критериев для оценки увлажненности изоляции трансформаторов. Следует продолжить работу по определению отношения $\frac{R_{30}}{R_{15}}$ для трансформаторов всех напряжений как в масле, так и в воздухе, для чего необходим выпуск мегомметров со шкалой до 15 000 мгом.

4. В протоколах заводских испытаний необходимо указывать отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$ и коэффициент абсорбции при 10...30°С для трансформаторов всех габаритов.

5. Учитывая, что нагрев трансформаторов при монтаже, в особенности при большой их мощности, является трудоемкой операцией [Л. 12], следует прибегать к нему лишь в необходимых слу-

чаях: при нарушении герметичности уплотнений (для трансформаторов напряжением 110 кВ и выше), неудовлетворительных результатах измерений изоляции в холодном состоянии или при низшей из температур, указанных в протоколе заводского испытания.

Литература

1. В. Б. Кулаковский. Контроль влажности изоляции по методу «емкость — частота». Электричество, № 2, 1951.
2. Техническое управление МЭС. Эксплуатационный циркуляр 3/Э. Определение необходимости сушки трансформаторов, апрель 1951.
3. В. К. Звездкин. Опыт применения прибора для контроля влажности обмоток трансформаторов в Ленэнерго. Электрические станции, № 8, 1950.
4. В. Я. Монин и А. И. Сапожников. Применение прибора для контроля влажности обмоток трансформаторов в Молотовэнерго. Электрические станции, № 8, 1950.
5. В. К. Кулаковский. Применение прибора для контроля влажности изоляции трансформаторов. Электрические станции, № 3, 1951.
6. Н. П. Фурфин. Контроль влажности изоляции силовых трансформаторов. Электрические станции, № 1, 1952.
7. С. А. Городецкий. Применение метода абсорбции для контроля влажности изоляции обмоток трансформаторов. Электрические станции, № 8, 1952.
8. И. А. Сыромятников. Определение степени увлажненности и сушка трансформаторов и генераторов. Электричество, № 8, 1952.
9. С. А. Городецкий. Применение метода абсорбции для контроля влажности изоляции обмоток трансформаторов. Рабочий энергетик, № 2, 1953.
10. Министерства электротехнической промышленности, электростанций и строительства электростанций СССР. Инструкция по оценке влажности изоляции трансформаторов перед вводом в эксплуатацию и условия включения их без сушки. Госэнергоиздат, 1955.
11. Труды Второй научно-технической сессии по эксплуатации высоковольтной изоляции. Госэнергоиздат, 1955.
12. С. А. Городецкий. Определение увлажненности изоляции трансформаторов. Электрические станции, № 10, 1953.

¹ Эта недооценка коэффициента абсорбции допущена также и нами в двух статьях [Л. 7 и 9].



Вопросы включения трансформаторов без сушки в свете практики

Инженеры А. П. КАРАМЗИН, Я. С. КОЛИН, А. М. МАРИНОВ и Л. М. РАУЗИН

ГлавураЛЭнерго

До 1951 г. инструкции Министерства электростанций и заводов-изготовителей требовали, чтобы силовые трансформаторы, транспортируемые к месту их монтажа незалитыми маслом, подвергались перед включением их в эксплуатацию режиму сушки или прогреву.

Сушка и прогрев крупных трансформаторов на месте монтажа почти всегда связаны с большими трудностями. Например, в 1954 г. на вводимой в эксплуатацию подстанции по требованию персонала завода-поставщика проводился прогрев трансформаторных фаз 220/115/10 кВ мощностью по 40 тыс. кВА. Для осуществления схемы прогрева потребовалось на одной районной подстанции выделить трансформатор 31 500 кВА и освободить систему шин 110 и 35 кВ, а на другой подстанции — занять систему шин 110 кВ, а также использовать две транзитные линии 110 кВ. Тем самым схема крупного сетевого узла была на 4 суток приведена в ненадежное состояние. Часто трансформаторы поступают на монтажную площадку незадолго до срока их ввода, и тогда важно сократить по возможности длительность и объем проверочных работ и своевременно включить новую мощность. В силу этих обстоятельств велись поиски способов, позволяющих включать вполне исправные, сухие трансформаторы без сушки или контрольного прогрева.

Эксплуатационный циркуляр 3/Э Министерства электростанций на основе опыта эксплуатации и методов, разработанных ЦНИЭЛ, дал возможность проверять увлажненность изоляции трансформаторов при 10 ... 20° С, что в большинстве случаев освобождало от необходимости сушки или прогрева вводимых трансформаторов.

Основываясь на результатах исследований МТЗ, А. К. Ашрятов утверждает, что методы измерений трансформаторов в холодном состоянии, рекомендованные циркуляром 3/Э, недостаточны и позволяют включать в эксплуатацию увлажненные трансформаторы. Автор считает, что для устранения поверхностного увлажнения и удаления воздушных включений необходимо подвергать трансформаторы нагреву перед вводом в эксплуатацию. В обоснование своих рекомендаций автор не смог привести фактов выхода из строя трансформаторов по причине включения их в эксплуатацию в увлажненном состоянии.

Между тем естественно возникают следующие вопросы:

1. До какой степени должен быть высушен трансформатор.

2. Представляет ли опасность для надежной работы трансформатора некоторое увлажнение обмоток во время транспортировки с завода и хранения на монтажной площадке.

3. Есть ли необходимость в затратах сил, средств и времени на сушку или прогрев трансформаторов, удовлетворяющих по своему состоянию требованиям циркуляра 3/Э.

Обратимся к фактам, известным из практики.

В одной из энергосистем, начиная с 1951 г. (после выхода в свет циркуляра 3/Э) решения о возможности включения трансформаторов без сушки принимались на основании измерений в холодном состоянии согласно циркуляру 3/Э. С 1951 г. без прогрева и сушки было введено в эксплуатацию 15 трансформаторов 110 кВ мощностью 7,5—31,5 тыс. кВ. Все трансформаторы, введенные в эксплуатацию, работают нормально и повреждений не имели.

Следовательно, опыт эксплуатации не подтверждает вывода автора о непригодности методов, рекомендованных циркуляром 3/Э. Наоборот, этот опыт позволяет заключить, что циркуляр 3/Э правильно ориентирует монтажный и эксплуатационный персонал в определении опасной степени увлажнения трансформаторов и дает возможность упростить и ускорить ввод трансформаторов в эксплуатацию. По отдельным вопросам, затронутым в статье А. К. Ашрятова, следует высказать ряд замечаний.

О местном и поверхностном увлажнении изоляции трансформаторов в связи с транспортировкой и хранением их. Опасность местного увлажнения изоляции, на которую ссылается автор, значительно преувеличена. Если трансформатор на заводе хорошо высушен, то при сохранении герметичности бака следует считать местное увлажнение исключенным. Оно возможно лишь в случае непосредственного попадания влаги на выемную часть трансформатора через явные неплотности, что является крайне редким. На одной из подстанций недавно были введены в эксплуатацию три трансформаторные фазы 220 кВ по 40 тыс. кВА, которые более 1,5 лет хранились без масла; из них две фазы сохранили герметичность баков и показали хорошие результаты при контрольном прогреве.

Неглубокое увлажнение изоляции, возникшее при транспортировании или хранении, при наличии удовлетворительных показателей измерений, по нашему мнению, не может препятствовать включению трансформатора в работу. В процессе эксплуатации поверхностная влага переходит в масло, незначительно снижая его электрическую прочность.

Методы увлажнения изоляции трансформаторов, которыми пользовались на МТЗ при исследованиях, значительно отличаются от реальных условий увлажнения, что могло привести автора к ошибочным выводам.

Нам известен следующий пример: в 1944 г. прибыли по импорту четыре силовых трансформатора 35/6 кВ мощностью по 5 600 кВА. Они не были залиты маслом и находились в пути около 4 мес. с вывернутыми пробками в крышке. Ввиду удовлетворительных результатов измерений сопротивления изоляции трансформаторы были

введены в эксплуатацию без сушки и до настоящего времени работают нормально.

А. К. Ашрятов рекомендует производить прогрев трансформаторов 110 и 220 кВ для устранения неглубокого увлажнения изоляции, а также удаления воздушных включений из лабиринтов изоляции. Однако удаления воздуха можно достичь и другими способами, например путем применения вакуума при заполнении его маслом на месте монтажа.

О критериях для оценки увлажнения изоляции трансформаторов. В энергосистеме, где работают авторы, с 1948 г. успешно применяется измерение $\frac{C_2}{C_{50}}$ для оценки увлажненности изоляции. За это время прошли измерения более 150 трансформаторов напряжением 6—220 кВ включительно. Суждение о состоянии трансформаторов всегда выносилось на основании анализа показаний $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\text{tg } \delta$, R_{60} , а также результатов анализа масла и проверки герметичности трансформаторов. При этом не было отмечено противоречий между показаниями по способу $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\text{tg } \delta$.

Метод определения влажности изоляции по отношению $\frac{C_2}{C_{50}}$ проверялся в процессе сушки нескольких трансформаторов, и была установлена согласованность показаний $\frac{C_2}{C_{50}}$ с показаниями мегомметра, что убеждает в целесообразности пользования способом $\frac{C_2}{C_{50}}$.

В то же время мы считаем неправильным придавать какому-либо измерению преимущественное значение, так как ни один из известных методов не гарантирует от ошибочных заключений. Вопрос о необходимости сушки трансформаторов всегда следует решать на основе комплекса измерений $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\text{tg } \delta$ и R_{60} . Как пример недопустимости суждений о состоянии изоляции трансформатора только по одному показателю приведем следующий случай. В 1948 г. на одном промышленном предприятии длительно сушился без масла при 90°С трансформатор 2000 кВа, 6 кВ без обмена в нем воздуха. После достижения устойчивых показаний по мегомметру трансформатор хотели включать в работу, однако $\frac{C_2}{C_{50}}$, измеренное при 28°С, оказалось равным 1,8, т. е. трансформатор был влажен. Не доверяя этой оценке, его залили маслом, электрическая прочность которого через несколько суток снизилась с 45 до 25 кВ, что вынудило провести последующую сушку с вакуумом. В процессе сушки из трансформатора было удалено 1,5 л влаги, после чего $\frac{C_2}{C_{50}}$ снизилось до 1,3 при 18°С, и трансформатор был включен и безаварийно работает до сего времени.

Следует согласиться с А. К. Ашрятовым, что отношение R_{60}/R_{15} не является показателем, достаточно характеризующим изоляцию трансформатора как в увлажненном, так и в сухом состояниях. Достаточно сопоставлять сопротивление изоляции с заводскими данными для R_{60} , причем для получения стабильных результатов необходимо применять мегомметр с двигательным приводом.

Допустимые значения $\frac{C_2}{C_{50}}$ и $\text{tg } \delta$ для новых и бывших в эксплуатации трансформаторов следует дифференцировать.

Ряд работ, выполненных в последние годы, показал, что тангенс угла диэлектрических потерь масла оказывает заметное влияние на изоляционные характеристики трансформаторов. Проверка трансформаторов 220 кВ, заполненных различными маслами, показывает, что трансформаторы, которые залиты маслом с меньшими диэлектрическими потерями, имеют лучшие изоляционные характеристики. Контроль состояния масла по углу диэлектрических потерь, рекомендуемый Техническим управлением МЭС, а также МТЗ, как показывает опыт эксплуатации, должен быть регламентирован, ибо результаты измерений в значительной мере зависят от подготовки пробы к испытанию и величины напряжения. Измерение угла диэлектрических потерь изоляционного масла при помощи стандартных электродов при напряжении 1 ... 2,5 кВ при 20, 70 и 100°С в достаточной степени характеризует масло. Опыты показали, что при различной методике измерений одно и то же масло может дать различные результаты.

Запас электрической прочности изоляции трансформаторов напряжением 35 кВ и ниже относительно высок, поэтому необходимо дифференцировать требования по увлажненности перед включением в сеть для трансформаторов на разные напряжения. Для трансформаторов 35 кВ и ниже требования должны быть менее жесткими.

О согласовании методов измерений на заводе и монтажной площадке. При выяснении вопроса о необходимости сушки или прогрева нового трансформатора работники эксплуатации, монтажа и шеф-персонал сталкиваются с большими трудностями вследствие неудовлетворительного состояния документации по испытанию трансформатора на заводе. При совершенно качественной изоляции очень часто результаты измерений сопротивления изоляции на монтажной площадке не совпадают с заводскими данными. Вместо того, чтобы делать поправки на различие в методах прогрева трансформатора и при других условиях представители завода обычно требуют проведения сушки. Для исключения ненужных прогревов заводам надлежит допускать при способах прогрева, отличных от заводских, отклонения сопротивления изоляции по R_{60} до 40 ... 50%.

В настоящее время монтажный персонал располагает заводскими данными по измерению трансформатора, залитого маслом. В целях сопоставимости измерений приходится на монтажной

площадке залить трансформатор маслом, а когда обнаруживается необходимость в сушке, масло приходится спускать.

Во избежание таких излишних операций и в целях облегчения контроля и установления степени увлажнения трансформаторов, транспортируемых без масла, монтажные организации должны располагать данными заводских измерений изоляции обмоток без масла. На заводе следует измерять при низких и высоких температурах: тангенс угла диэлектрических потерь, емкость в зависимости от частоты и сопротивление изоляции.

Необходимо в протоколе указывать способ нагрева трансформатора на заводе и точно оговорить методику измерений температуры.

При этих условиях, если данные измерений на монтажной площадке укажут на влажность изоляции, можно будет принять решение о сушке. Если же измерения не дадут оснований считать обмотки влажными, то можно будет принять решение о включении трансформатора в сеть с производством контрольных измерений (в том числе $\frac{C_2}{C_x}$) после нагрева трансформатора током нагрузки с целью сопоставления с заводскими данными.

Методика измерений обмоток на заводе и при монтаже трансформаторов должна быть одинаковой.

Выводы и предложения. 1. Должно быть улучшено качество заводских уплотнений, с тем чтобы за время транспортирования сохранялась герметичность трансформаторов.

2. В технических протоколах, высылаемых заказчику, завод-изготовитель должен приводить исчерпывающие данные о изоляции как в холодном, так и в горячем состояниях ($\frac{C_2}{C_{50}}$, $\text{tg } \delta$, R_{60} , $\frac{C_2}{C_x}$, диэлектрическую прочность и $\text{tg } \delta$ масла).

Для трансформаторов, поставляемых без масла, протоколы должны содержать данные измерений трансформаторов как заполненных, так и не заполненных маслом. Должны быть сообщены

сведения о способе нагрева и местах измерения температуры.

3. Заводские инструкции по монтажу трансформаторов следует пересмотреть в сторону облегчения условий включения трансформаторов без прогрева и сушки.

4. Целесообразно установить следующий порядок включения новых трансформаторов:

а) Заключение о состоянии изоляции трансформаторов должно производиться по результатам измерений в холодном состоянии (при положительных температурах). Измеряются $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\text{tg } \delta$, R_{60} , проверяются масло и герметичность трансформатора и данные сопоставляются с данными заводских измерений.

б) При удовлетворительных результатах измерений трансформатор может быть включен в эксплуатацию без прогрева.

в) При наличии небольших отклонений от заводских данных или норм трансформатор может быть включен в сеть на холостой ход или под нагрузку с последующим производством контрольных измерений в горячем состоянии.

г) Если измерения показывают, что изоляция увлажнена выше допустимых норм, то трансформатор подлежит сушке или длительному нагреву.

5. Нормы эксплуатационного циркуляра 3/Э 1951 г. должны быть уточнены на основе опыта эксплуатации последних лет и исследований МТЗ и ЦНИЭЛ. В качестве критерия для оценки увлажнения изоляции трансформатора должен быть принят комплекс результатов измерений $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\text{tg } \delta$, R_{60} изоляции, а также испытания масла.

Для трансформаторов на напряжения 35 кВ и ниже требования следует значительно облегчить.

6. Заводам-изготовителям трансформаторов, научно-исследовательским организациям, персоналу монтажных и эксплуатирующих предприятий необходимо проводить дальнейшую работу, направленную на облегчение и ускорение ввода трансформаторов в эксплуатацию.

[14. 3. 1955]



Опыт включения трансформаторов без сушки

Инж. Д. И. ПОЛЯК

Трест Сибэлектромонтаж

Прогрессивный способ включения трансформаторов без предварительной сушки и нагрева на месте монтажа в настоящее время широко внедрен. В таблице приведены данные по внедрению этого способа на одной монтажной площадке. Данные преимущественно относятся к трансформаторам мощностью 10 000 кВа и выше.

Годы	Смонтировано трансформаторов общей мощностью, кВа	В том числе (%):		
		с предварительной сушкой	с предварительным нагревом	Без сушки и нагрева
1942 . . . 1945	245 000	76	22	2
1946 . . . 1951	349 000	4	73	18
1952	202 000	2	34	64
1953	107 000	0	7	93
1954	53 000	0	0	100

Действовавшая до 1946 г. инструкция Московского трансформаторного завода (МТЗ) практически требовала сушки большинства монтируемых трансформаторов. Необоснованность этих требований обнаружилась давно. В некоторых случаях было установлено, что сушка не дала заметного повышения сопротивления изоляции. Также были известны случаи, когда трансформаторы, хранившиеся без масла, включались в работу без сушки и нормально работали [Л. 1, 2].

С 1946 по 1954 г. на упомянутой монтажной площадке были включены без сушки трансформаторы общей мощностью 691 000 кВа (таблица), что составляет 97% всей включенной за этот период трансформаторной мощности.

Трансформаторы проверялись по условиям включения без сушки и нагрева, изложенным в Руководящих указаниях по ускорению монтажа силовых трансформаторов, выпущенным МТЗ в 1946 г. Этим условиям удовлетворили около 50% трансформаторов и они были включены без сушки и нагрева. Остальные 50% трансформаторов ввиду отсутствия прибора для проверки их по способу емкость — частота, подвергались нагреву. В это число вошли все трансформаторы 110 кВ, нагрев которых по Руководящим указаниям МТЗ всегда обязателен, а также трансформаторы, которые не удовлетворили какому-либо условию указаний: плохая герметичность, герметичность до ревизии не проверялась, обмотка была вне масла более допустимого срока и т. п.

Одно из условий Указаний не соблюдалось для всех трансформаторов, но оно не было принято нами во внимание¹: это условие о проверке герметичности трансформатора тотчас же после доставки его на место монтажа. Практически, герметичность проверялась в процессе монтажа, спустя время от 3 мес. до 4 лет после прибытия трансформатора. До монтажа трансформаторы хранились недолгими и без расширителей.

¹ Между тем указания МТЗ требуют: „Если хотя бы одно условие не удовлетворено, трансформаторы подлежат сушке“.

Нагрев этих 50% трансформаторов при одновременном измерении увлажненности по способу емкость — температура показал, что ни один трансформатор не увлажнен. Все они были включены без сушки, в том числе три трансформатора 110 кВ, 10 500 кВа, хранившиеся без масла более 4 лет. Эти три трансформатора успешно работают более 6 лет.

Сушка 3% трансформаторов (таблица) была связана с их ремонтом.

Наш опыт монтажа трансформаторов, как и опыт других монтажных организаций, показал, что за время транспортирования и хранения трансформаторы практически не увлажняются и, как правило, их следует включать без предварительной сушки.

Массовая сушка трансформаторов до 1946 г. и нагрев большого количества трансформаторов в последующий период явились следствием того, что МТЗ переоценивал возможность увлажнения трансформаторов в период их транспортирования и хранения.

Разработанный Министерством электростанций и узаконенный циркуляром 3/Э способ проверки увлажненности емкость — частота позволил оценить увлажненность трансформатора, не прибегая к его нагреву, тем самым была решена важнейшая практическая задача.

Исследование МТЗ, о котором сообщается в статье А. К. Ашрятова, в первую очередь ценно не тем, что оно вносит некоторые коррективы в нормы циркуляра 3/Э, и не тем, что оно выявило, что метод $\text{tg } \delta$ является более предпочтительным, чем метод емкость — частота. Важен тот факт, что МТЗ (с большим опозданием) приступил к решению задач, выдвинутых жизнью.

Рекомендуемые автором статьи условия включения трансформаторов без сушки мало чем отличаются от условий, изложенных в циркуляре 3/Э. Автор рекомендует сравнивать результаты измерений с исходными заводскими данными. Ввиду отсутствия заводских исходных данных циркуляр предписывал их определение для всех вновь вводимых в эксплуатацию трансформаторов. Как предварительные данные, циркуляром были предложены нормы по ряду показателей. Возможны случаи, когда показатель, измеренный на увлажненном трансформаторе, укладывается в норму для неувлажненных. Тем не менее, технический риск, связанный с установлением этих норм, был необходим, он вполне себя оправдал. Из табл. 1 статьи А. К. Ашрятова видно, что более 80%

трансформаторов имеют показатели $\frac{C_2}{C_{10}}$, укладываемые в нормы по циркуляру 3/Э. Это же подтверждают данные рис. 3. Следует также учесть, что по циркуляру 3/Э вопрос о сушке решается на основании комплекса измерений ($\frac{C_2}{C_{50}}$, R_{60} , R_{15} , анализ масла) и условий, в которых трансформатор находился до монтажа. Случаи

ненормальной работы трансформаторов, включенных без сушки и нагрева, неизвестны.

Естественно, когда завод будет давать исходные данные для трансформаторов, то необходимость в абсолютных нормах отпадет. В заводских протоколах следует указывать все данные, предусмотренные циркуляром З/Э, а именно: $\frac{C_2}{C_{50}}$, $\text{tg } \delta$ обмоток и масла, R_{60} , R_{15} .

Измерения следует проводить как в холодном, так и нагретом состоянии трансформатора. Для завода, где измерения осуществляются в стационарных условиях, в процессе сушки трансформатора, это вполне доступно.

Не оспаривая того факта, что показатель емкость — частота менее точен, следует, однако, полагать, что при наличии исходных заводских данных он даст вполне удовлетворительный результат. Следует учесть, что аппаратура для измерения $\text{tg } \delta$ не нашла еще такого распространения, как прибор для измерений емкость — частота.

К рекомендуемым автором условиям включения трансформаторов без сушки необходимо сделать следующие замечания:

1. $\text{tg } \delta$ изменяется от сухого до увлажненного состояния в 10 ... 30 раз. Такая большая чувствительность может привести к тому, что даже при вполне допустимом увлажнении $\text{tg } \delta$ значительно превысит допускаемое его увеличение в 1,3 раза, что может привести к необоснованной отбраковке трансформаторов. Пределы допустимого увеличения $\text{tg } \delta$ следует установить экспериментально.

2. Следует установить, что положительный

результат сравнения $\text{tg } \delta$ с исходными данными для холодного состояния дает основание для включения без сушки даже в тех случаях, когда остальные условия включения не удовлетворены. При неудовлетворительном качестве масла следует произвести его очистку.

3. В случае отсутствия аппаратуры для измерения $\text{tg } \delta$ эту проверку можно заменить измерением емкость — частота.

4. Следует исключить требование об установке расширителя и окончательной заливке масла не позднее чем через 3 мес. со дня отправки трансформатора с завода. Практика показала, что до начала монтажа заливка маслом не выполняется и что этого не требуется.

5. Для трансформаторов, транспортируемых залитыми маслом, но без расширителя, следует считать испытание избыточным давлением воздуха равноценным испытанию столбом масла.

Уместно здесь также заметить, что заводу следует более тщательно закрывать трансформаторы. Небрежное выполнение этой несложной операции обходится слишком дорого.

Необходимо также, чтобы опубликованное исследование МТЗ не постигла та же участь, что и метод емкость — температура, который как известно, был разработан на МТЗ, но до сих пор не нашел отражения в заводской инструкции.

Литература

1. Т. П. Мусатов. Ускоренный монтаж силовых трансформаторов. Электрические станции, № 4—5, 1943.
2. Т. П. Мусатов. Опыт восстановления силовых трансформаторов. Электрические станции, № 6, 1944.

[10. 1. 1955]



Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма

Кандидат техн. наук Н. И. СОКОЛОВ и инж. А. А. ХАЧАТУРОВ

Москва

Широкое применение автоматического повторного включения (АПВ) намного повысило надежность работы энергосистем. Для транзитных линий применяют обычно АПВ с проверкой синхронизма или устройства пофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Эти устройства применимы и при одиночных связях, но требуют для своего осуществления отдельных приводов для каждой фазы выключателя и относительно сложных средств выбора повреждения фаз. Однако во многих случаях представляется возможным и при одиночных связях применять обычные трехфазные АПВ без проверки синхронизма. Это возможно, например, когда одиночные связи имеют достаточно большое сопротивление и, следовательно, токи при несинхронном включении оказываются в первый момент относительно небольшими [Л.].

По поручению Технического управления Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС (ЦНИЭЛ МЭС)

совместно с энергосистемой¹, которая служила базой исследования, провели испытания с целью проверки возможности взаимного несинхронного включения частей энергосистемы, связанных через одноцепную линию большой протяженности.

Схема системы при опытах (рис. 1). Во время опытов в испытываемой системе работали только тепловые станции, что, конечно, облегчало взаимное стягивание их в синхронизм.

По линии 110 кВ, связывающей части системы, непрерывно передается мощность в направлении обеих станций. Передаваемая мощность временно достигает суммарной мощности этих станций. Всякое аварийное отключение линии приводит к значительному недоотпуску энергии. Установка трехфазного АПВ с проверкой синхронизма в данном случае бесполезна, так как при отключе-

¹ Большую помощь в проведении испытаний оказала начальник Центральной службы релейной защиты, автоматики и измерений энергосистемы Х. М. Алак.

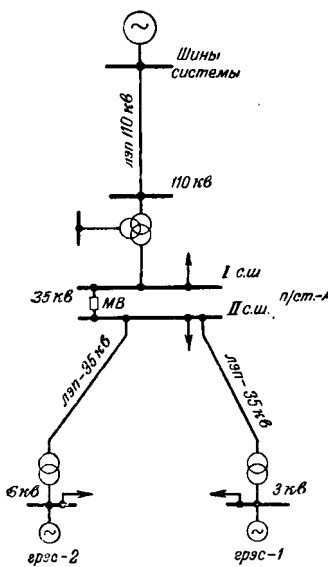


Рис. 1. Принципиальная схема части системы при опытах.

удовлетворительно совпали с измеренными по осциллограммам.

Для генераторов станций 1 расчетное значение тока получилось равным 2,4 от номинального, для генераторов станции 2 — 4,15 от номинального (периодическая слагающая). Электромагнитные синхронные моменты не превышали значений соответственно 1,1 и 1,8 от номинальных.

Следует учесть, что при включении возникает дополнительный момент, обусловленный аperiodической составляющей тока. Этот момент может быть значительным, особенно при коротких жестких связях, и представляет опасность для машин.

Опыты. Несинхронные включения частей системы производились параллельным выключателем 35 кВ на подстанции А (рис. 1). Всего было проведено пять опытов по несинхронному включению. В опытах варьировались как значения передаваемых мощностей, так и время, в течение которого части систем были взаимно разделены. После отключения от руки выключателя путем замыкания контактов защиты запускалось устройство АПВ, которое через 1 ... 1,5 сек снова включало выключатель. В пятом опыте вследствие задержки во включении выключателя время

одиночной связи векторы напряжений частей системы быстро расходятся, и повторное включение не осуществляется.

Ожидаемые значения токов и электромагнитных моментов при несинхронном включении. Расчет токов, ожидаемых при несинхронных включениях, производился приближенно: генераторы замещались сверхпереходным сопротивлением x'_d , а сдвиг фаз э. д. с. генераторов станций относительно другой части системы принимался 180° . Как оказалось, подсчитанные таким образом токи

повторного включения было значительно больше — 6,4 сек. Во втором опыте выключатель замыкался от руки при угле по синхроскопу, близком к 180° .

В таблице сведены результаты опытов. Мощность, передаваемая через выключатель МВ (рис. 1), дана в процентах от мощности, генерируемой станциями 1 и 2. Наименьшее напряжение на подстанции А дано в процентах от номинального. Время АПВ указывается от момента отключения до момента включения МВ.

Как видно из таблицы и осциллограмм (рис. 2, 3, 4), во всех опытах, кроме пятого, после включения не наблюдалось ни одного асинхронного проворота ротора. Возникавшие небольшие качания практически не сопровождались изменениями напряжения. Кратковременное снижение напряжения имело место только в момент замыкания выключателя.

Следует отметить, что при тех скольжениях, которые имели место в первых четырех опытах, угол включения оказывал влияние только на продолжительность качаний. При несколько более высоком значении скольжения угол включения должен уже оказывать влияние на характер процесса включения — будет ли включение сопровождаться асинхронным ходом или нет.

В последнем опыте передаваемая мощность достигла 100%, время действия АПВ намного превзошло возможное в практике, а включение произошло при расхождении частот, превышающем 6 гц. Однако и в этом опыте, после относительно длительных асинхронных качаний (25 сек) части системы взаимно вошли в синхронизм (рис. 4 и 5). Последний опыт характерен также и глубокими колебаниями напряжения на подстанции А.

Взаимное сближение скоростей генераторов обеих частей системы во время пятого опыта было достигнуто в результате: а) действия регуляторов турбин обеих частей системы, так как генераторы отделившейся части системы имели резерв по мощности 30 ... 40% от номинальной; б) влияния асинхронного момента, возникающего у генераторов при скольжении, и в) саморазгрузки потребителей отделившейся части системы, обусловленной глубокими периодическими снижениями напряжения.

Во время опытов велось наблюдение за генераторами на станциях 1 и 2. Никаких ненормальных явлений на генераторах, а также в трансфор-

Номер опыта	Время АПВ, сек	Активная мощность, передаваемая через МВ, %	Число проворотов	Угол расхождения векторов при включении, градусы	Наименьшее напряжение на подстанции А, %		Время восстановления напряжения до 0,9 U_n , сек	Изменение частоты за время АПВ на сборных шинах II, гц
					после отключения МВ	после включения МВ		
1	0,97	2,75	0	13	—	—	—	
2	25 . . . 30	5,5	0	160	—	40	0,4	
3	0,92	40,0	0	135	90	36	0,5	
4	1,46	40,0	0	~0	90	~100	0	
5	6,4	100,0	98	~0	70	0 . . . 100	25	

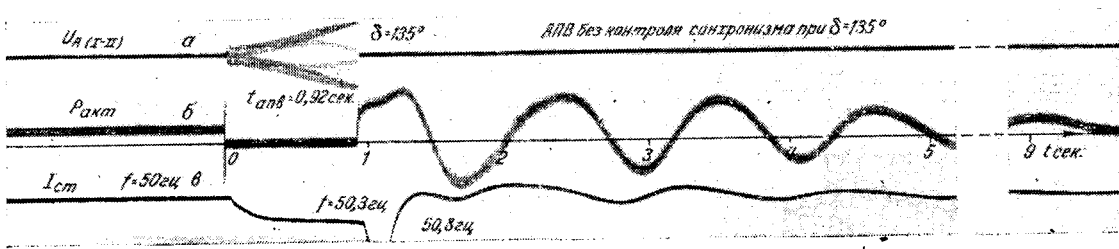


Рис. 2.
а — изменение угла, б — активной мощности, в — частоты в третьем опыте (таблица).

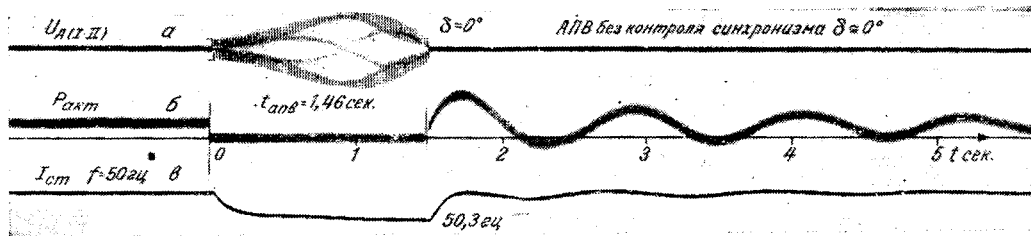


Рис. 3.
а — изменение угла, б — активной мощности, в — частоты в четвертом опыте (таблица).

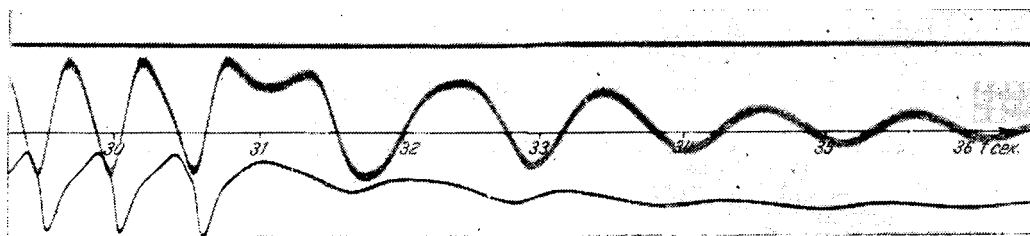
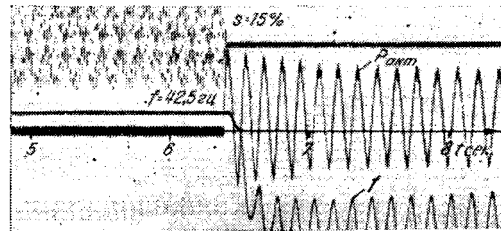
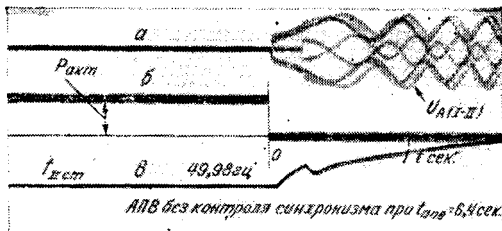


Рис. 4.

а — изменение угла, б — активной мощности, в — частоты в пятом опыте (таблица)

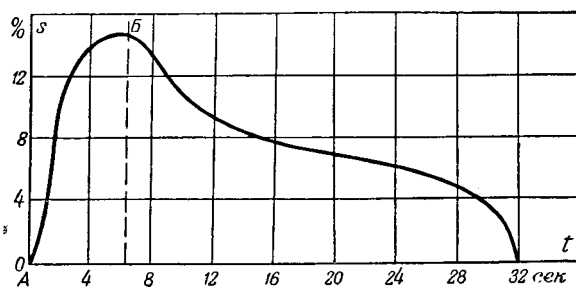


Рис. 5. Изменение скольжения s в пятом опыте (таблица). А — момент отключения; Б — включения масляного выключателя МВ (рис. 1).

маторах не было замечено. В процессе опытов генераторы обеих станций работали синхронно, однако осциллограммы зарегистрировали небольшие взаимные колебания генераторов одной и той же станции. Повидимому, это объясняется весьма большой разницей в постоянных инерции машин.

Поведение потребителей во время опытов. При первых четырех опытах, не сопровождавшихся

сколько-нибудь продолжительными снижениями напряжения, потребители почти не реагировали на процесс АПВ; отмечены были единичные случаи отпадания магнитных пускателей. В последнем опыте, которому сопутствовали сильные качания, имело место отмеченное осциллограммами снижение потребляемой мощности, однако немедленно после втягивания в синхронизм потребление стало расти и через 2 ... 3 мин достигло почти нормального значения.

Следует еще раз отметить, что последний опыт не характерен для обычного АПВ без проверки синхронизма, когда выдержки по времени не превосходят 1 ... 1,5 сек, но этот опыт указывает на возможность при тяжелых авариях замыкать между собой части системы без взаимной синхронизации.

Защита и автоматика. На время опытов никаких существенных изменений в релейной защите в системе не производилось. Были лишь переведены на сигнал некоторые дистанционные защиты, не имевшие блокировки от качаний.

Однако ни в одном из опытов не было отмечено случаев неправильного действия защит, в том числе и дистанционных, переведенных на сигнал.

Во время последнего опыта перегрузочные защиты генераторов работали на сигнал. Отмечено было, что пускались и максимальные защиты генераторов. Фиксаторы на реле времени этой защиты остановились в положении 0,3 ... 0,4 сек.

В первых четырех опытах на отдельных генераторах отмечалось кратковременное действие устройств быстродействующего возбуждения, в последнем опыте эти устройства по нескольку раз действовали на всех генераторах станций 1 и 2.

В системе имеются два вида устройств разгрузки по частоте: по обычной схеме с уставкой по частоте для первой очереди 47,8 гц и по схеме ОРГРЭС с повторным включением после восстановления частоты. На устройствах первого вида перед опытами были повышены уставки по времени до 4 сек, так как нельзя было надежно рассчитать возможные изменения частоты за время действия АПВ. В первых четырех опытах устройства разгрузки не работали. В последнем опыте действовали устройства обоих видов; все устройства по схеме ОРГРЭС включали отходящие линии обратно, линии, оборудованные обычными устройствами, были включены вручную.

Выводы. 1. Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма на одиночной транзитной линии при малых передаваемых мощностях проходит без толчков и качаний, иначе говоря, оно осуществляется практически незаметно как для системы, так и для потребителей, так как

угол расхождения векторов напряжения отделившихся частей системы изменяется относительно медленно.

2. Автоматическое повторное включение без контроля синхронизма частей энергосистемы при передаваемых мощностях порядка 40% от мощности генераторов отделившейся части системы в условиях рассматриваемой системы и времени АПВ до 1 ... 1,5 сек при самом неблагоприятном угле включения сопровождается относительно небольшими качаниями и кратковременным снижением напряжения. Восстановление напряжения происходит быстро, и через 0,4 ... 0,5 сек после замыкания частей системы напряжение достигает почти номинального значения.

3. Несинхронное включение двух частей энергосистемы при разности частот порядка 7 гц оказывается возможным и опасности не представляет.

Наиболее тяжелый опыт с разделением системы на две несинхронные части и повторном их включении через 6,4 сек., сопровождавшийся продолжительными асинхронными качаниями в течение 25 сек после включения выключателя МВ, закончился успешно, и станции вошли в синхронизм. При этом опыте передаваемая мощность составляла 100% от генераторов отделившейся части системы.

Литература

1. Сборник директивных материалов Технического отдела МЭС СССР, Госэнергоиздат, 1950.

[26. 11. 1954



Общий метод решения задач линейных цепей при переменных сопротивлениях в ветвях

Кандидат техн. наук О. М. БОГАТЫРЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В учебной и журнальной литературе излагается много различных теорем, относящихся к режимам переменного сопротивления в одной или двух ветвях, которые рекомендуется применять для решения разных задач. Таковы, например, теоремы: о линейных соотношениях, об активном двухполюснике или теорема Гельмгольца-Тевенена, теорема вариации, теорема вариации двух параметров, теорема о наложении аварийных токов на нормальные или теорема Шицлайна и ряд других теорем.

Целью настоящей заметки является показать, что все эти довольно многочисленные теоремы являются следствием одной основной теоремы — теоремы о наложении токораспределения, вытекающей из принципа наложения, имеющего силу для линейных цепей. Эта основная теорема может быть сформулирована для случая переменного сопротивления не только в одной ветви, а одновременно в нескольких, и таким образом, она является более общей, чем все упомянутые теоремы.

Применение этой общей теоремы к самым различным задачам позволяет не только образовать прием и освободить теорию и практику от излишнего количества формул, но и решать задачи проще и короче, чем при пользовании указанными частными теоремами.

Формулировка и содержание этой общей теоремы заключаются в следующем. Если в какой-либо электрической цепи имеются переменные сопротивления (также и нелинейные), то, заменяя их согласно принципу компенсации переменными э. д. с., равными падению напряжения в указанных сопротивлениях, можно получить схему с постоянными сопротивлениями, т. е. линейную схему. Применяя к этой схеме принцип наложения, можно написать выражения для токов в ветвях, как сумму слагающих от постоянных и переменных э. д. с. Применяя эти уравнения для заданных режимов, можно получить необходимое число уравнений, связывающих постоянные входные и взаимные проводимости ветвей, решение которых и определит эти проводимости.

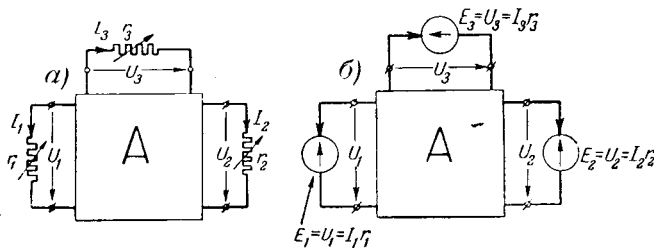


Рис. 1.

После этого неизвестные токи и фиктивные переменные э. д. с., равные напряжениям на переменных сопротивлениях, будут связаны в линейных уравнениях с известными постоянными коэффициентами. Токи могут быть найдены в виде функций от переменных сопротивлений ветвей или вычислены при любых заданных значениях этих сопротивлений.

Для конкретности рассмотрим линейный активный шестиполюсник (рис. 1,а), в котором выведены три ветви с переменными сопротивлениями. Заменяя переменные сопротивления э. д. с., согласно принципу компенсации, получим схему (рис. 1,б), для которой, применяя принцип наложения, можем написать (считая положительные направления в ветвях выбранными по токам):

$$I_1 = \Sigma E_k g_{1k} - E_1 g_{11} - E_2 g_{12} - E_3 g_{13} = I_{1кор} - U_1 g_{11} - U_2 g_{12} - U_3 g_{13}; \quad (1)$$

$$I_2 = \Sigma E_k g_{2k} - E_1 g_{21} - E_2 g_{22} - E_3 g_{23} = I_{2кор} - U_1 g_{21} - U_2 g_{22} - U_3 g_{23} \quad (2)$$

и аналогично для тока I_3 . Здесь $I_{1кор} = \Sigma E_k g_{1k}$ представляет собой ток в ветви I при одновременном коротком замыкании всех трех ветвей; аналогично определяется и ток $I_{2кор}$. Они находятся путем расчета или из опыта. Известные постоянные проводимости g_{11} , g_{12} и т. д. могут быть найдены при помощи расчета из любых известных заданных режимов цепи, например холостого хода и короткого замыкания. Очевидно должно быть задано шесть режимов, так как неизвестных проводимостей шесть, которые и находятся совместным решением шести уравнений, написанных для заданных частных режимов¹. Полученные линейные связи между токами и напряжениями решают без всяких осложнений любую заданную задачу и не требуют применения никаких дополнительных теорем.

Примеры. Теорема Тевенена. Найти ток в ветви I с переменным сопротивлением r_1 (рис. 2). Согласно общему уравнению, можем написать:

$$I_1 = I_{1кор} - U_1 g_{11} = I_{1кор} - (I_1 r_1) g_{11},$$

откуда

$$I_1 = \frac{I_{1кор}}{1 + g_{11} r_1}.$$

Если задано напряжение холостого хода $U_{1хол}$, то, применяя то же общее уравнение для

¹ Конечно, они могут быть определены и непосредственно опытным путем.

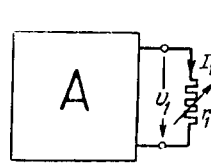


Рис. 2.

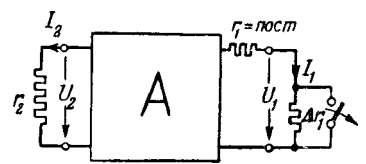


Рис. 3.

холостого хода ветви I , получим $0 = I_{1кор} - U_{1хол} g_{11}$, откуда находим $I_{1кор}$ (если g_{11} известно) или g_{11} (если $I_{1кор}$ дано), и, подставляя соответствующую величину в уравнение для I_1 , получим:

$$I_1 = \frac{U_{1хол}}{\frac{1}{g_{11}} + r_1} = \frac{U_{1хол}}{r_{11} + r_1},$$

или

$$I_1 = \frac{I_{1кор}}{1 + r_1 \left(\frac{I_{1кор}}{U_{1хол}} \right)} = \frac{U_{1хол}}{\frac{U_{1хол}}{I_{1кор}} + r_1}.$$

Таким образом мы получили три вида формулы Тевенена.

Теорема вариации. Найти зависимость токов I_1 и I_2 от приращения сопротивления Δr_1 в ветви I , если известны токи в тех же ветвях до указанного приращения I'_1 и I'_2 , и проводимости g_{11} и g_{12} (рис. 3). Выделяя переменную часть Δr_1 и заменяя ее э. д. с., согласно общему уравнению можем написать:

$$I_1 = I_{1кор} - g_{11} U_1 \text{ и } I_2 = I_{2кор} - g_{21} U_1,$$

где $I_{2кор}$ — ток I_2 при к. з. ветви I ($\Delta r_1 = 0$). Сопротивления r_1 и r_2 как постоянные входят в проводимости g_{11} и g_{12} . Применяя эти уравнения для первого режима ($\Delta r_1 = 0$), получим:

$$I'_1 = I_{1кор}; \quad I'_2 = I_{2кор}.$$

Поэтому

$$I_1 = I'_1 - g_{11} I_1 \Delta r_1; \quad I_2 = I'_2 - g_{21} I_1 \Delta r_1,$$

откуда

$$I_1 = \frac{I'_1}{1 + g_{11} \Delta r_1}; \quad I_2 = I'_2 - \frac{I'_1 g_{21} \Delta r_1}{1 + g_{11} \Delta r_1}.$$

Теорема вариации двух параметров. Найти зависимости I_1 и I_2 от приращений сопротивлений в двух ветвях Δr_1 и Δr_2 , если известны токи I'_1 и I'_2 до указанного приращения. Проводимости g_{11} , g_{22} , g_{12} предполагаются известными (рис. 4).

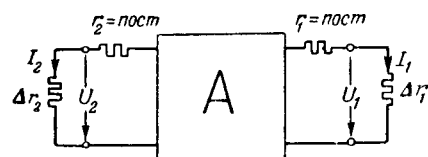


Рис. 4.

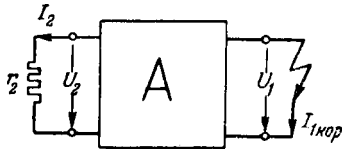


Рис. 5.

Заменяя переменные Δr_1 и Δr_2 э. д. с., напишем общие уравнения токов I_1 и I_2 :

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{1\text{кор}} - g_{11}U_1 - g_{12}U_2 \\ I_2 &= I_{2\text{кор}} - g_{21}U_1 - g_{22}U_2. \end{aligned}$$

Имея в виду, что $I_{1\text{кор}} = I'_1$ и $I_{2\text{кор}} = I'_2$ — значения токов при одновременном коротком замыкании обоих переменных сопротивлений, а $U_1 = I_1\Delta r_1$ и $U_2 = I_2\Delta r_2$, перепишем уравнения:

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_1 - g_{11}I_1\Delta r_1 - g_{12}I_2\Delta r_2; \\ I_2 &= I'_2 - g_{21}I_1\Delta r_1 - g_{22}I_2\Delta r_2, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} I_1(1 + g_{11}\Delta r_1) + I_2g_{12}\Delta r_2 &= I'_1; \\ I_1g_{21}\Delta r_1 + I_2(1 + g_{22}\Delta r_2) &= I'_2, \end{aligned}$$

откуда, решая эти уравнения совместно, находим:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{D} [I'_1 + (I'_2g_{22} - I'_1g_{12})\Delta r_2]; \\ I_2 &= \frac{1}{D} [I'_2 + (I'_1g_{11} - I'_2g_{21})\Delta r_1], \end{aligned}$$

где $D = (1 + g_{11}\Delta r_1)(1 + g_{22}\Delta r_2) - g_{12}^2\Delta r_1\Delta r_2$.

Теорема Шлицлайна. Найти токи в ветвях 1 и 2 при коротком замыкании ветви 1, если известны токи и напряжения в обеих ветвях до короткого замыкания I'_2 и $U_{1\text{хол}}$ (рис. 5).

Общие уравнения для холостого хода дают:

$$0 = I_{1\text{кор}} - g_{11}U_{1\text{хол}}, \quad I'_2 = I_{2\text{кор}} - g_{12}U_{1\text{хол}},$$

откуда

$$I_{1\text{кор}} = g_{11}U_{1\text{хол}} \quad \text{и} \quad I_{2\text{кор}} = I'_2 + g_{12}U_{1\text{хол}}.$$

Применение метода холостого хода и короткого замыкания к ветвям с нелинейными элементами (теорема Мееровича или развитие теоремы Тевенена). Если какая-либо линейная цепь содержит нелинейные элементы (например, два элемента), то, выделяя их из остальной части цепи, получим схему рис. 6. Введем в обе ветви добавочные э. д. с., действующие против выбранного направления для тока, и заменим нелинейные сопротивления согласно принципу компенсации соответствующими э. д. с., равными падениям напряжения на них. Получим схему рис. 7.

Теперь применим к ветви 1 основное уравнение (1) для нормального (искомого) режима, когда э. д. с. E_1 и E_2 равны нулю, а затем для режима одновременного холостого хода обеих

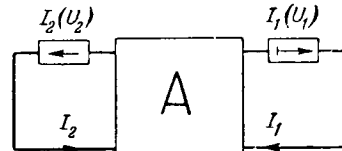


Рис. 6.

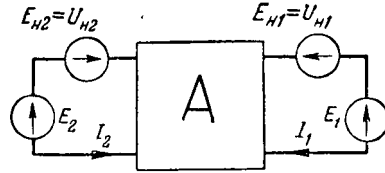


Рис. 7.

ветвей, когда э. д. с. $E_1 = U_{1\text{хол}}$ и $E_2 = U_{2\text{хол}}$ и $E_{н1} = E_{н2} = 0$.

Получим:

$$I_1 = I_{1\text{кор}} - U_{н1}g_{11} - U_{н2}g_{12};$$

$$I_{1\text{хол}} = 0 = I_{1\text{кор}} - U_{1\text{хол}}g_{11} - U_{2\text{хол}}g_{12}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$I_1 = (U_{1\text{хол}} - U_{н1})g_{11} + (U_{2\text{хол}} - U_{н2})g_{12}.$$

Совершенно аналогично можно получить для тока I_2 :

$$I_2 = (U_{2\text{хол}} - U_{н2})g_{22} + (U_{1\text{хол}} - U_{н1})g_{21}.$$

Этим уравнениям соответствует схема замещения, показанная на рис. 8, где Π обозначает пассивную линейную часть схемы. Возможность получения этой схемы замещения и составляет содержание теоремы Мееровича.

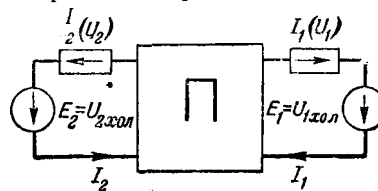


Рис. 8.

Изложенным в статье способом можно решить самые разнообразные задачи при переменных сопротивлениях в ветвях, включая и те, которые часто рассматриваются как самостоятельные теоремы.

Литература

1. К. М. Поливанов. Теорема вариации параметров линейной электрической цепи. *Электричество*, № 2, 1946 г.
2. М. И. Левин. Общие свойства измерительных схем. *Электричество*, № 2, 1946.
3. К. М. Поливанов. Теорема вариации для n -параметров электрической цепи. *Электричество*, № 7, 1947.
4. М. И. Левин. Методы расчета электроизмерительных схем. *Электричество*, № 7, 1947.
5. Э. А. Меерович. К расчету нелинейных цепей. *Электричество* № 9, 1951.

О выборе испытательных напряжений витковой изоляции в высоковольтных двигателях

Кандидат техн. наук А. И. АБРАМОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Электрическая прочность корпусной изоляции электрических машин гарантируется заводами-изготовителями и она достаточно надежно испытывается согласно ГОСТ 183-41. Витковая изоляция после укладки секций в пазы машины согласно того же ГОСТ 183-41 не подвергается испытанию, если не считать пункта 104, где неправильно названо испытанием междувитковой изоляции повышение рабочего напряжения машины на 30%. Действительно, можно ли считать напряжение порядка нескольких десятков вольт испытательным напряжением витковой изоляции, когда перенапряжения между витками достигают в эксплуатации несколько сот вольт и в отдельных случаях — порядка 1 000 в, а пробивное напряжение применяемой витковой изоляции составляет порядка нескольких киловольт?

Электрическая прочность неповрежденной витковой изоляции, применяемой в электромашиностроении, достаточно высока, однако при укладке секций в пазы в результате механических воздействий на обмотку витковая изоляция может частично повреждаться, и ее электрическая прочность резко снижается. Отсутствие испытаний междувитковой изоляции после укладки секций в пазы не позволяет выявить наиболее опасные ее повреждения.

Электрические машины, ослабленные места витковой изоляции которых выдерживают 5—10-кратное значение номинального виткового напряжения, могут работать достаточно долгое время безаварийно. Это объясняется следующим.

Рабочее напряжение между витками высоковольтных электрических двигателей средней мощности, как указывалось, составляет обычно порядка десятков вольт. Междувитковые перенапряжения при волновых процессах коммутационного характера достигают нескольких сот вольт, а в отдельных случаях — порядка 1 000 в. Если электрическая дуга, возникающая в ослабленном месте изоляции между витками при импульсных перенапряжениях, гаснет при напряжении, превосходящем рабочее напряжение между витками, то короткого замыкания между витками через дугу пятидесятипериодного тока не происходит. При повторных импульсных перенапряжениях в ослабленном месте изоляции образуется облупившийся от многократного действия электрической дуги канал. В этом случае рабочее напряжение между витками становится уже достаточным, чтобы при неблагоприятных условиях (импульсное перенапряжение, вибрация машины и др.) произошло междувитковое короткое замыкание. В отдельных случаях происходит «самозалечивание» ослабленного места междувитковой изоляции путем проникновения в проводящий канал пропиточной массы, однако при длительной работе машины пропиточная масса при нагреве и вибрации вытекает, и «самозалечивание» не всегда гарантирует машину от аварии. Таким образом,

одной из причин короткого замыкания между витками, в результате которого выгорает секция машины (а иногда наступает и пробой корпусной изоляции) даже в машинах, работающих длительное время, может быть повреждение витковой изоляции при изготовлении машины.

В связи с этим ставится вопрос о нормах испытательных напряжений междувитковой изоляции после укладки секций в пазы машин на электромашиностроительных заводах и в ремонтных организациях. При решении этого вопроса необходимо знать, каким опасным для витковой изоляции перенапряжениям подвергаются обмотки машин в эксплуатации. Наиболее часто витковые перенапряжения возникают при перенапряжениях, имеющих место в момент включения электрических двигателей в сеть.

По характеру протекания волновых процессов включение электрической машины в сеть равносильно падению на обмотку машины волны с крутым фронтом, амплитуда которой $U_0 = \sqrt{2}U_n$, где U_n — линейное напряжение сети. В этом случае максимальное напряжение на секции [Л. 1] может быть

$$U_c = (0,9 \dots 0,95) \sqrt{2}U_n.$$

Учитывая, что напряжение сети U_n , в которую включается электрическая машина, в эксплуатации может быть на 5...10% выше номинального напряжения машины U_n , можно принять, что максимальное напряжение на первой секции при включении машины в сеть $U_c \approx \sqrt{2}U_n$.

Исследования показывают, что при других видах коммутационных перенапряжений, если к машине и приходят волны с более высокими амплитудами, то фронты этих волн обычно более пологие, чем у волн, падающих на обмотку машины при ее включении в сеть. При пологих же фронтах волн напряжение распределяется более равномерно по секциям обмотки [Л. 1].

Принимая за максимальное напряжение на секциях обмотки (при коммутационных перенапряжениях)

$$U_c = \sqrt{2}U_n, \quad (1)$$

можно сделать следующие выводы в части импульсных испытаний:

1. Импульсная прочность витковой изоляции секций после укладки их в пазы должна быть такой, чтобы выдерживать кратковременно приложенное к секции испытательное напряжение

$$U_{c.u} = k_s \sqrt{2}U_n. \quad (2)$$

До накопления опыта импульсных испытаний можно принять коэффициент запаса электрической прочности k_s ориентировочно равным 1,2...1,5. При этом значении $U_{c.u}$ импульсное

испытательное напряжение междувитковой изоляции (при длине фронта волны $\tau_{\phi} \geq 0,5$ мксек) [Л. 1] будет:

$$U_{в.и} = \frac{k_3 \sqrt{2} U_n}{n}, \quad (3)$$

где n — число витков в секции.

2. В эксплуатации, при воздействии на обмотку волн с крутым фронтом витковая изоляция начальных секций подвергается более высоким перенапряжениям, чем витковая изоляция секций, удаленных от начала обмотки. Следовательно, запас электрической прочности витковой изоляции начальных секций сравнительно ниже. Если же витковая изоляция удаленных от начала секций имеет частичные повреждения, ее электрическая прочность резко снижается, и запас электрической прочности уменьшается, однако изоляция еще в состоянии выдерживать номинальное рабочее напряжение. В этом случае при перенапряжениях витковая изоляция может быть пробита не в начальных секциях, а в секциях, удаленных от начала обмотки, в которых имелись частичные повреждения витковой изоляции. Поэтому с целью выявления слабых мест изоляции всей обмотки желательно испытывать витковую изоляцию всех секций, уложенных в пазы, одинаковым напряжением, согласно равенству (2).

3. При расположении витков в пазу не в один ряд, а в несколько рядов или в шахматном порядке соседними витками k -го витка могут оказаться витки с порядковыми номерами не $k + 1$ и $k - 1$, а $k + m$ или $k - m$, где m — разность порядковых номеров смежных витков. В этом случае при приложении к секции импульсного испытательного напряжения витковая изоляция между смежными витками будет испытываться напряжением, в m раз большим по сравнению с однородным расположением витков в пазу.

4. Схемы и аппараты для испытания витковой изоляции можно применять только после точного определения амплитуды и формы (главным образом длины фронта) генерируемых ими импульсов, чтобы надежно испытывать витковую изоляцию и в то же время не перенапрягать ее, так как это может повести к повреждению витковой изоляции во время испытания.

5. Необходимо в ближайшее время пересмотреть пункт 104 ГОСТ 183-41, согласно которому междувитковая изоляция должна испытываться повышением номинального напряжения на электрической машине на 30%.

Литература

1. Г. Н. Петров и А. И. Абрамов. Междувитковые напряжения в обмотках электрических машин при волновых процессах. Электричество, № 7, 1954.

[29.1.1955]



О применимости трансформаторов тока для измерений в цепях с выпрямителями

Кандидат техн. наук **Е. Л. ЭТТИНГЕР**

ЦКБ „Электропривод“

инж. **Ю. А. ШМАЙН**

ЦНИЭЛ МЭС

При измерении и осциллографировании тока в цепях питания выпрямительных установок часто применяются лабораторные и стационарные трансформаторы тока. Трансформаторы тока устанавливаются в цепях, где среднее значение тока равно нулю — первичные обмотки выпрямительных трансформаторов, вторичные обмотки выпрямительных трансформаторов при двухтактных схемах выпрямления и т. д. При этом предполагается, что погрешность измерения невелика. Однако, как показал опыт исследования выпрямительной установки на одной из станций Мосэнерго, это не так. При осциллографировании вторичного тока выпрямительного трансформатора, питающего выпрямитель, соединенный в трехфазную мостовую схему, была обнаружена существенная разница между осциллограммами тока, снятыми при помощи трансформатора тока, и при помощи шунта (рис. 1,а и б). Разница эта объясняется насыщением сердечника трансформатора тока в точке B (рис. 1,б).

При опыте был использован лабораторный трансформатор тока типа МТТ-1 с сердечником из материала типа пермаллой. Благодаря весьма

высокой проницаемости и, следовательно, малому намагничивающему току пермаллоя на участке OA (рис. 1,б), кривые первичного и вторичного тока почти совпадают:

$$F_1 = F_2 + F_0,$$

где F_1 — н. с. первичной обмотки;

F_2 — н. с. вторичной и F_0 — намагничивающая сила.

При малой н. с. F_0 можно положить:

$$F_1 \approx F_2.$$

На участке AB ток в первичной обмотке не меняется, а ток во вторичной обмотке медленно спадает по экспоненциальной кривой с весьма большой постоянной времени, соответствующей магнитной проницаемости ненасыщенного сердечника трансформатора тока. По мере спадаания вторичного тока разность ампервитков первичной и вторичной обмоток $F_1 - F_2$, намагничивающая сердечник, растет. Ампервитки насыщения пермаллоя весьма малы, поэтому сердечник скоро насыщается (точка B), магнитная проницаемость сердечника и индуктивность вторичной обмотки

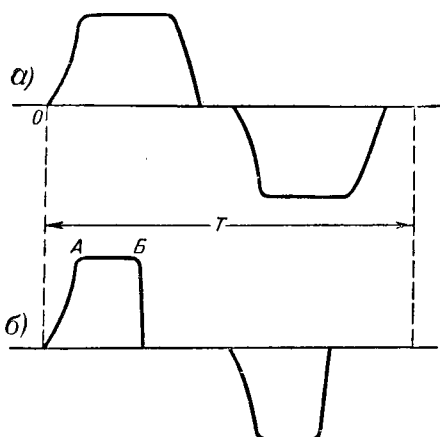


Рис. 1. Осциллограммы тока во вторичной обмотке выпрямительного трансформатора.

а — осциллографирование с шунта; б — при помощи трансформатора тока.

трансформатора тока резко падают, и в то время как ток в первичной обмотке трансформатора остается постоянным, ток во вторичной обмотке быстро уменьшается с постоянной времени, соответствующей насыщенному сердечнику. В результате кривая тока во вторичной обмотке отличается от кривой тока в первичной обмотке и может быть разбита на два резко выраженных участка.

На первом участке сердечник трансформатора не насыщен, и кривая вторичного тока правильно передает действительную форму тока в первичной обмотке. На втором участке сердечник насыщается, и кривая вторичного тока не соответствует форме первичного тока.

Выше рассмотрен случай, когда насыщение сердечника наступает вследствие того, что ток в первичной обмотке остается постоянным, а во вторичной убывает. Но насыщение сердечника может наступить и при изменяющемся токе в первичной обмотке в случае перегрузки трансформатора тока. В этом случае кривая вторичного тока также не будет соответствовать кривой первичного тока.

Для проверки указанных положений были проведены специальные испытания трех типов трансформаторов тока: МТТ-1 с сердечником из материала типа пермаллой; УТТ-5 с сердечником из материала типа пермаллой; ТКФ-20/5 с сердечником из электротехнической стали. Осциллографировались первичный и вторичный токи при включении первичной обмотки к источнику постоянного тока. Сопротивление в цепи первичной обмотки было выбрано достаточно большим, так что ток в этой цепи устанавливался за время не более 0,001 сек и в дальнейшем оставался постоянным. Для каждого трансформатора проводилось несколько опытов при различных значениях первичного тока.

На рис. 2 приведены осциллограммы токов, снятые на трансформаторе МТТ-1; совершенно

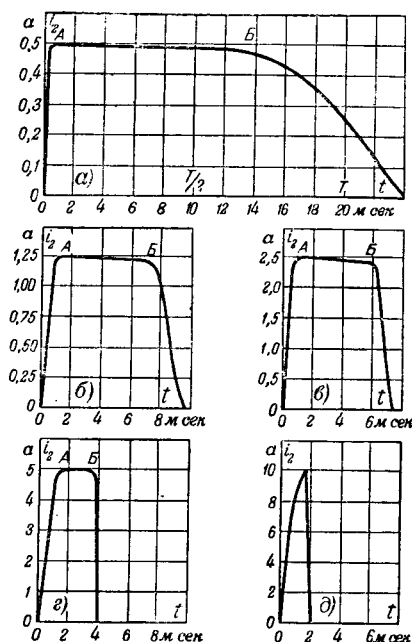


Рис. 2. Осциллограмма вторичного тока при включении трансформатора тока типа МТТ-1-10/5 на источник постоянного тока.

а — $i_1 = 1$ а; б — $2,5$ а; в — 5 а; г — 10 а;
 $\partial - i_1 = 20$ а.

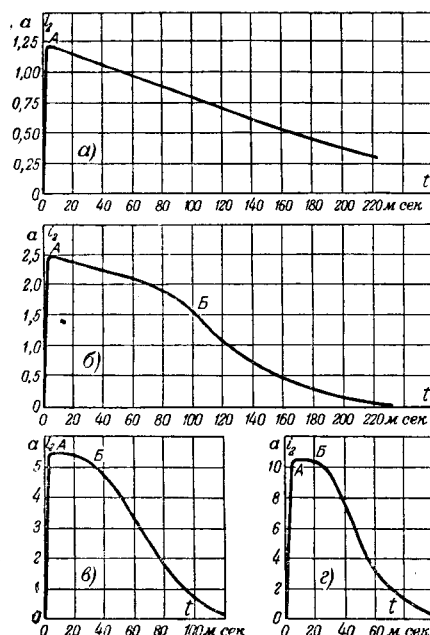


Рис. 3. Осциллограммы вторичного тока при включении трансформатора тока типа ТКФ-20/5 на источник постоянного тока.

а — $i_1 = 5$ а; б — 10 а; в — 22 а; г — $i_1 = 42$ а.

аналогичные осциллограммы получены и для трансформатора УТТ-5. На рис. 3 приведены осциллограммы, снятые на трансформаторе ТКФ-20/5.

Осциллограммы рис. 2 и 3 показывают, что при включении в первичную обмотку постоянного тока вторичный ток изменяется так же, как и при питании первичной обмотки током прямоугольной или трапециевидной формы.

У трансформатора МТТ-1 с сердечником из пермаллой спадание тока на участке АБ происходит медленно, но благодаря весьма малому значению н. с. насыщения момент насыщения наступает быстро, участок АБ короток.

У трансформатора ТКФ-20/5 с сердечником из электротехнической стали спадание тока происходит быстрее, но благодаря большему значению н. с. насыщения, участок АБ значительно длиннее.

По мере увеличения первичного тока момент насыщения наступает скорее и участок АБ сокращается. Осциллограмма рис. 2,г соответствует значительной перегрузке трансформатора тока. Насыщение сердечника в этом случае происходит до достижения первичным током установившегося значения¹.

Выводы. 1. Для измерений и осциллографирования токов в цепях с выпрямителями желатель-

¹ В ряде выполненных ранее работ (см., например Г. И. Атабеков „Релейная защита высоковольтных сетей“, Госэнергоиздат, 1949) было показано, что трансформаторы тока могут давать значительную погрешность при наличии апериодической составляющей в измеряемом токе.

Измерение толщины масляной пленки в подшипниках и подпятниках скольжения

Инженеры Я. И. Каган, О. И. БОГДАНОВ и Е. И. ЯНТОВСКИЙ

Харьков

Проблема измерения толщины масляной пленки между валом и вкладышем, пятой и подпятником возникла в связи с изучением вопросов трения, износа и смазки машин. Поскольку существующие в настоящее время теоретические методы расчета не позволяют с требуемой точностью решать задачи, связанные с процессами всплывания вала при нестационарных режимах (пуске, реверсе и т. д.) машины, то приходится эти вопросы решать экспериментальным путем.

В литературе описаны различные методы, позволяющие получить сведения о толщине масляной пленки во время работы машины. Среди них имеются оптические, интерференционные, емкостные и индукционные методы. Оптический метод был разработан в 1919 г. По этому методу при помощи микроскопа измерялось смещение центра вала при пуске машины. По результатам измерений можно было судить о толщине масляной пленки в различные моменты времени. В 1922 г. был применен интерференционный метод фоторегистрирования смещения вала с момента его пуска в ход до установившегося состояния. В 1928 г. был применен интерференционный метод исследования толщины масляной пленки, основанный на интерференции лучей при прохождении их через узкую щель между ножом призмы на вкладыше и вращающимся валом. Метод электрического сопротивления не дал устойчивых результатов в связи с изменением сопротивления масляной прослойки, вызванного попаданием в нее металлических продуктов износа и иных загрязнений. В более поздних работах [Л. 1] целый ряд исследователей применял метод электроемкости, однако этот метод также обладает целым рядом существенных недостатков, основным из которых является неточность измерений из-за загрязнения масла металлическими продуктами износа.

Индукционные методы измерения толщины масляной пленки в значительной мере лишены указанного недостатка, так как доля ферромагнитных продуктов износа настолько мала, что практически не сказывается на результатах измерения.

Индукционные методы на радиочастотах основаны на изменении коэффициента взаимной индуктивности двух катушек соленоидного типа при приближении металлической поверхности, которой при экспериментах являлась омедненная поверхность вала.

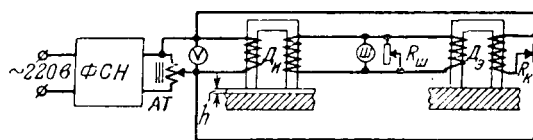


Рис. 1. Принципиальная схема измерения толщины масляной пленки.

ФСН — феррорезонансный стабилизатор напряжения; АТ — автотрансформатор; V — вольметр; $D_{из}$ и $D_{эт}$ — измерительный и эталонный датчики; Ш — вибратор осциллографа; $R_{ш}$ — шунтирующее сопротивление, 50 Ом; $R_{к}$ — компенсирующий потенциометр.

Подобные методы требуют для проведения экспериментов сложной аппаратуры и применимы только для исследований в лабораторных условиях специально созданных моделей. В настоящей работе для исследования образования масляной пленки в подпятнике вертикального электродвигателя при разных режимах пуска, остановки и реверса был применен индукционный метод с использованием тока промышленной частоты. Этот метод позволяет получить надежные стабильные результаты при применении весьма простой схемы измерения, свободной от недостатков, свойственных указанным выше методам.

но пользоваться шунтами, а не трансформаторами тока. Если же по условиям опыта или эксплуатации применение шунтов неудобно и приходится пользоваться трансформаторами тока, необходимо тщательно проверить возможность их применения. Как показывают осциллограммы рис. 2, трансформаторы тока типа МТТ-1 для подобных измерений при частоте 50 гц не пригодны. То же можно сказать и о других трансформаторах тока с пермалловым сердечником (УТТ-5; И-54, И-56 и др.). Что касается трансформаторов тока с сердечником из электротехни-

ческой стали, то вносимая ими погрешность относительно невелика.

2. Трансформаторы тока для измерений в цепях с выпрямителями следует выбирать с запасом по току, не допуская их перегрузки.

3. Целесообразно включить в программу типовых испытаний трансформаторов тока осциллографирование вторичного тока при включении в первичную обмотку постоянного тока. Это даст возможность судить о пригодности данного типа трансформатора для измерений в выпрямительных цепях.

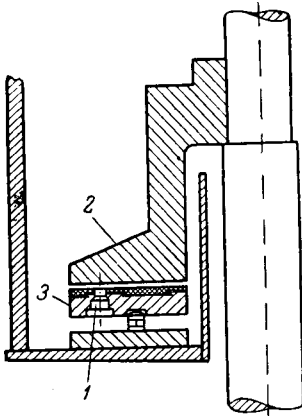


Рис. 2.

1 — индукционный датчик; 2 — пята; 3 — сегмент подпятника.

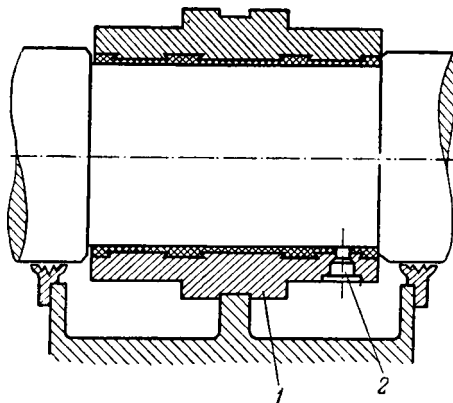


Рис. 3.

1 — вкладыш подшипника; 2 — индукционный датчик.

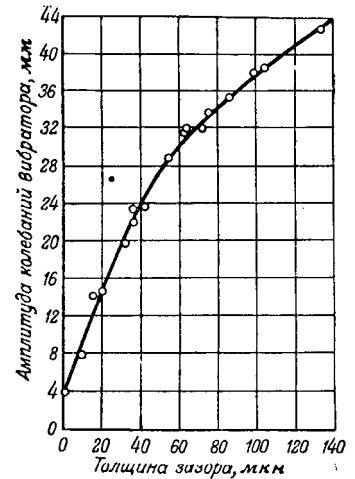


Рис. 5.

Принципиальная схема измерения толщины масляной пленки приведена на рис. 1*.

Основным элементом схемы является датчик D_u , вмонтированный в сегмент подпятника (рис. 2) или во вкладыш подшипника (рис. 3). Датчик представляет собой трансформатор с разомкнутой магнитной цепью. В начальный момент времени полюса датчика замыкаются поверхностью пяты.

h и S — длина и площадь поперечного сечения немагнитного зазора;

μ_0 — магнитная проницаемость зазора.

При постоянстве питающего напряжения с изменением зазора изменяется э. д. с. E_2 , по величине которой можно судить о толщине масляной пленки.

Для получения достаточной чувствительности при измерениях была применена дифференциальная схема. Фотозапись процессов всплытия пяты производилась при помощи осциллографа.

Ножки измерительных датчиков пришабруются заподлицо с опорной поверхностью сегмента. Сегмент и разобранный индукционный датчик показаны на рис. 4. Эталонный датчик помещается в струбцину, где он плотно прижимается к металлической ферромагнитной пластине, изготовленной из того же материала, что и пяты. Это условие необходимо для получения наилучшей компенсации. Эталонный и измерительный датчики должны быть совершенно одинаковы как по форме, так и по электрическим параметрам. В противном случае формы кривых напряжений во вторичных обмотках датчиков будут различны и это ухудшит компенсацию.

Для компенсации схемы измерительный датчик устанавливается на подложку с нулевым зазором. При помощи автотрансформатора на первичную обмотку датчика подается напряжение порядка 5 в.

Регулируя при помощи потенциометра напряжение в первичной цепи эталонного датчика, добиваются минимальной амплитуды колебаний вибратора осциллографа. Шунтирующее сопротивление служит для регулировки чувствительности.

Градуировка схемы производится после ее компенсации путем помещения между ножками измерительного датчика и замыкающей подложкой лепестков слюды, толщина которых предварительно измерялась на оптиметре с точностью до 0,5 мкм. При каждой толщине немагнитного зазора производилась фотозапись колебаний вибратора осциллографа. На рис. 5 при-

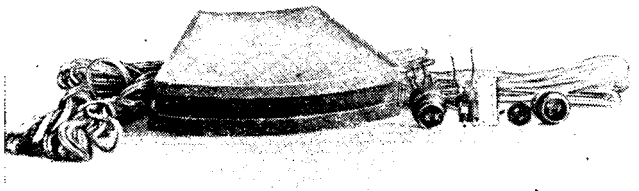


Рис. 4. Сегмент и разобранный индукционный датчик.

Во время запуска машины пяты всплывает, и между полюсами датчика и пятой образуется зазор h , заполненный маслом. На первичную обмотку датчика подается напряжение промышленной частоты. Электродвижущая сила, индуктированная во вторичной обмотке, является функцией зазора h :

$$\dot{E}_2 = - \frac{j\omega l_1 \omega_1 \omega_2 \sqrt{2}}{\sum_1 \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{h}{\mu_0 S}}$$

где ω — угловая частота;
 ω_1, ω_2 — число витков первичной и вторичной катушки;

I_1 — ток в первичной цепи; l_i, S_i, μ_i — длина, площадь поперечного сечения и магнитная проницаемость участка магнитной цепи датчика;

* На рис. 1 для простоты представлена схема включения только одной пары датчиков.

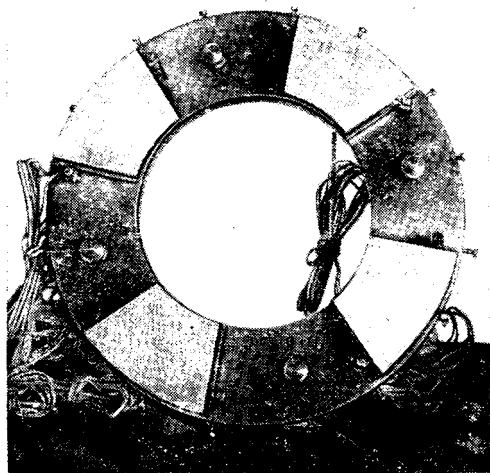


Рис. 6.

веден график зависимости амплитуды колебаний вибратора от толщины немагнитного зазора между датчиком и ферромагнитной подложкой. Построение подобной градуировочной кривой при помощи пластинок, на которые гальваническим путем нанесены немагнитные покрытия [Л. 2], является неправильным, так как возникающие в немагнитной прослойке вихревые токи искажают правильность градуировки примерно на 15%, что было установлено экспериментальным путем. Также было установлено влияние скорости вращения подложки на показания индукционного датчика: в пределах точности 4...5% амплитуда колебаний вибратора при неподвижной и вращающейся подложке одинаковы; поэтому можно пользоваться градуировочными кривыми, полученными при неподвижной подложке, для измерения толщины масляной пленки в работающем подпятнике.

Построение градуировочных кривых производилось на датчиках, вмонтированных в сегмент подпятника. По окончании градуировки сегмент подпятника был установлен на опорном кольце (рис. 6) и вмонтирован в электродвигатель. В результате проведенного исследования были получены осциллограммы пуска, выбега и реверса машины (рис. 7).

Из рассмотрения осциллограммы на рис. 7 видно, что граничное трение существует только в момент пуска, в течение примерно 0,3 сек, после чего возникает и быстро нарастает масляная пленка. Весь процесс образования масляной пленки до толщины 60 мкн, надежно разделяющей трущиеся поверхности, продолжается около 1 сек от начала движения.

При остановке машины масляная пленка сохраняется почти на всем протяжении выбега и исчезает только при скорости не более 10 об/мин. Отсюда следует практически важный вывод, что торможение ротора для уменьшения износа подпятника при выбегае следует начинать при весьма малых скоростях порядка 10 об/мин.

Реверс машины был произведен для того, чтобы проверить работу подпятника насосного агрегата, состоящего из электродвигателя и насоса, в момент аварийного отключения электродвигателя от сети, когда вода, начиная поступать через насос в противоположном направлении, реверсирует его. При проведении испытания насос подключен не был, но скорость реверса примерно соответствовала указанному выше случаю. Из полученной осциллограммы видно, что в этом случае граничное трение, вызывающее износ, существует только на части сегмента, которая при нормальном вращении является входной. Продолжительность граничного трения не более 1,5 сек. Поэтому, если реверс происходит очень редко, то он не может вызвать значительного износа подпятника.

Следует отметить, что все полученные данные о длительности существования граничного трения относятся к сравнительно небольшим удельным давлениям. Например, на испытанном сегменте удельное давление было около 4 кг/см².

Для обеспечения возможности надежного сравнения расчетной величины минимальной толщины масляной пленки, при номинальной скорости с измеренным значением толщины были произведены дополнительные эксперименты. На скользящей поверхности сегмента, залитого баббитом Б-83, были установлены термомпары, теплоизолированные от баббита и измерявшие температуру масла в пленке. При установившемся тепловом режиме эта температура в среднем составляла 50° С.

На опорном винте, который поддерживал сегмент с датчиками, измерявшими толщину пленки, был наклеен проволочный тензомер, измерявший величину вертикальной силы — полной нагрузки на сегмент. При этом опыте нагрузка составляла 900 кг. Вязкость масла измерялась по Энглеру и при измеренной температуре составляла 4,12°, что соответствует 0,26 · 10⁻⁶ кг сек/см². По этим данным согласно методике М. И. Яновского [Л. 3] был произведен расчет минимальной толщины пленки для испытанного сегмента при следующих данных: угол раствора 40°, внутренний и наружный радиусы соответственно равны 17,5 см и 30 см, скорость —

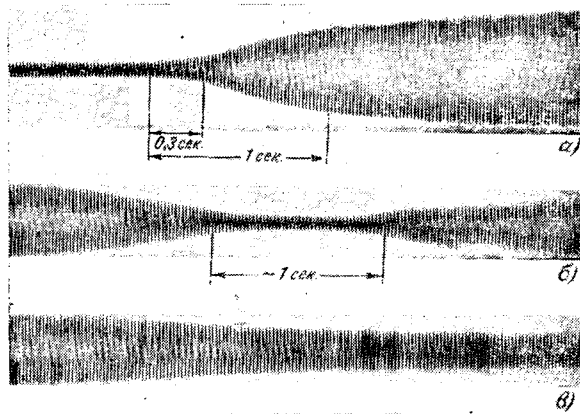


Рис. 7. Осциллограмма пуска (а), выбега (б) и реверса (в).

Создатель промышленной электротермии

К пятидесятилетию со дня смерти Н. Н. Бенардоса

Инж. Л. Д. РАДУНСКИЙ

21 сентября 1955 г. исполняется пятьдесят лет со дня смерти выдающегося изобретателя, создателя дуговой электросварки металлов Николая Николаевича Бенардоса.

Н. Н. Бенардос родился 8 июля (26 июня) 1842 г. в имени своего отца — деревне Бенардосовке, Елизаветградского уезда, Херсонской губернии (ныне село Мостовое, Братского района, Николаевской области УССР). Основной профессией в роду Бенардосов была военная служба. Дед Николая Николаевича, генерал-майор Пантелеймон Егорович Бенардос, был участником отечественной войны 1812 г. и после ранения в бою под Ла-Ротьере, вышел в отставку [Л. 1]. Отец Николая Николаевича, Николай Пантелеймонович, тоже военный, вышел в отставку в 1856 г. в чине полковника и поселился в своем имении; там он провел последние годы жизни.

У Николая Николаевича с детских лет было заметно большое влечение к различным ремеслам (слесарному, кузнечному и др.). Он не имел склонности к военной службе. Получив домашнее образование, Н. Н. Бенардос в 1862 г. поступил на медицинский факультет Киевского университета, а в 1866 г. слушателем в только что открывшуюся Московскую Петровскую земледельческую и лесную академию.

Обнаруженное автором в Государственном историческом архиве Московской области «дело ученого Николая Бенардоса» [Л. 2] позволило уточнить студенческий период его жизни. Будучи на первом курсе, Н. Н. Бенардос подал заявление директору Академии об отпуске его в Париж на Всемирную выставку и летом 1867 г. он посетил Париж. По возвращении из Парижа он

продолжал учиться лишь до лета 1869 г., после чего, не закончив курса, переехал в г. Лух, Костромской губернии, где женился на Анне Алексеевне Лебедевой. Живя в Лухе, Н. Н. Бенардос непрерывно занимался изобретательством. Здесь им были созданы: электрический тигель [Л. 3]; пароход, переходящий мели; снаряд для перевозки тяжестей и ряд других устройств и машин. Осуществление изобретений поглощало значительные средства, не давая никаких материальных выгод, в результате чего материальное положение Н. Н. Бенардоса все более ухудшалось.

В 1876 г. Н. Н. Бенардос выехал за границу, где встретился с П. Н. Яблочковым, имевшим уже в то время мировую известность изобретателя. Общение с Яблочковым и другими выдающимися русскими электротехниками, несомненно, способствовало в дальнейшем ускорению реализации многих изобретательских идей Н. Н. Бенардоса.

Н. Н. Бенардос несколько раз выезжал за границу и в 80-х годах; во время поездок ему удавалось реализовать некоторые из своих изобретений. Так, например, в 1882 г. он установил в Барселоне одну из первых крупных аккумуляторных батарей собственной конструкции [Л. 4]. Пластины аккумуляторов состояли из свинцовых рам, в которые впаивались свинцовые полосы. Стремление усовершенствовать процесс соединения металла при изготовлении аккумуляторов привело Н. Н. Бенардоса к идее использования тепла электрической дуги для плавления и сварки металлов. Осуществленное в 1882 г., впервые в мире, Н. Н. Бенардосом соединение металлов при помощи электрической дуги положило нача-

750 об/мин. Расчетная толщина пленки составляла 95 мкн, а толщина пленки, полученная из опыта измерением осциллограмм, была равна 150 мкн.

Выводы. 1. Рассмотренная методика позволяет во время работы машины производить исследования толщины масляной пленки в подшипниках и подшипниках скольжения, что дает возможность судить о качестве работы той или иной конструкции, а также о соответствии смазочного материала.

2. Разработанная конструкция индукционного датчика дает возможность осуществить постоянный контроль толщины масляной пленки во время работы машины, применяя для этих целей измерительную цепь со стрелочным указывающим прибором.

3. При помощи индукционного датчика можно осуществить автоматическую блокировку круп-

ного агрегата, предусматривающую отключение его в тот момент, когда толщина масляной пленки станет меньше допустимой величины, и тем самым предотвратить аварию, обусловленную внезапным ухудшением условий смазки.

4. Сравнение экспериментального значения толщины пленки с расчетным дает значительное расхождение.

Литература

1. А. К. Зайцев. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Машгиз. ч. 1, стр. 72—74, 1947.
2. А. В. Павленко и А. В. Федоров. Измерение толщины смазочной пленки текстолитовых подшипников при смазке водой. Вестник машиностроения, № 2, 1954.
3. М. И. Яновский. Конструирование и расчет на прочность деталей паровых турбин. Издательство Академии наук СССР, 1947.

[23. 3. 1955]



ло одному из крупнейших изобретений XIX века — дуговой электросварке металлов.

Н. Н. Бенардосу необходимо было одновременно решать комплекс вопросов: технологических — по разработке методов использования тепла электрической дуги для сварки и резки металлов и энергетических — по созданию источника питания сварочной дуги. Упорный и напряженный труд Н. Н. Бенардоса увенчался успехом, — обе поставленные задачи были им разрешены, и после ряда заявок в Департамент торговли и мануфактур 12 января 1887 г. (31 декабря 1886 г.) он получил десятилетнюю привилегию на «способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием тока», названный им «Электрогефест» [Л. 5]. Н. Н. Бенардос запатентовал свое изобретение также во Франции, в Англии, Германии, Италии, Испании, США, Бельгии, Австро-Венгрии, Дании, Швеции, Норвегии и Финляндии.

Это изобретение Н. Н. Бенардоса «...произвело положительный переполох во всемирной сфере капиталистов и техников... предлагали миллионы за способ, но требовали, чтобы практические применения его отвечали тем заявлениям, которые товарищество («Электрогефест» — Л. Р.) сделало» [Л. 6].

В России дуговая электросварка получила применение в первую очередь на железнодорожном транспорте — в Воронежских паровозных мастерских Ростовской железной дороги, Рославльских главных мастерских Орловско-Витебской железной дороги и в ряде других. Это объясняется тем, что в период бурного развития железнодорожного транспорта особенно назрела необходимость в получении быстрого и сравнительно дешевого способа исправления изношенных деталей, а этому требованию в наибольшей степени отвечало изобретение Н. Н. Бенардоса.

Одними из первых в промышленности начали применять дуговую электросварку Коломенский паровозостроительный завод в Голутвине, Лильпоп-Рау и Левенштейна в Варшаве, Гужона в Москве, Невский машиностроительный, Леснера и Путиловский заводы в Петербурге и ряд других. Дуговая электросварка быстро получила применение в разных странах [Л. 7].

Сущность изобретения и возможные области его применения сформулированы в привилегии следующим образом: «Предмет изобретения составляет способ соединения и разъединения металлов действием электрического тока, названный «Электрогефест» и основанный на непосредственном образовании вольтовой дуги между местом обработки металла, составляющим один электрод, и подводимой к этому месту рукояткой, содержащей другой электрод, соединенный с соответственным полюсом электрического тока. Помощью этого способа могут быть выполнены следующие работы: соединение частей между собой, разъединение или резка металлов на части, сверление или производство отверстий и полостей и наплавление слоями. Вольтова дуга образуется в месте, где должна быть произведена одна из

вышеупомянутых работ, приближением угля (или другого проводящего вещества) к обрабатываемой части, причем этот уголь будет положительным или отрицательным полюсом, а другим полюсом будет обрабатываемая часть. Угли или вещества, заменяющие уголь, могут иметь различные формы».

Изобретатель, следовательно, не вносил каких-либо ограничений в отношении материала и формы электрода, а также полярности тока. И действительно в последующих своих разработках Н. Н. Бенардос применял угольные и металлические электроды различной формы, а также комбинированные электроды — из угля и металла в различных сочетаниях (рис. 1).

Им же впервые были предложены трубчатые электроды, заполненные различными сыпучими компонентами, необходимыми для получения наплавленного слоя металла с особыми свойствами. Такие электроды получили практическое применение в работах секции электросварки АН СССР и Института электросварки АН УССР при выполнении наплавочных работ.

С самого начала Н. Н. Бенардос различал соединительную сварку от «наплавления слоями», т. е. от наплавочных работ. Наплавка, как средство восстановления изношенных частей механизмов (наплавка параллелей, конусов поршневых штоков и пр.), а также при изготовлении новых изделий, при создании твердых и износостойких поверхностей, получила впоследствии широкое применение.

В привилегии Н. Н. Бенардос указывал на возможность применения своего изобретения в судостроении для постройки непроницаемых перегородок; для создания «нового строительного материала» при постройке мостов, арок, сводов, потолков и пр. путем, например, заполнения смолой или цементом сварных полых параллелепипедов и других трубчатых элементов. Все эти возможности использования дуговой электросварки нашли в дальнейшем свое осуществление.

Преимущества своего изобретения Н. Н. Бенардос охарактеризовал в привилегии так: «...ско-

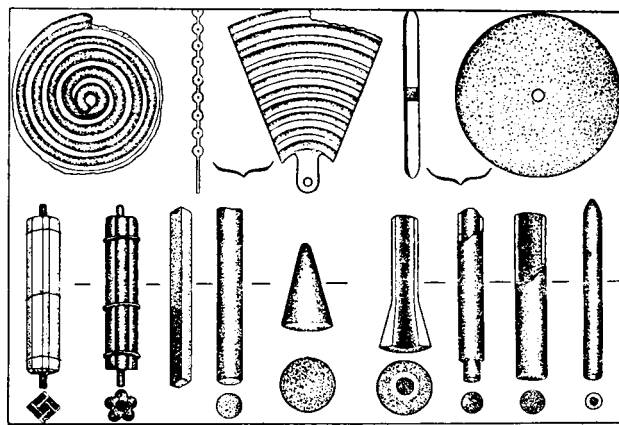


Рис. 1. Электроды для дуговой сварки, предложенные Н. Н. Бенардосом

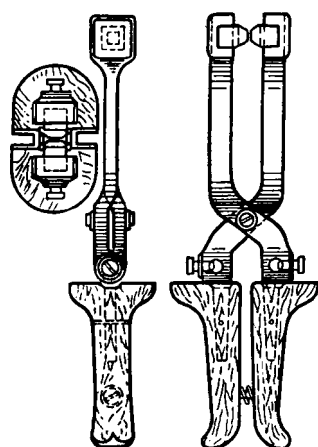


Рис. 2. Клещи для точечной сварки.

рость работы, уменьшение веса, вследствие отсутствия накладок и заклепочных головок, увеличение сопротивления стыка до сопротивления предмета из одной штуки, непроницаемость стыка, что особенно важно для котлов, судов, гидравлических приборов и т. п.». Практика применения этого изобретения полностью подтвердила все отмеченные Н. Н. Бенардосом преимущества.

Изобретателем широко использовались в качестве флюсов кварцевый песок, железная руда и бура (при сварке меди), применялся присадочный металл и были разработаны основные виды сварных соединений — стыковая с разделкой кромок, внахлестку, под углом и др., которые применяются и в современной сварочной технике.

О применении Н. Н. Бенардосом при сварке в качестве флюса кварцевого песка отметил в 1887 г. проф. Д. А. Лачинов [Л. 8]. Для улучшения качества металла шва Н. Н. Бенардос применял проковку каждого наплавленного слоя в отдельности.

Н. Н. Бенардосом была разработана сварка как угольным электродом прямого и косвенного действия, так и металлическим электродом.

Н. Н. Бенардос является также создателем дуговой сварки в струе газа (необоснованно называемой способом Александра). Н. Н. Бенардосом впервые в мире было разработано устройство для сварки металлическим электродом на переменном токе. Он впервые осуществил сварку с применением жидкого присадочного металла. Им же были разработаны: магнитное управление дугой, сварка наклонным электродом, сварка закрытой дугой, резка металла под водой, контактная сварка. Предложенные им в 1887 г. сварочные клещи для контактной точечной сварки (рис. 2) мало отличаются от применяемых в современной сварочной технике.

Н. Н. Бенардос является основоположником механизации и автоматизации сварочного процесса. На рис. 3 показаны некоторые из применявшихся им приспособлений.

Для характеристики исключительно разностороннего круга вопросов, над которыми работал Н. Н. Бенардос, отметим, что в числе более чем 120 его изобретений электротехнике было посвящено 23, электросварке и электротермии 16 и остальные транспорту, двигателям для разных целей, военному делу, домашнему хозяйству и бытовым приборам. Кроме того, им был разработан ряд интересных и оригинальных проектов [Л. 9, 10 и др.], из которых отметим «Проект снабжения Петербурга дешевым электрическим током для освещения и транспорта» [Л. 11]. Ука-

зывая, что до сих пор никто не пытался утилизировать вековую неистощимую силу Невы, «гордо несомой ею в море», Н. Н. Бенардос предложил «...взять у Невы десяток другой тысяч сил для добычи тут же электрического тока и переслать его в Петербург, где по произволу с большими удобствами распределить между потребителями...».

Самым крупным изобретением Н. Н. Бенардоса, принесшим ему мировую славу, является дуговая электросварка металлов. Русское техническое общество наградило его за это изобретение на IV Электрической выставке в Петербурге высшей наградой — золотой медалью РГО [Л. 12]. В 1893 г. Н. Н. Бенардос был избран членом Русского технического общества [Л. 13]. Петербургский электротехнический институт удостоил Н. Н. Бенардоса (1899 г.), одновременно с другими выдающимися русскими электротехниками Д. А. Лачиновым, А. С. Поповым и А. Н. Лодыгиным, за работы по электрической сварке металлов почетным званием инженера-электрика [Л. 14].

Имея большое количество изобретений, Н. Н. Бенардос не извлекал из них никаких доходов. Даже крупнейшее его изобретение «электрогефест» не принесло ему заметного улучшения материального положения, и в конце 90-х годов он выехал из Петербурга и поселился в г. Фастове, Киевской губернии.

Н. Н. Бенардос до последних лет своей жизни не оставлял изобретательской деятельности. В 1899 г. он получил привилегию на способ приготовления губчатого свинца для аккумуляторных пластин, а в следующем году — привилегию на способ изготовления борон методом штамповки из листа.

В последние годы своей жизни Н. Н. Бенардос обратился в Совет Русского технического общества с просьбой об исходатайствовании ему пожизненной пенсии, ввиду расстроенного здоровья и отсутствия всяких средств к существованию. В октябре 1902 г. Совет РГО решил поддержать ходатайство Н. Н. Бенардоса, «принимая во внимание громадные заслуги, оказанные Н. Н. Бенардосом в деле развития техники, а электротехники в особенности, принимая далее во внимание, что работа, которой посвятил себя Н. Н. Бенардос, поглотила все его состояние, и в конце концов подорвала его здоровье...» [Л. 15].

Здоровье Н. Н. Бенардоса продолжало ухудшаться. Уже совершенно больным он приехал в Москву, находился значительное время на лечении в больнице, а затем около года прожил у старшего сына. Вернувшись затем в Фастов, Николай Николаевич прожил недолго, он умер 21 (8) сентября 1905 г.¹ в возрасте 63 лет.

Идеи Н. Н. Бенардоса в области изобретательства намного опередили свою эпоху; в условиях царской России он не имел возможности их осуществить. Подлинный расцвет созданного Н. Н. Бенардосом процесса дуговой электросвар-

¹ Дата смерти Н. Н. Бенардоса и место его погребения были уточнены Б. Н. Ржонническим.

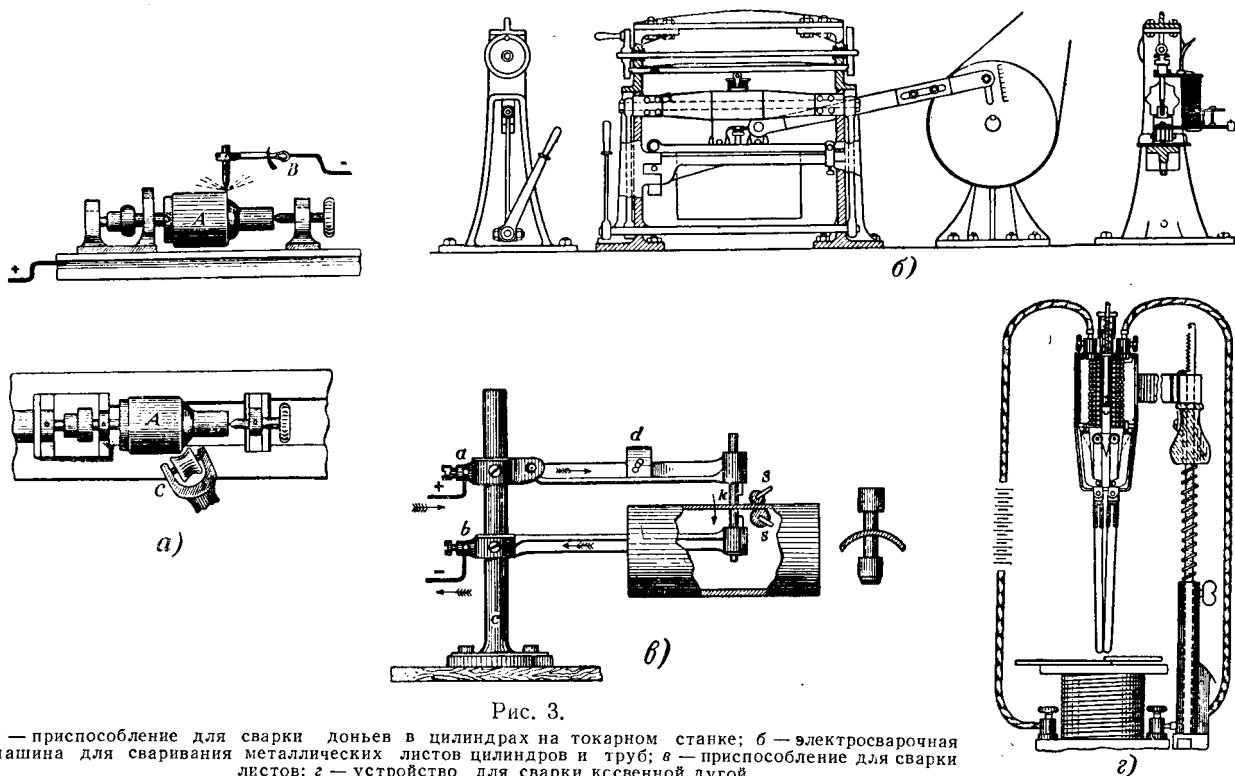


Рис. 3.

а — приспособление для сварки доньев в цилиндрах на токарном станке; б — электросварочная машина для сваривания металлических листов цилиндров и труб; в — приспособление для сварки листов; г — устройство для сварки ксвенной дугой.

ки наступил лишь после Великой Октябрьской социалистической революции. Советские ученые и специалисты неустанно работают над изучением и дальнейшим развитием наследства, оставленного выдающимся соотечественником Н. Н. Бенардосом.

Угольная дуга получила наиболее широкое применение при сварке бортовых соединений из тонкой стали, а также при сварке цветных металлов и сплавов.

В основу наиболее прогрессивного процесса автоматической сварки, созданного советскими специалистами в 1940 г., положена идея защиты зоны сварки флюсом, высказанная и осуществленная Н. Н. Бенардосом еще в 80-х годах.

В современном способе атомно-водородной сварки осуществляется предложенный Н. Н. Бенардосом метод сварки дугой косвенного действия.

Идея Н. Н. Бенардоса об использовании защитного газа для предохранения наплавленного металла от воздействия воздуха получила свое осуществление в работах советских специалистов по созданию способов сварки в струе аргона, гелия, азота и других газов. Институтом электросварки АН УССР разработан способ сварки угольной дугой в атмосфере углекислого газа. «...Этот способ, — писал академик Е. О. Патон, — дает превосходные результаты при сварке бортовых соединений из тонкой стали и оказывается наиболее эффективным из всех известных способов сварки тонкой стали» [Л. 16]. В последнее время советскими учеными разработан способ сварки плавящимся электродом в атмосфере углекислого газа [Л. 17].

Осуществление в современной сварочной тех-

нике получил предложенный Н. Н. Бенардосом метод сварки встык вертикальных швов с принудительным формированием металла шва. Принцип предложенного им механизма (рис. 4) для получения шва положен в основу разработанного Институтом электросварки АН УССР им. Е. О. Патона способа однопроходной вертикальной сварки с принудительным формированием металла шва, впервые в мировой технике примененного в 1949 г. при постройке кожуха доменной печи на заводе «Запорожсталь».

Предложенный Н. Н. Бенардосом в 80-х годах полуавтоматический способ сварки наклонным электродом получил дальнейшее развитие и широкое применение в 30-х годах главным образом в вагоностроении.

В последние годы на основе способа Н. Н. Бенардоса разработан высокопроизводительный способ автоматической сварки под флюсом меди угольным или графитовым электродом [Л. 18].

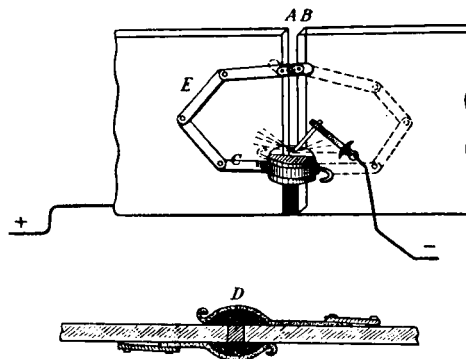


Рис. 4. Приспособление для сварки встык вертикальных швов.

Широкое применение, особенно в период Великой Отечественной войны и после нее, при восстановлении железнодорожных мостов и ремонте подводной части кораблей, получил способ подводной сварки и резки, разработанный и доведенный до широкого практического применения член.-корр. Академии наук СССР К. К. Хреновым.

Впервые способ электродуговой резки металлов под водой был предложен и продемонстрирован Н. Н. Бенардосом в 1887 г. [Л. 19].

Сварка труб спиральным швом впервые в мире была предложена Н. Н. Бенардосом, который в 1892 г. демонстрировал на IV электрической выставке в Петербурге изготовленную трубу [Л. 20]. Это предложение Н. Н. Бенардоса осуществлено ЦНИИТМАШ, разработавшим способ автоматической электродуговой сварки труб спиральным швом, с успехом применяющийся в настоящее время в нашей промышленности (Трубопрокатный завод им. Куйбышева) [Л. 21].

В основе работ академика В. П. Никитина по созданию метода сварки с разделением тепловых процессов подготовки основного и присадочного металлов лежит идея способа сварки с жидким присадочным металлом, выдвинутая Н. Н. Бенардосом в 1891 г. [Л. 22].

В широко применяемых в настоящее время электромагнитных стендах использована идея Н. Н. Бенардоса о закреплении свариваемого металла при помощи электромагнитов.

Ограничиваясь приведенным далеко не полным перечнем современного использования способа сварки и предложений Н. Н. Бенардоса, необходимо констатировать, что идеи его в области дуговой электросварки еще не исчерпаны и при глубоком их изучении могут быть успешно использованы в сочетании с возможностями, открывающимися в наши дни на основе новейшей техники.

Литература

1. Русский биографический словарь под ред. Половцева, т. 2, 1900.

2. Государственный исторический архив Московской области (ГИАМО), фонд 228, Петровская земледельческая и лесная академия. Св. 15 № п.л. 58. Личное дело слушателя Академии Николая Бенардоса.

3. М. А. Шателен. Из истории электросварки. Сообщение на заседании Комиссии по истории физико-математических наук. Вестник Академии наук СССР, № 4, 1949.

4. К. К. Хренов, Н. Н. Бенардос — изобретатель дуговой электросварки. Автогенное дело, № 1, 1936.

5. Н. Н. Бенардос, Привилегия на «способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока», выданная 31/XII 1886 г. за № 11982. Записки Русского технического общества, вып. 9, 1888.

6. А. А. Троицкий. О современном положении дела электрической обработки металлов по способам Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова. Журнал «Записки Русского технического общества», вып. 6, 1895.

7. А. С. Огневский и Л. Д. Радунский. Николай Николаевич Бенардос, Госэнергоиздат, 1952.

8. Д. А. Лачинов. Электрическое паяние металлов по способу «Электрогефест». Электричество, № 7, 1887.

9. Н. Н. Бенардос. Способ переправы войск через реки и другие препятствия, представляемые водой. СПб, 1896.

10. Н. Н. Бенардос. Проект способа починки, перевозки и подъема «царь-колокола». СПб, 1890.

11. Н. Н. Бенардос. Проект снабжения г. С.-Петербурга дешевым электрическим током для освещения и движения. СПб, 1892.

12. Распределение наград между экспонентами IV электрической выставки. Электричество, № 11—12, 1892.

13. Об избрании Н. Н. Бенардоса в члены Русского технического общества. «Записки Русского технического общества», вып. 7, 1894. Приложения, стр. 107.

14. Государственный исторический архив Ленинградской области (ГИАЛО), фонд 990. Электротехнический институт, св. 211, д. 2708, л. д. 330—332.

15. О прошении Н. Н. Бенардоса об исходатайствовании пожизненной пенсии. «Записки Русского технического общества», № 12, 1902.

16. Е. О. Патон. Сварка угольной дугой в атмосфере углекислого газа. Автогенное дело, № 11, 1950.

17. К. В. Любавский и Н. М. Новожилов. Сварка плавящимся электродом в атмосфере защитных газов. Автогенное дело, № 1, 1953.

18. Н. А. Ольшанский. Автоматическая сварка меди под флюсом. Автогенное дело, № 11, 1950.

19. А. М. Вознесенский. Об электрическом паянии и наплавке металлов по способу Н. Н. Бенардоса. Протоколы заседаний и труды X совещательного съезда инженеров службы подвижного состава и тяги русских железных дорог. Москва, 1888.

20. В. П. Никитин. Русское изобретение — электрическая дуговая сварка. Изд. АН СССР, 1952.

21. И. Л. Бринберг, П. Г. Рыбалко, М. Ф. Хробастов и В. П. Якушкин. Автоматическая электродуговая сварка труб спиральным швом. Автогенное дело, № 4, 1953.

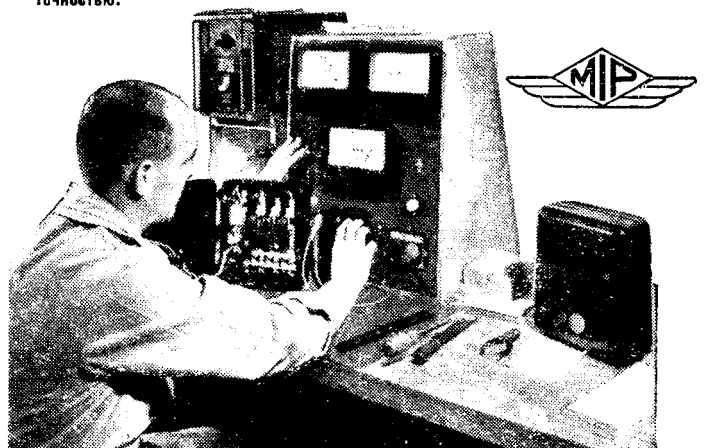
22. Новости в деле электрического паяния. Электричество, № 22, 1893.

Приборы распределительного щита „ПУЛЛИН“

Фирма изготовляет всевозможные электрические измерительные приборы и испытательные устройства.

На нижеприведенной иллюстрации некоторые из приборов „ПУЛЛИН“, установленные на панели или распределительном щите, показаны при испытании аппаратуры управления электродвигателей.

Номенклатура производства фирмы охватывает все приборы распределительного щита, в том числе: амперметры переменного и постоянного тока, вольтметры и ваттметры, частотомеры и указатели температуры. Все они изготовляются в большом ассортименте размеров и формы корпусов со шкалами длиной от 38 до 152 мм. Приборы с специальными характеристиками или специальными шкалами могут быть изготовлены по особому заказу. Приборы „ПУЛЛИН“ известны прочностью конструкции, надежностью и высокой точностью.



MEASURING INSTRUMENTS (PULLIN) LIMITED
ELECTRIN WORKS, WINCHESTER ST., ACTON, LONDON, W.3 АНГЛИЯ

СТРОИТЕЛЬСТВО ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВНУТРЕННИМ ВОДОРОДНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ОБМОТОК В ЕВРОПЕ

В данном обзоре дается описание европейских конструкций турбогенераторов с внутренним охлаждением обмоток. Фирмой ВВС (Швейцария) в 1954 г. изготовлен первый турбогенератор 150 тыс. кВт (187,5 тыс. кВа) для станции Вайсвайлер Рейнско-Вестфальского Объединения. Генератор предназначен для работы при давлении водорода в кожухе в 1 ати. При повышении этого давления мощность генератора может достигнуть 200 тыс. кВа. Фирма считает, что применение внутреннего охлаждения генераторов необходимо только при очень больших мощностях (150 тыс. кВт и выше). Отвод тепла от роторов машин меньших мощностей возможно еще производить при помощи дополнительных охлаждающих каналов в роторных зубцах.

Ротор выполненного турбогенератора снабжен пазами довольно сложной конфигурации (рис. 1, а). Стержни, сложенные попарно, совместно с канавками, выфрезованными в зубьях, образуют внутренние охлаждающие каналы, через которые водород проходит с высокими скоростями, унося с собой около 75...80% тепла, выделяемого в меди обмотки и стали зубьев.

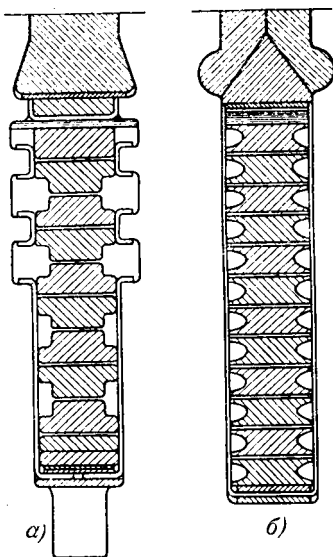


Рис. 1. Конструкции паза ротора с внутренним водородным охлаждением.

а — конструкция фирмы ВВС (Швейцария); б — конструкция фирмы АЕГ.

Сечение паза ротора приведено на рис. 1, б. Боковые каналы для внутреннего охлаждения образуются профильными медными стержнями обмотки. Необходимо, однако, отметить, что при такой конструкции паза затруднена теплоотдача через изоляцию паза к стали зубьев.

Водород подается в оба торца ротора и, пройдя по каналам катушек, выходит через канал в средней части ротора.

Эффект применения внутреннего охлаждения обмоток ротора весьма ощутителен, что видно из рис. 2. Практически длина ротора машины с внутренним охлаждением вдвое большей мощности при одном и том же диаметре

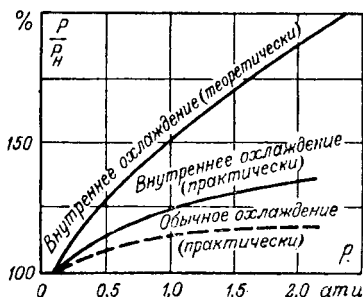


Рис. 2. Относительная мощность генератора в зависимости от давления водорода при обычном и внутреннем охлаждении обмоток ротора.

увеличивается лишь в 1,1 раза или, наоборот, при тех же габаритах машины ее мощность возрастает в 1,89 раза. Этот расчет имеет в виду увеличение давления охлаждающей среды до 2 ати.

Однако в перспективе укрупнение мощностей агрегатов наталкивается на некоторые трудности. Например, конструирование единиц мощностью 150 тыс. кВт и выше лимитируется возможностью выполнения крупных цельнокованных роторов.

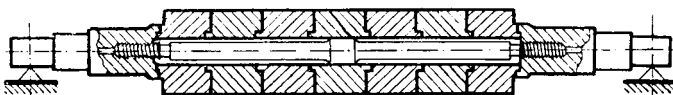


Рис. 3. Схема конструкции составного ротора фирмы ВВС.

В связи с этим фирмой ВВС для своего турбогенератора 187,5 тыс. кВа был изготовлен составной ротор из отдельных кованных и затем тщательно обработанных колец, надетых на стяжной болт, нарезанный с обоих концов (левая и правая резьба), и стянутых при помощи концов вала ротора (рис. 3 и 4). Эти кольца имеют относительно небольшие размеры и поэтому могут быть выполнены однородными и без дефектов.

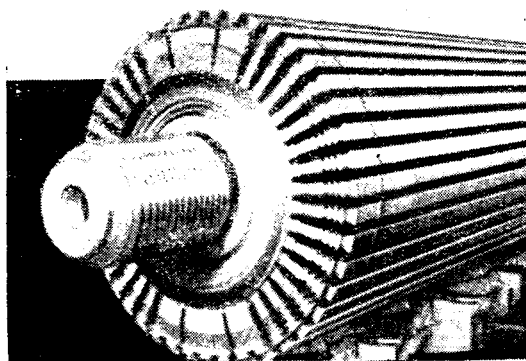


Рис. 4. Общий вид ротора генератора 187,5 тыс. кВа без обмотки со снятым концом вала.

Усилением натяга на поверхность соприкосновения отдельных роторных колец можно добиться того, что составной ротор будет работать как однородная цельнокованная конструкция.

Литература

1. E. Wiedeman. BBC Mitteilungen, стр. 79, № 3/4, 1954.
2. O. Hess. CIGRE, доклад № 128, 1954.
3. F. Moldenhauer. Technische Mitteilungen, стр. 281, № 7/8, 1954.

Инж. А. М. Берковский

ПОЛИЭТИЛЕН В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

Наряду с высокими электроизоляционными характеристиками полиэтилен обладает хорошими физико-химическими и механическими свойствами и, в частности, малой диффузионной способностью, обуславливающими его успешное применение в качестве материала для влагозащитных кабельных оболочек.

Преимущества полиэтиленовых оболочек перед свинцовыми состоят в меньшем весе, коррозионной стойкости в самых агрессивных средах, возможности более эффектив-

ного использования сечения трубопроводов, так как благодаря гладкой поверхности кабеля в полиэтиленовой оболочке легче затягиваются в блоки и извлекаются из них.

Кроме того, кабели с полиэтиленовой оболочкой можно прокладывать на небольшой глубине непосредственно в земле, в то время как кабели в свинцовой оболочке необходимо прокладывать в блоках, что усложняет и удорожает монтаж кабельных линий.

В условиях вибрации полиэтиленовая оболочка значительно превосходит свинцовую, так как вибростойкость полиэтилена существенно выше вибростойкости не только чистого свинца, но и его сплавов. Преимущества полиэтиленовой оболочки перед свинцовой сказываются и при прокладке кабеля в химически агрессивных средах.

Особо следует отметить высокую гибкость кабелей в полиэтиленовой оболочке, благодаря которой возможно создание кабелей для многократного использования, приобретающих существенное значение при ремонте воздушных и кабельных линий, временной замене поврежденных участков кабеля, прокладке на выставках и т. п.

Однако кабельная оболочка, изготовленная только из полиэтилена, не в состоянии удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к оболочкам кабелей с гигроскопичной изоляцией, и, в первую очередь, не может предохранить изоляцию от некоторого проникновения влаги. Поэтому в качестве заменителя свинцовой оболочки кабелей с гигроскопичной изоляцией полиэтилен должен применяться обязательно в сочетании с металлом.

В процессе решения проблемы полной или частичной замены свинца, как материала для влагозащитной оболочки кабелей с гигроскопичной изоляцией, в США были разработаны и внедрены три типа комбинированных «металло-пластмассовых» оболочек. Обязательной составной частью оболочки каждого типа является шланг из полиэтилена. Эти три типа оболочек (см. рисунок) известны под названиями «алпэт», «сталпэт» и «лепэт», образованными сочетанием слов, характеризующих составные части оболочки:

- 1) «алпэт» (alpth) — Алюминий-ПолиЭтилен (ALuminium-PolyETHylen);
- 2) «сталпэт» (stalpth) — Сталь-Алюминий-ПолиЭтилен (Steel-ALuminium-PolyETHylen);
- 3) «лепэт» (lepeith) — свинец-ПолиЭтилен (LEad-PolyETHylen).

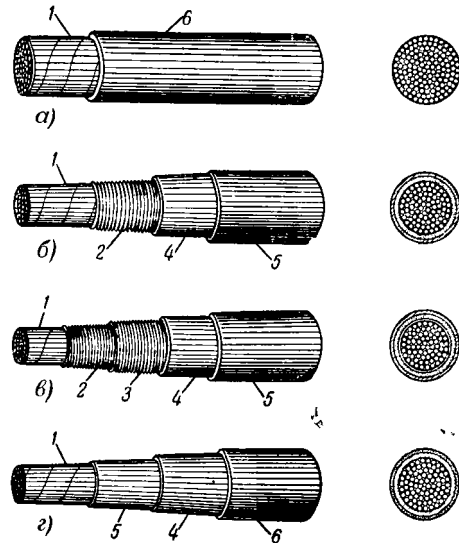
Кроме указанных трех типов оболочек, применяется наложение наружного полиэтиленового шланга поверх утоненной свинцовой оболочки при необходимости защиты от коррозии кабелей, прокладываемых в блоках. Полиэтиленовый шланг благодаря сравнительно высокой влагонепроницаемости хорошо защищает свинцовую оболочку от коррозии, прочен и стоек к истиранию.

Оболочка «алпэт». Оболочка «алпэт» состоит из гофрированной алюминиевой ленты толщиной 0,2 мм и полиэтиленового шланга.

Поверх поясной изоляции кабеля накладывается продольно с положительным перекрытием гофрированная алюминиевая лента. Шов алюминиевой оболочки заполняется полиизобутиленовым цементом. Гофрирование ленты особенно необходимо для толстых кабелей диаметром свыше 15 мм, так как оно повышает их гибкость. Гофрирование ленты производится в поперечном направлении непосредственно перед наложением ленты на кабель. Форма гофра приблизительно синусоидальная, шаг гофрирования 2,5 мм.

Поверх алюминиевой оболочки на кабель накладывается слой цементирующей термопластичной массы, скрепляющей внутреннюю алюминиевую оболочку с наружной полиэтиленовой. Поверх этого слоя на кабель выпрессовывается полиэтиленовая оболочка. Существенным недостатком этой оболочки является подверженность полиэтилена старению под действием солнечных лучей. Светостойкость полиэтилена можно значительно повысить при равномерном распределении в объеме полиэтилена тщательно диспергированной сажи в количестве 2%. В смесь добавляется также антиокислитель.

Оболочка «алпэт» обеспечивает хорошую защиту от механических повреждений и от коррозии; ее сопротивление усталости выше, чем у свинцовой оболочки, а вес меньше, что позволяет изготавливать кабель большими строительными длинами. В отношении влагостойкости оболочка «алпэт» несколько уступает свинцовой, хотя номинальный срок службы обеих оболочек одинаковый.



Типы влагозащитных оболочек кабелей.

а — однородная оболочка; б — оболочка «алпэт»; в — оболочка «сталпэт»; г — оболочка «лепэт».
1 — скрученный сердечник кабеля, обмотанный бумажной поясной изоляцией; 2 — алюминиевая гофрированная лента; 3 — стальная гофрированная лента; 4 — цементирующая прослойка; 5 — полиэтиленовый шланг; 6 — свинцовая оболочка.

Существенным недостатком оболочки «алпэт» является усложнение и, следовательно, удорожание операции сращивания кабелей. Последнее объясняется тем, что свинцовые муфты могут быть соединены с оболочкой «алпэт» только при использовании дополнительных термопластичных клеящих материалов и наличии специальных приспособлений.

Оболочка «сталпэт». В 1951 г. для устранения двух основных недостатков оболочки «алпэт» — недостаточной влагостойкости и сложности сращивания — последняя была усовершенствована и преобразована в оболочку «сталпэт».

Оболочка «сталпэт» является трехслойной и состоит из алюминиевой ленты, стальной оцинкованной ленты и полиэтиленового шланга. Гофрированная алюминиевая лента толщиной 0,2 мм накладывается на скрученный сердечник кабеля, поперечному продольно, но не с перекрытием, как это имеет место в оболочке «алпэт», а с небольшим зазором. Поверх алюминиевой ленты продольно накладывается гофрированная стальная оцинкованная лента толщиной 0,13 мм. Продольный шов стальной ленты сваривается, благодаря чему достигается большая герметичность по сравнению с оболочкой «алпэт». Стальная оцинкованная лента покрывается клеевой термопластичной массой, поверх которой накладывается полиэтиленовый шланг.

Последовательное наложение на сердечник кабеля алюминиевой и стальной гофрированных лент производится за одну операцию. Сварка шва стальной ленты является ответственной операцией при изготовлении оболочки подобной конструкции и производится на машине, специально сконструированной для этой цели.

Сварка выполняется после того, как оба металлических слоя уже наложены на сердечник кабеля. Внутрь продольного шва гофрированной стальной оболочки кабеля, движущегося через машину со скоростью 15 м/мин, непрерывно подается плоская лента припоя шириной 6,3 мм. Далее кабель проходит под рабочей катушкой индукционного нагревателя мощностью 4—5 кка в частотой тока 375 кГц, и перекрывающиеся края стальной ленты надежно сплавляются. Благодаря этому влагостойкость оболочки «сталпэт» значительно повышается по сравнению с оболочкой «алпэт», что, в свою очередь, позволяет уменьшить толщину полиэтиленового шланга приблизительно на 20%. Поэтому себестоимость оболочки «сталпэт» почти такая же, как и оболочки «алпэт». Кроме того, упрощается и существенно удешевляется операция сращивания кабелей, так как свинцовые соединительные муфты легко припаяются к свинцовой поверхности стальной ленты.

Оболочка «лепэт». Оболочка типа «лепэт» в основном предназначена для защиты кабелей дальней связи от повреждений при ударах молний. Особое значение этот вопрос приобретает при прокладке кабелей в районах с большой грозовой интенсивностью.

В отличие от оболочек типа «алпэт» и «сталпэт», у которых полиэтиленовый шланг является наружной частью, а одна или две гофрированные металлические ленты — внутренней, в оболочке «лепэт» относительное расположение слоев металла и полиэтилена обратное. Скрученные и обмотанные поясной изоляцией жилы (сердечник) кабеля покрыты оболочкой из полиэтилена толщиной 1,9 мм, поверх которой на кабель накладывается свинцовая оболочка. Между слоями полиэтилена и свинца располагается клейкая термопластическая масса.

Проведенные в производственных условиях испытания показали, что полиэтиленовая оболочка указанной толщины в течение 3 сек выдерживает напряжение постоянного тока в 20 кв, что соответствует импульсной прочности в 28 кв.

Высокая импульсная прочность полиэтилена в сочетании с низким сопротивлением свинца постоянному току обеспечивает отличную защиту кабеля от ударов молний в районах с низким или средним удельным сопротивлением почвы. Так, например, кабель с оболочкой «лепэт», при диаметре сердечника 40 мм, имеющий сопротивление оболочки около 1,0 ом/км, будучи проложен в почве с удельным сопротивлением не более 1800 ом·м, защищен от ударов таких молний, при которых оболочка подвергается воздействию тока 150 тыс. а. В результате столь высокой защищенности от ударов молний в районах, где количество грозовых дней в году не превышает 50, оболочка «лепэт» гарантирует не более одной аварии в год на каждые 1600 км кабельной линии.

Литература

1. Tr. AIEE, т. 70, ч. II, стр. 1811, 1951.
2. El. Eng., т. 70, стр. 1070, № 12, 1951.
3. Bell Lab. Record, т. 32, стр. 415, № 11, 1954.

Инж. Д. Л. Шарле, инж. Р. М. Лакерник

ТОКИ В ДУГЕ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ МАЛЫХ ИНДУКТИВНЫХ ТОКОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ

Отключение малых индуктивных токов, в частности тока холостого хода высоковольтных трансформаторов, часто сопровождается перенапряжениями, вызванными обрывом дуги до момента естественного прохождения рабочего тока через нуль. Математический анализ и лабораторные опыты показали, что преждевременный обрыв дуги связан с наложением незатухающих высокочастотных колебаний тока на рабочий ток.

Для выявления причины возникновения таких колебаний необходимо рассмотреть переходные процессы в однолинейной схеме замещения, изображенной на рисунке, в момент отключения выключателя В.

Падение напряжения в дуге выключателя можно приближенно принять равным:

$$\Delta u = a - b,$$

где a и b — постоянные.

В этих условиях можно доказать, что ток в дуге приближенно определяется выражением следующего вида:

$$i \approx K_1 (\sin \omega t + \vartheta_1) + K_2 e^{-\frac{r-b}{2L}t} \sin \left(\sqrt{\frac{2}{LC_1} - \frac{(r-b)^2}{4L^2}} t + \vartheta_2 \right) + K_3 e^{\frac{r-b}{2L_1+L_2}t} \sin \left(\sqrt{\frac{L_1+L_2}{2L_1L_2C_1}} t + \vartheta_3 \right) + K_4 e^{-\frac{r-b}{L_1+L_2}t} + K_5$$

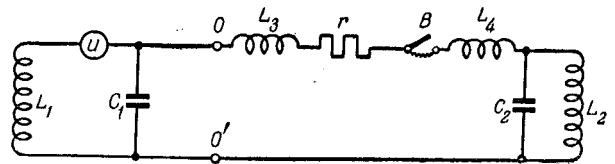


Схема замещения цепи в момент отключения выключателя.

В — выключатель; L_1, C_1 — индуктивность и эквивалентная емкость источника питания; L_2, C_2 — индуктивность и эквивалентная емкость отключаемого трансформатора; $L_3 + L_4 = L$ — индуктивность соединительных проводов от питающего до отключаемого трансформатора; r — активное сопротивление цепи; u — питающее напряжение 50 гц.

где $K_1 \dots K_5$ и $\vartheta_1 \dots \vartheta_3$ — постоянные (K_1 несколько меньше амплитуды рабочего тока до отключения выключателя).

Как видно из формулы, ток в дуге складывается из пяти составляющих: 1) тока рабочей частоты; 2) высокочастотного колебательного тока в контуре, состоящем из емкостей C_1 и C_2 , индуктивности L соединительных проводов и сопротивления дуги; 3) колебательного тока сравнительно низкой частоты в контуре, включающем индуктивности L_1 и L_2 ; 4) апериодической составляющей; 5) постоянной величины (которая практически может быть равна нулю). Наибольшее значение имеют первые две составляющие.

В зависимости от соотношения величин r и b коэффициент затухания в высокочастотном колебательном контуре может быть либо положительным, либо отрицательным. В последнем случае происходит самовозбуждение колебаний. Возникновение самовозбуждения особенно вероятно при энергичном гашении дуги, когда дуга имеет резко падающую вольтамперную характеристику.

Как показывают осциллограммы, при отключении холостого хода трансформатора воздушным выключателем 20...40 кв обычно чередуются периоды самовозбуждения и затухания высокочастотных колебаний. Преждевременный обрыв дуги происходит в том случае, когда в момент приближения рабочего тока к нулю имеет место самовозбуждение колебаний.

Если емкость C_1 питающей цепи мала (питание от отдельного трансформатора при малой длине соединительных проводов), то частота колебаний соответственно весьма высока — порядка 100 кГц. В этом случае окончательному обрыву тока предшествуют несколько погасаний и повторных зажиганий дуги, следующие одно за другим с интервалами порядка 10 мсек. На изоляцию трансформатора воздействуют в этом случае быстро следующие одно за другим перенапряжения небольшой амплитуды с длиной фронта $2 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-4}$ сек. При каждом повторном зажигании дуги напряжение спадает до нуля в течение $10^{-5} \dots 10^{-6}$ сек. Окончательный обрыв происходит при малом значении рабочего тока.

Если со стороны питания к цепи присоединена линия на холостом ходу (в точках $O-O'$ на рисунке), то частота колебаний будет меньше, чем в предыдущем случае. Обрыв дуги происходит при первом же прохождении тока i через нуль. Амплитуда перенапряжений в этом случае больше, но скорость нарастания их меньше, чем при отсутствии линии. Этот вывод подтверждается результатами испытаний воздушного выключателя 220 кв на шведской электростанции Стадсфорсен.

Самовозбуждение высокочастотных колебаний можно предотвратить либо путем уменьшения интенсивности гашения дуги, либо включением высокоомного сопротивления последовательно с дугой (что в практических условиях трудно осуществимо), либо, наконец, включением нелинейного сопротивления параллельно дуге. В цепи с воздушным выключателем самовозбуждение колебаний удалось в лабораторных условиях устранить включением последовательно в цепь сопротивления 770 ом. При применении маломасляного выключателя 15 кв, 310 тыс. ква устранение самовозбуждения было более затруднительным: потребовалось включение сопротивления не менее 5000 ом.

(Р. Baltensperger, Bull. SEV, стр. 1, № 1, 1955).

Кандидат техн. наук Я. М. Червоненкис



КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ В ЛЕНИНГРАДЕ

11 марта с. г. в Ленинграде состоялась конференция читателей журнала «Электричество». Во вступительном слове председатель Оргкомитета по созыву конференции, заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский отметил семидесятилетие журнала «Электричество», являющегося ведущим печатным органом советской научной электротехнической мысли.

Член редколлегии журнала академик М. П. Костенко в докладе о работе журнала за 1950—1954 гг. отметил значение журнала в деле распространения глубоких теоретических знаний и передового прогрессивного опыта в области электроэнергетики и электротехнической промышленности. Тираж журнала увеличился с 10 200 экземпляров в 1949 г. до 20 000 экз. в 1954 г. в основном за счет индивидуальной подписки; возросло распространение журнала также и за пределами Советского Союза. Докладчик остановился на ряде еще не изжитых недостатков, устранение которых является главной задачей редакции журнала на ближайший период. Необходимо усилить привлечение авторов из крупных промышленных и научных центров страны, поднять удельный вес статей по вопросам, связанным с крупным энергетическим строительством, с эксплуатацией электрических станций и сетей, с развитием автоматизированного электропривода. Следует увеличить число передовых статей, посвященных узловым проблемам электрификации, и др. Для укрепления связи редакции с работниками промышленности нужно и дальше развивать организацию корреспондентских постов журнала на ряде крупнейших предприятий страны.

В прениях выступили читатели: Г. О. Левит, А. Я. Бергер, П. М. Ипатов, М. О. Каменецкий, Е. Г. Комар, В. Т. Ренне, М. И. Оранский, Б. Л. Айзенберг и др. Они подчеркивали важность: подведения редколлегией итогов по дискуссиям, проводимым в журнале; дальнейшего упрощения формы изложения статей с целью расширения круга их читателей; помешения в первых номерах каждого года обзоров достижений советской и зарубежной электротехники, как это практиковалось в прошлые годы в журнале «Электричество»; укрепления состава рецензентов журнала с целью пополнения его специалистами, больше связанными с хозяйственной жизнью страны, что должно

благоприятно отражаться на качестве их отзывов по статьям; дальнейшего сокращения сроков прохождения в редакции рукописей; рассмотрения на страницах журнала вопросов, посвященных электрификации сельского хозяйства, изолирующим электроматериалам, конденсаторам и т. д.

Некоторые участники конференции высказали свое несогласие с принятым редакцией порядком, когда авторам остается неизвестным рецензент, дававший редакции заключение по статье; анонимная рецензия снижает ответственность рецензента.

В заключительном слове академик М. П. Костенко указал, что большая часть замечаний, сделанных выступавшими, разделяется редакцией. Главный редактор журнала проф. Н. Г. Дроздов подчеркнул ценность активной помощи журналу со стороны читательских конференций, организуемых редакцией совместно с ВНИТОЭ, и сообщил, что результаты конференций читателей, состоявшихся в Харькове, Свердловске и Ленинграде, будут использованы редколлегией журнала в своей дальнейшей работе по руководству журналом.

В решении, принятом конференцией, указано на то, что основная тематика журнала «Электричество» должна отражать состояние современной отечественной и мировой электротехнической науки и практики; что в журнале следует периодически помещать статьи проблемного и обзорного характера по актуальным и недостаточно ясным вопросам, затрагивающим вместе с тем важнейшие задачи технической политики; что следует расширить информацию о новых видах электрических машин, приборов, оборудования и материалов и о работе зарубежных, в особенности международных, конференций и съездов.

В решении конференции также указано на целесообразность выпуска сводного указателя статей журнала «Электричество» за истекшие годы и возобновления выпуска Календаря-справочника «Электричество».

Конференция приняла решение о посылке приветственной телеграммы старейшему электротехнику страны члену-корр. Академии наук СССР, проф. М. А. Шателену.

*Кандидат техн. наук Б. Л. Айзенберг
ЛОНТОЭП*

Профессор М. Д. КАМЕНСКИЙ

К 70-летию со дня рождения и к 45-летию научно-педагогической деятельности

Михаил Давидович Каменский родился в Петербурге в 1885 г. в семье врача, преподавателя Военно-медицинской академии. По окончании гимназии М. Д. Каменский в 1903 г. поступил в Петербургский политехнический институт, по окончании которого он был оставлен при институте для руководства лабораторными занятиями по переменным токам; стех пор, 45 лет, он ведет научно-педагогическую работу и, кроме того, активно участвует в общественной работе, в настоящее время М. Д. Каменский председатель секции электрических сетей ЛОНТОЭП.

Сразу после революции М. Д. Каменский активно включился в практическую работу по восстановлению разрушенного империалистической войной и интервенцией хозяйства молодой Советской республики. В 1918—1919 гг. он был комиссаром ВСНХ по предприятиям бывшего Акц. об-ва «Динамо», по демонтажу и перевозке электростанций из Петрограда на Урал. В 1920 г. он входил в состав ленинградской группы Комиссии ГОЭЛРО и принимал деятельное



участие в работе этой Комиссии. С 1922 по 1933 г. он наряду с научно-педагогической деятельностью вел большую инженерную работу в Ленэнерго (1922—1932 гг.). В годы Отечественной войны, оставаясь в Ленинграде, М. Д. Каменский отдавал много энергии укреплению обороны города и разрешению вопросов электроснабжения.

Научно-технические интересы М. Д. Каменского концентрируются в области электрических сетей и систем, на эту тему им написано большое количество работ (свыше 70). Курс «Электрические сети» (1934 г.) отмечается многообразием разобраных в нем вопросов и хорошим расположением материала. В книге «Электрические системы», вышедшей первым изданием в 1941 г. и переизданной в 1952 г., систематически изложены все основные вопросы, связанные с работой электрических сетей.

Научная работа и инженерный опыт М. Д. Каменского содействовали его выдвижению как педагогического работника: в 1924 г. он был утвержден доцентом, а в 1932 г. —

профессором и заведующим кафедрой «Электрические сети» Ленинградского политехнического института им. Калинина, которой он заведует по настоящее время. В течение ряда лет М. Д. Каменский возглавлял также кафедру электроэнергетики в Ленинградском инженерно-экономическом институте им. Молотова. В 1943 г. в тяжелых условиях блокады Ленинграда М. Д. Каменский закончил докторскую диссертацию и получил степень доктора технических наук.

Заслуги М. Д. Каменского высоко оценены правительством: в 1946 г. ему присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники; он награжден орденом Ленина и медалями СССР.

И. И. Нарышкин, М. А. Шателен, Л. Р. Нейман, А. М. Залесский, Б. И. Доманский, С. В. Усов, В. Т. Ренне, И. А. Зайцев и др.

С. А. РИНКЕВИЧ

30 апреля 1955 г. скончался один из старейших профессоров Ленинградского электротехнического института имени Ульянова (Ленина), заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук Сергей Александрович Ринкевич — создатель одной из первых отечественных научных школ электропривода.

С. А. Ринкевич родился в 1886 г. В 1913 г. он окончил с золотой медалью Петербургский электротехнический институт и был оставлен для работы при институте. Работе в нем он посвятил более 40 лет. С 1919 г., получив звание доцента, С. А. Ринкевич преподавал в институте курс «Электрическое распределение механической энергии». В 1922 г. он был избран профессором созданной им кафедры «Электрическое распределение механической энергии» (ныне кафедры «Электрификация промпредприятий»), бессменным руководителем которой он являлся до последних дней. Ряд лет С. А. Ринкевич был деканом Электроэнергетического факультета и длительное время заместителем директора института по научной работе. Он неуклонно боролся за сохранение и всестороннее развитие Электротехнического института как института комплексной электротехники.

Всю свою жизнь и энергию Сергей Александрович отдал развитию и внедрению в промышленность электрического привода. Возглавив кафедру, С. А. Ринкевич с первых дней ставит развитие новой специальности на прочную основу. В 1924 г. им была создана первая в СССР лаборатория, предназначенная не только для учебных целей, но и для постановки исследований, связанных с внедрением электрического привода в промышленность. В 1925 г. С. А. Ринкевич опубликовал капитальный труд — первое в мире систематизированное учебное пособие по теории электрического привода — под названием «Электрическое распределение механической энергии». Этот труд был впоследствии дважды переиздан — в 1932 и 1938 гг.

С. А. Ринкевич известен как организатор и руководитель ряда крупных промышленных исследований. Его работы в области прокатки цветных металлов и по исследованию многодвигательных приводов бумагоделательных машин легли в основу создания новой технологии производственных процессов.

С 1930 г. С. А. Ринкевич руководил организованным им научно-исследовательским бюро «Электропрома» и проводил исследование режимов работы электрических приводов в различных отраслях промышленности. Здесь под его руководством были разработаны многочисленные конструкции первых советских электроприводов, в частности приводов крупных металлорежущих станков и систем автоматизированных электроприводов бумажных машин с электронными регуляторами.

За научную работу по электрификации оборонных объектов С. А. Ринкевич получил в 1927 г. звание профессора высших учебных заведений РККА; в годы блокады Ленинграда он вместе со своими учениками выполнял ряд ответственных заданий Ленфронта, Краснозна-



менного Балтийского флота и других организаций.

Замечательная трудоспособность и необычайная энергия позволили С. А. Ринкевичу развивать созданную им специальность не только в своем институте, но и в ряде других высших учебных заведений страны.

Научные заслуги С. А. Ринкевича были высоко оценены. В 1937 г. ему без защиты диссертации была присвоена ученая степень доктора технических наук, а в 1942 г. за выдающиеся заслуги перед Родиной в области технических наук ему было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники.

Помимо научно-педагогической деятельности Сергей Александрович вел большую общественную и административно-организационную работу. Он был одним из участников осуществления плана ГОЭЛРО в области электрификации промышленности, ак-

тивным деятелем ряда научно-общественных организаций, являлся консультантом и экспертом Гипромеза, Гипромаша, завода «Электросила» и ряда других производственных и проектных организаций.

Разносторонняя научная и практическая деятельность С. А. Ринкевича создали ему имя крупного ученого, со всей страстью борющегося за внедрение теории электропривода в практику советского машиностроения.

Будучи общепризнанным как у нас в стране, так и за границей выдающимся специалистом в области электропривода, Сергей Александрович Ринкевич являлся создателем одной из научных школ электропривода. Им было написано свыше 40 научных трудов. Ученики его ведут большую научную работу, руководят кафедрами Ленинградского электротехнического института, Московского энергетического института, Ленинградского горного института и других высших учебных заведений, занимают ответственные посты в промышленности, в проектных и монтажных организациях.

Правительство высоко оценило заслуги С. А. Ринкевича, наградив его орденами Ленина, Трудового Красного Знамени и медалями.

Сергей Александрович Ринкевич был человеком высокой культуры, замечательной трудоспособности и неистощимой энергии. Его необычайный оптимизм заражал окружающих его сотрудников и учеников. Помимо своей специальности Сергей Александрович интересовался многими областями культуры, любил литературу, живопись и театр.

В лице С. А. Ринкевича коллектив института и научная общественность страны понесли тяжелую утрату. Память о нем надолго сохранится среди его товарищей, среди многочисленных учеников и всех близко знавших его.

В. С. Кулебакин, А. Е. Алексеев, А. Н. Ларионов, Н. П. Богородицкий, М. Г. Чиликин, Д. В. Васильев, Г. В. Одинцов, И. И. Петров, А. В. Фатеев, А. Т. Голован, Д. П. Морозов, А. В. Башарин и др.

Б. М. ШЛЯПОШНИКОВ. РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ УСТРОЙСТВ. 300 стр., ц. 11 руб. 30 коп. Госэнергоиздат, 1954.

Неуклонно расширяющееся применение электронной и ионной техники предъявляет все возрастающие требования к подготовке новых кадров специалистов в данной области. Если теоретическое изучение курса промышленной электроники можно считать в достаточной мере обеспеченным учебниками и учебными пособиями, то руководства по практическому, лабораторному изучению этой дисциплины до настоящего времени не было; весьма ценно то, что рецензируемая книга восполняет этот пробел. Автор успешно справился с поставленной перед собой задачей охватить по возможности все основные электронные и ионные приборы. Книга отличается высоким уровнем методичности изложения. Во всех работах строго выдержана последовательность: вначале дается краткое вводное описание изучаемого объекта; затем формулируется задача исследования; указывается, какие номинальные величины следует предварительно установить; излагается порядок экспериментального исследования, в котором даются тщательно продуманные предостережения, образцы таблиц и характер исследуемых зависимостей. Все детали предлагаемых исследований учтены весьма обстоятельно. Методичность распространяется даже на такие, казалось бы, мелкие детали, как маркировка вибраторов осциллографа и ее координация с графическими изображениями положительных и отрицательных мгновенных значений исследуемых величин. Это должно выработать у студентов вдумчивое, критическое отношение к проведению эксперимента.

Нельзя, однако, полностью согласиться с автором, что все выбранные им вопросы электронной и ионной техники действительно являются важнейшими, узловыми. Так, например, в книге много внимания уделено ртутному манометру, освоение которого без специальной подготовки не представляет трудностей для инженера-практика, тогда как такие вопросы, как зондовые характеристики сеток и определение по ним формы сеточного тока, различные виды преобразования тока (в частности, инвертирование), широко применяемые на практике двухзигзаговые поочередно насыщающиеся генераторы импульсов сеточного напряжения — не затронуты.

Книга состоит из трех отделов. Первый отдел — «Электронные приборы» — содержит исследование: двух-, трех-, четырех- и пятиэлектродных вентилях, фотоэлектронных приборов и электроннолучевой трубки. Выполняя эти работы, студенты не только изучают течение важнейших характеристик, но также должны основательно усвоить различие между правильным и неправильным включением цепи накала по отношению к анодной цепи; разницу контроля мощности накала по току и напряжению. Хорошему усвоению закона трех вторых должно в значительной мере способствовать определение конструктивного параметра g электронного диода по логарифмам тока и напряжения. По этому отделу можно высказать следующие замечания. Требуется уточнение на стр. 27: следовало бы оговорить, что амплитуда обратного напряжения равна амплитуде вторичного напряжения, если пренебречь падением напряжения внутри вспомогательного вентиля. Утверждение, что «мощность, рассеиваемая на сетке, равна $P_c = U_c I_c$ (стр. 31)» вызывает недоверие, поскольку в процессе движения электронов принимает участие не только сетка, но и катод. Нежелательно откладывать — как на рис. 17 — по положительной полуоси абсцисс одни величины, а по отрицательной — другие.

Второй отдел — «Ионные приборы» содержит исследования: газотрона и тиратрона; стеклянного ртутника; игнитрона; откачиваемого металлического ртутника.

Вызывает сомнение точность зависимостей, названных автором «семейством сеточных характеристик» (верхняя часть рис. 48), так как анодный ток физически не является функцией сеточного напряжения; зависимость же потенциалов зажигания от анодного напряжения лучше выражается логарифмической характеристикой. Объяснение связи сеточного тока с анодным путем ссылки на изменение ве-

личины внутреннего сопротивления вентиля является несколько примитивно упрощенным. Здесь нужно было бы провести исследование реальных потенциалов электродов, погруженных в плазму, путем соответствующей обработки зондовых характеристик.

Ощущается отсутствие алфавитного указателя, при помощи которого студент нашел бы разъяснение непонятого ему термина. Непонятно, почему в работе VII вводится термин «ток катода» I_k , тогда как в последующих работах автор пользуется термином «прямой ток» I_d . Автор обозначает продолжительность горения символом β , вместо общепринятого и более логичного λ . Это вызывает то неудобство, что символ β принят для обозначения угла опережения инвертора (в противовес углу запаздывания α).

На стр. 74 автор пишет неравенство $U_b \ll E_a$. не оговорив, какого порядка следует брать E_a , а без такой оговорки неравенство может оказаться несправедливым. На стр. 86 ошибочно сказано «анодный ток» вместо «сеточный ток». На стр. 91 нужно было бы оговорить, что равенство

$I_{ad} = \frac{I_k}{\sqrt{3}}$ справедливо только тогда, когда можно прене-

бречь углом коммутации. Это тем более существенно, что на сопровождающей иллюстрации (рис. 52) угол коммутации показан конечным. Следовало бы пояснить (стр. 94), как термопары прикрепляются к стеклянному баллону. Смысловое значение имеет опечатка на стр. 97: «некоторое номинальное показание амперметра» — вместо «некоторое минимальное показание». Неудачно сказано на стр. 103, что «поджигающий вентиль обеспечивает прохождение тока через поджигатель и нагрузку выпрямителя в нужном направлении»; этот вентиль препятствует прохождению тока в обратном направлении. Вместо термина «шлейф» теперь применяется «вибратор». Неправильно называть (как это делали раньше) прибор для измерения остаточного давления газа в ртутнике вакуумметром: это — манометр. На стр. 100 сказано: «определим по кривым рис. 59 давление ртутного газа p , отвечающее температуре светлого пятна 200°C ». На рис. 59 нет значений кривых p , соответствующих температуре 200°C , и, кроме того, не сказано, температура чего именно отложена по оси абсцисс. Автор свободно оперирует терминами «внутреннее сопротивление ртутника», «обратная проводимость ртутника», не оговаривая условности этих терминов.

В третьем отделе — «Применения электронных и ионных приборов» — исследуются основные электронные выпрямительные схемы, элементарные схемы электронных усилителей, отдельные, наиболее важные электронные приборы и устройства, схемы сеточного управления и основные схемы ионных выпрямителей. Наиболее существенным недостатком этого раздела, на наш взгляд, является то, что ионные преобразователи рассматриваются только в выпрямительном режиме. В программу работ не вошли не только преобразователи частоты, но даже инверторы. Это тем более досадно, что исследование схемы ионного выпрямителя при нагрузке на двигатель (работа XXV) можно непосредственно при том же лабораторном оборудовании развить в схему совместной работы обратимого преобразователя и электрической машины.

Некоторое методическое упущение можно усмотреть в том, что впервые учащемуся предлагается определить ряд величин, характеризующих режим работы вентиля (угол зажигания, продолжительность прохождения тока через анод, мгновенные значения напряжения на отдельных элементах) при исследовании кенотронной схемы удвоения напряжения. Аналитическое исследование этой схемы довольно сложно, и поэтому для определения нужных величин приводятся некоторые эмпирические уравнения. Лучше было бы начать определение величин, характеризующих режим работы вентилях, с более простых

схем, где аналитический вывод был бы доступен студентам. Это развивало бы у них правильное представление о возможностях аналитического исследования. Если же начинать с эмпирических формул, то это может породить чувство недоверия к возможностям точного анализа. Аналогично на стр. 166 предлагается сопоставить экспериментально полученные величины с численными значениями Φ , полученными из расчета по приведенным формулам. На основании каких соображений выведены эти формулы, не сказано. Если иметь в виду только подготовку инженеров-практиков, то, пожалуй, с этим еще можно примириться: им, действительно, достаточно быть уверенным в том, что формулы, которые записаны в справочниках, и которыми они пользуются, дают результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом. Но высшие учебные заведения должны готовить и кадры научных работников. Им необходимо прививать навыки сознательного, творческого отношения к формулам. Инженеры, готовящиеся к научно-исследовательской работе, должны уметь вывести любую формулу, которой они пользуются, они должны чувствовать как возможности, так и ограничения аналитического исследования.

Следует придерживаться различия в обозначениях напряжения u и э. д. с. (e). Автор в некоторых местах нарушает это (например, на стр. 131 символом e_2 обозначено напряжение). На стр. 88 неправильно показано течение кривой η_{σ} : при снижении тока I_a к нулю кривая η_{σ} не возрастает, а падает (поскольку r_{σ} возрастает, см. рис. 82). Нельзя согласиться с утверждением на стр. 139, что кривую i_a можно считать синусоидой; эта кривая ощутимо отстает от синусоиды, особенно при значениях тока, близких к нулю, поскольку цепь, содержащая твердый выпрямитель, существенно нелинейна.

Не вполне удачно определение «фильтрами называются устройства, придающие кривой напряжения заданную форму (стр. 156)»: основное назначение фильтра — устранить определенные гармоники. Работа емкостного фильтра поясняется кривыми не только в работе XII, но и в XI, тогда как работа индуктивного фильтра совсем не иллюстрируется. Схемы фильтров следовало бы исследовать с осциллографом. Странно, что заземление схемы на рис. 101 производится через вольтметровый переключатель, и притом заземляется положительный полюс источника питания; в электронных устройствах принято обычно заземлять отрицательный полюс. В сноске на стр. 144 сказано, что «вывод этого уравнения, а также некоторых других уравнений здесь не дается за отсутствием места»; следовало бы в таких случаях давать ссылки на литературные источники. Утверждение, что у выпрямителя с емкостным выходом э. д. с. на выходе не меняется во времени, является условным. Оно справедливо только при идеальных конденсаторах, не имеющих утечки. Более показательной реальной величиной, пожалуй, была бы собственная э. д. с. выпрямителя (определяемая за время протекания анодного тока). Нужно было на стр. 145 оговорить приближенность равенства положительной и отрицательной амплитуд напряжений, что следует из приведенных там уравнений.

Иногда встречаются неудачные термины: «источник напряжения постоянного тока» (подпись к рис. 106), «напряжение однофазного тока» (стр. 257).

Ссылка на предыдущие работы явно недостаточно. Так, в работе XXII учащиеся должны определять коэффициенты пульсации, для чего им должны быть известны положительная и отрицательная амплитуды переменной составляющей напряжения. О том, как находятся эти амплитуды, — в данной работе не сказано.

Заслуживает быть отмеченным тщательное выполнение иллюстраций. Лишь немногие из них могут вызвать нарекания; например, на стр. 75 капилляры показаны одинаковой толщины с обходными трубками, вследствие чего теряется смысл наличия последних; кривая напряжения, изображенная на рис. 150, далека от реальности: ферромагнитные устройства не дают таких резких заострений (реальные кривые напряжений выглядят примерно так, как кривая u_{2n} на рис. 69). На рис. 85 не отмечено, что масштаб тока по положительной полуоси ординат во много раз меньше, чем по отрицательной оси.

Можно упрекнуть автора за то, например, что выпрямитель, исследуемый в работе XXV, считается там однофазным, хотя на стр. 14 эта схема совершенно правильно названа двухфазной.

Написана книга хорошим, ясным языком. Ценно то, что автор особенно критично подходит к выбору терминов. Он разграничивает понятия «зажигание» (возникновение дугового разряда между анодом и катодом) и «поджигание» (образование катодного пятна); «зарядку» конденсатора (как процесс) в отличие от его «заряда» (состояние). Заслуживает одобрения инициатива во введении новых терминов, как, например, «периодичность» преобразователя. Потребность в этом термине давно уже ощущается в области преобразования тока, где параллельное понятие «число фаз» явно недостаточно. Автор решительно пользуется все более широко завоевывающим себе место термином «ртутник». Жаль только, что он суживает область его значения и исключает из нее, например, игнитроны. Решительно и последовательно применяет автор термин «прямое напряжение, прямой ток», тогда как многие электротехники до сих пор, признавая прогрессивность этих терминов, все еще не могут расстаться с привычными, но неудачными терминами «постоянное напряжение» и «постоянный ток».

Жаль, что автор — вообще сторонник новых, прогрессивных терминов — продолжает пользоваться (к сожалению, широко распространенным) термином «уравнительный реактор» вместо «разделяющий реактор». Применение здесь определения уравнительный не только противоречит роли этого элемента, но приводит в ряде случаев к ложным представлениям о самом характере работы схемы.

Давая общую оценку рецензируемой книге, следует признать ее ценной и полезной, в полной мере отразившей плодотворный многолетний педагогический опыт автора.

Есть все основания полагать, что книга сыграет большую положительную роль в деле подготовки новых кадров специалистов по электронной и ионной технике.

Доктор техн. наук М. А. Чернышев
ЦНИИ МЭС

ПОПРАВКИ

В № 5, 1955 г., в статье Н. А. Поляк,
стр. 39, в формуле (9) следует читать: 1555;
в статье О. В. Слежановского

следует читать: стр. 6, левая колонка, 1-ю строку снизу $\Phi = k_{\partial} \frac{i_{\partial \partial a}}{1 + pT_{\partial \partial}}$
 „ 6, правая „ 3-ю „ сверху $F_{\partial \partial} = \Delta F_3 + k_{\mu} U_{\partial \partial} - \frac{k_{\partial \partial}}{k_{\partial}} \Phi (1 + pT_{\partial \partial})$
 „ 6, „ „ 9-ю „ „ $k_{\partial} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta i_{\partial \partial a}}$

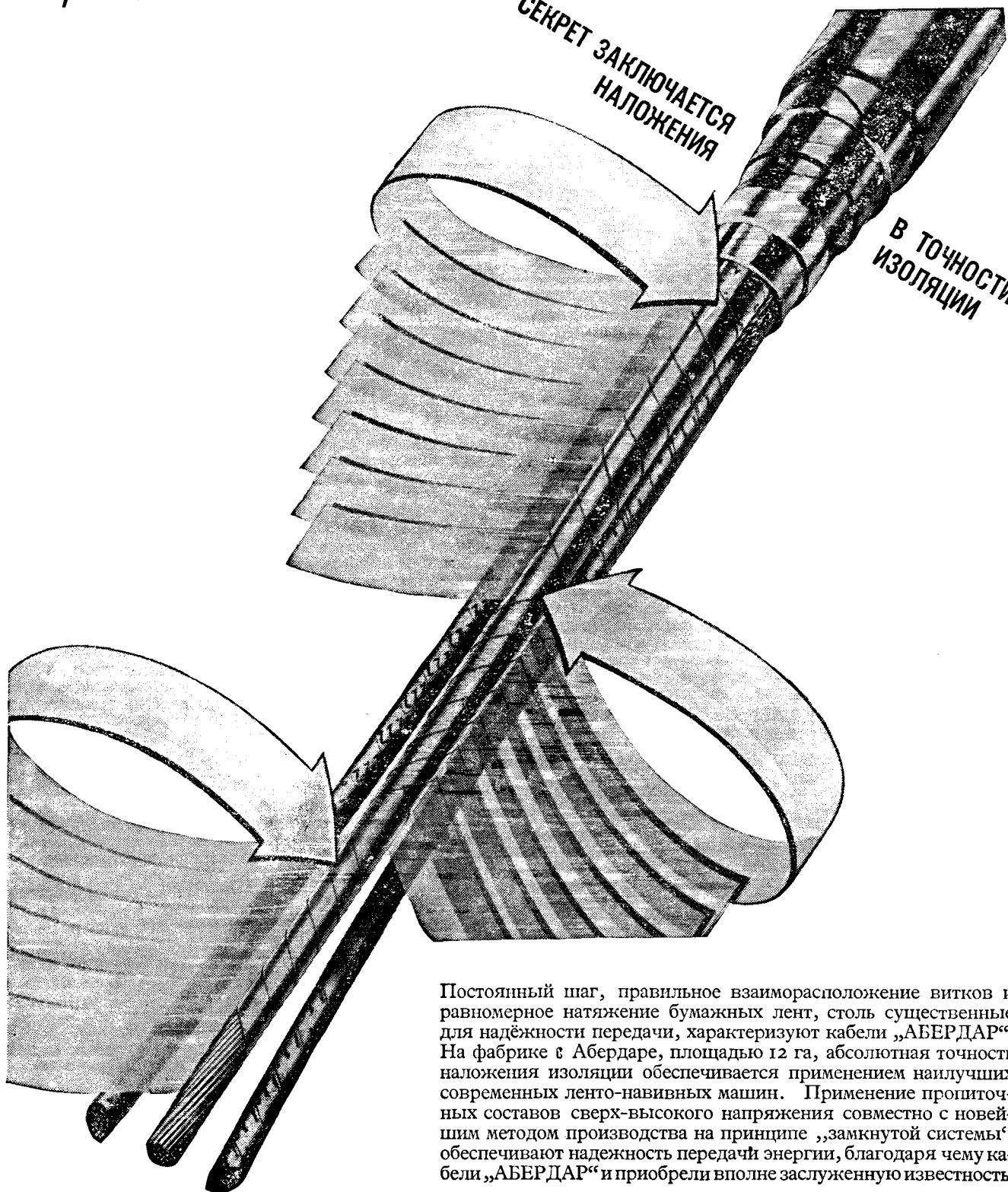
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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.

Безукоризненная изоляция для кабелей высокого напряжения

СЕКРЕТ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ
НАЛОЖЕНИЯ

В ТОЧНОСТИ
ИЗОЛЯЦИИ



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.

ОБЩИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ В ВЕТВЯХ

В статье предложено для всякой цепи, содержащей переменные сопротивления (также и нелинейные сопротивления) применять общий метод решения, заключающийся в замене этих сопротивлений эквивалентными э. д. с. по принципу компенсации и последующим составлением уравнений по методу наложения.

Полученные уравнения при трех ветвях с переменными сопротивлениями имеют вид:

$$I_1 = \Sigma E_{\kappa} g_{1\kappa} - E_1 g_{11} - E_2 g_{12} - E_3 g_{13} = \\ = I_{1 \text{ коп}} - U_1 g_{11} - U_2 g_{12} - U_3 g_{13}$$

и аналогично для токов. Здесь в других ветвях входные и взаимные проводимости G_{11} , G_{12} и т. д. находятся

О ВКЛЮЧЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ СУШКИ

В связи с распространением метода «емкость — частота» для оценки увлажненности изоляции силовых трансформаторов на 110 и 220 кв, длительно хранившихся без масла на монтажной площадке, на Московском трансформаторном заводе была проведена исследовательская работа по экспериментальной проверке существующих методов и норм контроля увлажненности изоляции трансформаторов.

Определение общего увлажнения изоляции трансформатора в холодном состоянии по измерениям сопротивления изоляции R_{15} и R_{60} и отношению $\frac{R_{60}}{R_{15}}$, а также по отношению емкостей $\frac{C_2}{C_{50}}$ дает надежные результаты только при нагретом трансформаторе.

ГРОЗОЗАЩИТА ЭНЕРГОСИСТЕМ

Характеризуются проведенные работы по изучению интенсивности грозовой деятельности в различных районах и по изучению импульсного разряда. Рассмотрены исследования по установлению разрядной прочности различных искровых промежутков в воздухе и масле, по изучению импульсной короны в лаборатории и на линиях электропередачи, затухание волн при их распространении вдоль линии. Анализированы методы определения защитных зон молниеотводов, выбора и расчета заземлений.

Рассматривается постепенное развитие советских конструкций вентильных и трубчатых разрядников, а также те направления, по которым должно вестись их совершенствование. Разобрано современное состояние грозозащиты линий электропередачи.

О СПОСОБАХ ОЦЕНКИ УВЛАЖНЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На основании опыта включения без сушки трансформаторов общей мощностью 1,5 млн. квт излагаются соображения о применении методов «емкость — частота» и метода абсорбции для контроля влажности изоляции обмоток трансформаторов.

Отмечается, что изложенные А. К. Ашрятовым в статье «О включении трансформаторов без сушки» соображения являются недостаточными для отказа применения оправдавших себя на практике методов «емкость — частота» и метода абсорбции. Изложены основные, на взгляд автора, условия для включения трансформаторов без сушки.

Выводы. 1. Эксплуатационный циркуляр З/Э, несмотря на отдельные его недостатки, способствовал широкому внедрению включения трансформаторов без сушки.

2. Метод «емкость — частота», в сочетании с дру-

РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ, ПИТАЮЩЕЙ НЕСИММЕТРИЧНЫЕ НАГРУЗКИ

Излагается метод расчета токов и напряжений в трехфазной системе, питающей несимметричную нагрузку во многих ее пунктах. Предлагаемый метод основан на разделении всей системы на симметричную и несимметричную части.

Если токи и напряжения в местах соединения двух частей известны, то режим симметричной части легко найти, пользуясь методом симметричных составляющих.

Токи и напряжения в частях соединений зависят от режима и параметров системы в целом. Для их определения используется метод последовательных приближений.

Сходимость последовательных приближений зависит от структуры системы уравнений и от соотношений

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

В Англии сконструировано реле для регулирования $\cos \varphi$ путем автоматического переключения шунтирующих конденсаторов. Реле состоит из двух независимых частей. Конструкция каждой из этих частей основана на принципе индукционного прибора с подвижной частью в виде диска.

Первый элемент представляет собой собственно реле, реагирующее на изменения реактивной мощности; другой — устройство для переключения конденсаторов, приводимое в действие реверсивным двигателем.

При симметричной нагрузке и $\cos \varphi = 1$ угол между током в обмотке одного электромагнита реле реактивной мощности и напряжением, приложенным к обмотке другого электромагнита, равен 90° . При этих условиях вращающий момент равен нулю. При появле-

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ БЕЗ КОНТРОЛЯ СИНХРОНИЗМА

Приводятся результаты опытов по автоматическому повторному включению без проверки синхронизма двух частей энергосистемы, состоящих из нескольких тепловых электрических станций. Части системы связаны между собой линией, через которую передается до 50% от мощности, потребляемой в одной части системы.

Опыты проводились при значениях передаваемой мощности от нуля и до наибольшей возможной при разных интервалах отключения линии (от 1 до 6,4 сек).

Во всех опытах после замыкания между собой частей системы нормальный режим восстанавливался. Во всех случаях, кроме самого тяжелого (перерыв 6,4 сек при наибольшей передаваемой мощности см. таблицу опыт 5), асинхронного хода не наблюдалось, и машины между собой втягивались в синхронизм в первом цикле

ПРОДОЛЬНАЯ ЕМКОСТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ

В распределительных сетях продольная емкостная компенсация применяется для безинерционного автоматического регулирования напряжения длинных радиальных линий с $\cos \varphi$ существенно отличным от единицы. Попутно обеспечиваются компенсация реактивной мощности и некоторое снижение потерь. Степень компенсации индуктивности линии колеблется от 100 до 400%. В Швеции батареи последовательных конденсаторов общей мощностью 50...1000 квар включены в 3-кв линии длиной до 16 км и в 20-кв линии длиной до 80 км. Батареи включаются вблизи конца линии или — при распределенной нагрузке — перед первым потребителем, чувствительным к колебаниям напряжения. В закальцованных сетях 110...220 кв продольная компенсация используется для улучшения распределения энергопотоков в кольце. В противоположность применению поперечных бустер-трансформаторов этот метод повышает

Более надежным и достаточно чувствительным методом контроля общей увлажненности изоляции в холодном состоянии является измерение $tg \delta$ обмоток. Показано, что нормы по $tg \delta$, принятые для трансформаторов, бывших в эксплуатации, неприменимы для оценки влажности изоляции новых трансформаторов.

Показано далее, что при эффективном удалении воздушных включений из изоляции путем вакуумной заливки маслом или даже токовым прогревом испытуемой обмотки пробивная прочность межкатушечной изоляции обмоток трансформаторов 220 кВ возрастает не менее чем на 40%.

В заключение даны рекомендации по условиям включения трансформаторов без сушки.

Электричество, № 9, 1955.

гими изоляционными измерениями, следует и в дальнейшем применять для оценки увлажненности изоляции трансформаторов.

3. Необходимо продолжить работу по определению отношения $\frac{R''_{60}}{R''_{15}}$ для трансформаторов всех напряжений

как в масле, так и в воздухе, для чего следует организовать выпуск мегомметров со шкалой до 15 000 мгом.

4. В протоколах заводских испытаний трансформаторов всех габаритов необходимо указывать значение $\frac{C_2}{C_{50}}$ и коэффициент абсорбции при температуре 10...30° С.

5. К нагреву трансформаторов следует прибегать лишь в случаях необходимости при нарушении герметичности уплотнений и неудовлетворительных результатах измерений в холодном состоянии.

Электричество, № 9, 1955.

нии индуктивной или емкостной нагрузки угол между током и напряжением уменьшается или увеличивается, и возникающий при этом вращающий момент поворачивает диск в ту или другую сторону. При повороте диска установленный на нем подвижной контакт присоединяет один из концов обмотки напряжения реверсивного двигателя переключающего устройства к источнику питания. Средняя точка обмотки напряжения двигателя присоединяется к источнику питания наглухо. Таким образом, направление вращения двигателя зависит от знака реактивной нагрузки.

Реверсивный двигатель приводит в действие механизм, замыкающий или размыкающий контакты, управляющие контакторами для изменения числа конденсаторов, включенных в цепь нагрузки.

El. Ind. Export, т. 54, стр. 41, № 1, 1954. (Э-во, 9, 1955)

путем расчета или на основе опыта, причем переменная часть схемы в них не входит.

Полученные уравнения позволяют решать сравнительно просто любую задачу и, таким образом, отпадает необходимость в самостоятельном рассмотрении отдельных задач, которые иногда именуется теоремами.

В статье дано пять примеров задач-теорем, решенных указанным общим методом.

Электричество, № 9, 1955.

Рассматриваются применяемые в СССР схемы грозозащиты подстанций, а также проведенные работы по изучению волновых процессов и прочности изоляции трансформаторов.

Характеризуются высокие требования, предъявляемые в СССР к защите вращающихся машин, и трудности, возникающие при их выполнении. Указаны большие работы, проведенные в СССР по исследованию схем с кабельными вставками, и важность разработки упрощенных способов грозозащиты установок с вращающимися машинами.

Указывается большое значение «Руководящих указаний по защите от перенапряжений» в деле усовершенствования грозозащиты энергетических систем в СССР.

Электричество, № 9, 1955.

между коэффициентами уравнений. Рассмотрены условия сходимости применительно к расчетам в электроэнергетической системе. Доказано, что если падения напряжений в сети меньше чем напряжения на нагрузках, то процесс сходится к искомому решению.

Пользуясь указанным методом, для одного из возможных режимов работы приводится расчет асимметрии токов и напряжений в электроэнергетической системе, питающей от пяти подстанций контактную сеть железной дороги, работающей на однофазном токе промышленной частоты.

Проведенные расчеты по методу последовательных приближений служат основанием для вывода приближенных формул асимметрии напряжений. При этом результаты приближенных расчетов можно уточнить, применяя изложенный в статье общий метод.

Электричество, № 9, 1955.

устойчивость работы сети. В длинных магистралях 220...380 кВ продольная компенсация служит для повышения предела устойчивости. Наиболее благоприятное соотношение между мощностью батареи и повышением пропускной способности соответствует 43-процентной компенсации. Экономически оправдывается компенсация до 60%.

При степени компенсации выше 50...60% могут возникнуть нежелательные вторичные явления. В США для борьбы с ними параллельно батареям включают активные сопротивления. В Швеции батареи при малых нагрузках или при возникновении субгармонических колебаний автоматически временно шунтируются.

Energietechnik, стр. 106, № 3, 1955. (Э-во, 9, 1955)

качаний. Снижения напряжения в системе были очень кратковременны. В опыте 5 включение произошло при скольжении 15% и сопровождалось 30 сек асинхронным режимом. Взаимное втягивание в синхронизм происходило за счет как асинхронных моментов генераторов, так и под воздействием первичных регуляторов турбин. Некоторое влияние здесь оказывала саморазгрузка потребителей при качаниях, а также кратковременное отключение части потребителей устройствами разгрузки по частоте, которые действовали еще до замыкания выключателя и повторно включили потребителей по восстановлению частоты.

Электричество, № 9, 1955.

АВАРИЙНЫЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРНЫЕ АГРЕГАТЫ

2

Автоматизированные аварийные агрегаты, состоящие из двигателя внутреннего сгорания (обычно дизель или бензиновый двигатель) и синхронного генератора, предназначены для питания ответственных потребителей электрической энергии при перерыве электроснабжения из основной сети. Такие агрегаты устанавливаются в больницах, телефонных станциях, вокзалах, театрах, аэродромах и тому подобных местах. Допустимая для присоединения к генератору мощность асинхронных двигателей ориентировочно составляет: при короткозамкнутых двигателях — до 0,2 л. с. двигателя на 1 кВа генератора, при двигателях с контактными кольцами — до 0,4 л. с./кВа.

Описаны условия работы, конструкция и схемы коммутации аварийных агрегатов малой и средней мощности (до 450 кВа). Приведен пример аварийного

W. Putz

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЯ В ПОСЛЕВОЕННОЕ ВРЕМЯ

3

Обзор касается преимущественно германской электротехники, но в отдельных случаях приводятся примеры и сравнение с американской электропромышленностью. В теоретических работах последнего времени рассматривались вопросы шума асинхронных машин, переходных процессов в синхронных машинах и в сварочных генераторах. Отмечается внедрение в электромашиностроение новых сортов динамной стали с ориентированной зернистой структурой, от которых ожидается понижение потерь в стали на 20...30%. Введение теплоустойчивой изоляции класса Н позволило поднять температуру нагрева машины до 160°С и увеличить ее мощность на 20% по сравнению с изоляцией класса В, однако вследствие понижения к. п. д. при таком форсированном использовании машины предпочитают при-

ПЕРЕХОД ЛИНИИ 220 кВ ЧЕРЕЗ МЕССИНСКИЙ ПРОЛИВ

2

Для электроснабжения Сицилии с материка закончено сооружение перехода воздушной линии электропередачи через Мессинский пролив. Длина пролета, пересекающего пролив, равна 3640 м. Длина конечного пролета на берегу Сицилии равна 750 м, а на итальянском берегу — 645 м.

Благодаря тому, что провода имеют жесткое крепление только с одной стороны перехода, тяжение в проводах не зависит от изменений температуры и внешней нагрузки. Это позволило уменьшить стрелу провеса и высоту опор. Опоры в пролете пересечения установлены на монолитных бетонных фундаментах, имеющих форму креста. Обе опоры имеют одинаковую высоту 225 м и предназначены для подвеса шести сталеалю-

УСТОЙЧИВОСТЬ СИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С СЕТЬЮ

3

Приводятся теоретические основы работы автоматических регуляторов напряжения и мощности синхронных машин с учетом криволинейности характеристики последних. Исследуется влияние регуляторов на устойчивость синхронных машин, в частности, в случае синхронной машины с компенсацией реакции якоря посредством компаундирования. Это осуществляется при помощи добавочной обмотки на возбуждатель, питаемой от трансформаторов тока в главной цепи генератора через промежуточный трансформатор, выпрямитель и сглаживающий дроссель. Исследование показывает, что условия устойчивости синхронной машины значительно улучшаются в том случае, когда применяется автоматическое электрическое регулирование мощности турбоагрегата со стороны паровой части. При такой системе

O. D. Butler, C. J. Swenson

ВЛИЯНИЕ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ НА РАБОТУ ДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

2

Для определения влияния понижения напряжения и частоты на работу двигателей собственных нужд на электростанции Кэльюмет (США) был выделен на несинхронную работу агрегат турбины низкого давления — генератор.

Испытания проводились путем снижения напряжения генератора с 12 до 8,75 кВ при постоянной частоте 60 гц или путем снижения частоты с 60 до 53 гц при постоянном напряжении 12 кВ или же путем одновременного снижения напряжения с 11,2 до 9,5 кВ и частоты с 60 до 55 гц.

Исследования показали, что понижение напряжения на 10...18% от номинальной величины вызывает постепенное увеличение тока нагрузки двигателей соб-

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

3

В основу предложенного регулируемого асинхронного двигателя положен принцип, сходный с принципом работы диска Феррариса; кроме того, использованы результаты, полученные в так называемых магнитофугальных машинах с линейным движением ротора. В новом типе двигателя между двумя развернутыми в плоскость статорами обычных асинхронных двигателей помещается металлический диск (медный или медный со стальными заклепками). Бегущее магнитное поле статоров с линейной скоростью $2\tau f$, где τ — полюсное деление, f — частота питающего тока, создает вихревые токи в диске, за счет которых создаются крутящий момент и вращение диска с некоторым скольжением. Поворачивая статоры по отношению к радиусу диска, можно изменять тангенциальную составляющую скоро-

Н. С. Помилуйко и П. Н. Шляхто

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3

Статья посвящена вопросу повышения мощности тяговых двигателей постоянного тока, улучшению их тяговых и рекуперативных характеристик, применению широкого регулирования поля, повышению напряжения и устойчивости против кругового огня.

В статье описаны основные недостатки существующих тяговых двигателей, ограничивающие развитие электрической тяги на постоянном токе, а также пути их устранения.

Предлагаемый новый тяговый двигатель имеет явно выраженные полюса, стабилизированный потенциал на коллекторе и синусоидальную форму поля за счет распределенной обмотки возбуждения. Кроме того, у него устранены пики тока в переходных режимах, так как статор шихтован. В связи с устранением демпфи-

ТРАНСФОРМАТОР 500 кВА С КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

3

В Англии закончены испытания и начато промышленное производство трехфазных сухих трансформаторов 11 кВ мощностью 500 кВа с кремнийорганической изоляцией (изоляция класса Н). Эта изоляция изготавливается из стеклоткани и асбестового картона, скрепляемых и пропитываемых кремнийорганическими компаундами.

Трансформатор с кремнийорганической изоляцией может быть сконструирован с более высоким к. п. д., чем стандартный трансформатор с естественным масляным охлаждением равной мощности. Применение трансформаторов с кремнийорганической изоляцией целесообразно для покрытия пиковых нагрузок распределитель-

менять изоляцию класса Н только для двигателей в помещениях с высокой температурой и в тяжелых условиях работы. В области турбогенераторов отмечается полный переход на водородное охлаждение для всех машин на 3 000 об/мин, начиная с 30...50 тыс. квт. Строятся турбогенераторы на 20 тыс. квт и выше в единице. Среди синхронных генераторов малой и средней мощности выделяются машины с автоматически стабилизируемым напряжением при помощи статических устройств. На смену асинхронным двигателям с внешним обдувом появились двигатели закрытого типа с встроенными по окружности корпуса охлаждающими трубами. Расширяется производство шунтовых двигателей трехфазного тока с плавным регулированием скорости; изготовлен такой двигатель на 1 200/900 квт, 3 000 в, 655/495 об/мин.

ETZ — А, т. 76, стр. 48, № 1, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

агрегата большой мощности — 2 900 квт, 273 об/мин, 6 500 в, установленного в подземном помещении для обслуживания городской сети. Особую группу составляют аварийные агрегаты, предназначенные для таких передаточных и телефонных установок, которые практически не допускают никакого перерыва в электропитании. В таких агрегатах синхронная машина постоянно вращается вхолостую в качестве двигателя и в момент включения ее на сеть работает как генератор за счет кинетической энергии маховика. Одновременно включается дизель, который после разгона соединяется муфтой с генератором.

Bull. Oerlikon, стр. 77, № 306, 1954.

(Э-во 9, 1955)

не ставится никаких специальных требований к регулятору напряжения и к конструкции генератора. Отмечается, что при прочих равных условиях генераторы с отношением короткого замыкания, равным 0,5, и с регулированием мощности имеют более устойчивую работу, чем генераторы с $OKZ=1$ и с регулированием только напряжения. К тому же стоимость генераторов с $OKZ=1$ приблизительно на 20% выше, чем генераторов с $OKZ=0,5$. Теоретические выводы исследования подтверждаются результатами опытов, проведенных с турбогенераторами 3 мвт и 10 мвт.

Regelungstechnik, т. 73, стр. 11, № 1, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

минневых проводов диаметром около 26 мм, образующих две трехфазные цепи.

Провода расположены по вершинам двух равнобедренных треугольников со стороной 25 м. Четыре провода подвешиваются на нижней траверсе длиной 75 м на высоте 195 м над основанием опоры. Верхняя траверса, несущая два провода, имеет длину 50 м. Высота подвеса верхних проводов равна 216 м.

Первоначально подвешиваются только нижние провода, и по одной цепи при напряжении 150 кв будет передаваться мощность до 50 тыс. квт. В дальнейшем напряжение будет увеличено до 220 кв и пропускная способность каждой цепи возрастет до 150 тыс. квт.

El. Review, т. 156, стр. 635, № 15, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

сти и тем самым регулировать ее. Опыты проводились с установкой очень малой мощности (до 50 вт) при токах повышенной частоты — 150 и 600 гц, что потребовалось для увеличения скорости вращения. Максимальное значение к. п. д. составляло около 40%. При повороте статоров на угол от 0 до 360° достигалось изменение скорости в отношении 1:2. При обсуждении доклада о новом принципе двигателя были сделаны весьма осторожные оценки и отмечались трудности на пути его дальнейшего развития, но в то же время были отмечены и определенные его перспективы.

El. Times, т. 126, стр. 883, № 3295, 1954.

(Э-во, 9, 1955)

ственных нужд. Дальнейшее снижение напряжения может быть допущено лишь кратковременно из-за опасности перегрева обмоток двигателей.

Понижение частоты ниже 56..57 гц приводит к снижению производительности угольных мельниц и питательных насосов котлов высокого давления (88 атм). Однако в аварийных условиях понижение частоты может происходить при напряжении ниже номинального. В этом случае при понижении частоты до 57 гц и одновременно напряжения на 18% производительность питательных насосов котлов высокого давления снижается настолько, что насосы не могут обеспечить необходимой подачи питательной воды. Поэтому в аварийных условиях необходимо принимать меры для восстановления частоты раньше, чем начнет уменьшаться производительность вспомогательных устройств станции.

El. Eng., т. 74, стр. 42, № 1, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

ных сетей, так как их перегрузочная способность значительно выше, чем у стандартных трансформаторов.

Кремнийорганическая изоляция негигроскопична и устойчива против воздействий атмосферной влаги и пыли. Пребывание трансформатора в течение неограниченного времени в условиях максимальной влажности не требует сушки перед включением в сеть.

При испытаниях трансформатор, включенный на напряжение 11,5 кв, был подвергнут обрызгиванию водяной пылью и последующему одноминутному испытанию напряжением 22 кв.

El. Journal, т. 152, стр. 2055, № 25, 1954.

(Э-во, 9, 1955)

рующего действия вихревых токов в статоре значительно улучшается коммутация в переходных режимах.

Подобные мероприятия позволяют устранить источники кругового огня, повысить мощность и напряжение, а также расширить регулировочные свойства тягового двигателя.

Электричество, № 9, 1955.

О ПРИМЕНЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ЦЕПЯХ С ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

В выпрямительных установках трансформаторы тока включаются в цепи, где среднее значение тока равно нулю; первичные обмотки выпрямительных трансформаторов, вторичные обмотки выпрямительных трансформаторов при двухтактных схемах выпрямления и пр.

При индуктивной нагрузке выпрямителя токи в этих цепях имеют трапециевидную форму. В статье показано, что вторичные токи трансформаторов тока при некоторых условиях могут существенно отличаться от первичных токов. Искажение вторичного тока обусловлено насыщением сердечника трансформатора.

Приведены результаты испытаний нескольких трансформаторов тока с сердечниками из материала типа пермаллоя и из электротехнической стали.

О ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Большое число отключений двигателей промышленных предприятий происходит вследствие неправильного выбора схем защиты и уставок реле.

Недостаточное распространение получил самозапуск двигателей ответственных механизмов, останов которых может вызвать нарушение технологического процесса или брак производства. Применение самозапуска часто ограничивается сложностью схем пуска.

В статье рассмотрены условия, при которых допускается переход на пуск непосредственно от сети и пуск с глухо присоединенным возбудителем. Приведены расчетные асинхронные характеристики двух синхронных двигателей, которые сопоставлены с опытными данными. Показано влияние сопротивления, вводимого в цепь ротора, на пусковую характеристику двигателя.

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКИ В ПОДШИПНИКАХ И ПОДПЯТНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Проблема измерения толщины масляной пленки между валом и вкладышем, пятой и подпятником возникла в связи с изучением вопросов трения, износа и смазки машин. Поскольку существующие в настоящее время теоретические методы не позволяют с требуемой точностью решать задачи, связанные с процессами всплытия вала при нестационарных режимах (пуске, реверсе и т. д.) машины, то приходится эти вопросы решать экспериментальным путем.

В статье описан метод измерения толщины масляной пленки в подшипниках и подпятниках скольжения при помощи индукционных датчиков трансформаторного типа, питаемых током промышленной частоты.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ

Для измерения углового ускорения можно применять тахогенератор, соединенный с рабочим валом, ускорение которого измеряется, и питающий либо статический конденсатор, либо первичную обмотку трансформатора. Зарядный ток конденсатора или напряжение на вторичной обмотке трансформатора пропорциональны величине ускорения. Однако недостатком обоих способов измерения является наличие гармоник в кривой напряжения тахогенератора, искажающих осциллографическую запись. Кроме того, выходная мощность измерительного устройства оказывается недостаточной для целей автоматического регулирования и требует промежуточного усиления. Ввиду этого была разработана конструкция измерителя ускорения, свободного от указанных недостатков и, кроме того, обладающего

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАГРУЗКИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

На разветвленных сельских или смешанных линиях 2...13,8 кВ в США часто используются для коммутации и защиты отдельных ответвлений малогабаритные автоматические выключатели нагрузки. Такой выключатель состоит из трех однополюсных единиц в масляных баках, устанавливаемых на одной из опор линии. Номинальный ток выключателя 50...100 а, предельный выключаемый ток нагрузки 225 а; отключение тока короткого замыкания не допускается. Выключатель нагрузки оборудован максимальным реле прямого действия и счетным реле, отсчитывающим количество толчков сверхтока, протекающих через выключатель за 45 сек. В зависимости от регулировки счетного реле, отключение может произойти после окончания первого, второго или третьего толчка. Рассмотрен случай короткого за-

ВЫЯВЛЕНИЕ ИОНИЗАЦИИ В МАСЛЕ ПРИ ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Среди различных способов определения наличия ионизации электрический считается наиболее чувствительным. Одним из недостатков этого метода является трудность различить сигнал от испытываемого объекта от сигналов, вызываемых внешними причинами, в частности от короны в испытательной установке. Так как образцы на высокие напряжения бывают только с масляным заполнением, возникает проблема различить ионизацию в масле от короны в испытательной установке на воздухе. Это можно сделать вплоть до напряжений порядка 500 кВ и даже больших, применением проводов малого диаметра и пучка острий на головках вводов. Остающаяся корона в цепи имеет малую интенсивность и определенное фазовое соотношение, так что

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА КОМПЕНСАЦИИ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ ИЛИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

Компенсационный метод измерения имеет то преимущество, что его использование не связано с существенным потреблением мощности измерительным устройством из исследуемой цепи. В статье приводятся схемы, которые могут быть применены для измерения основных электрических параметров компенсационным методом с автоматической установкой положения равновесия и с отсчетом значения измеряемой величины по стрелочному прибору. При этом осуществляется компенсация значений одной из трех величин: тока, напряжения или вращающего момента. В последнем случае схема может быть использована для измерения любого из электрических параметров, создающих вращающий момент. Работа этих схем основана на том,

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТА И КРИТИЧЕСКОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ТОРМОЖЕНИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При расчете динамического торможения асинхронных двигателей весьма важными величинами являются максимальный тормозной момент M_m , развиваемый двигателем, и критическое скольжение s_k , соответствующее этому моменту.

Для правильного расчета этих величин необходимо учитывать непрерывное изменение насыщения стали двигателя в процессе торможения. Учитывая это обстоятельство, автор выводит новые аналитические выражения для токов и моментов, соответствующих критическому скольжению.

Показано, что намагничивающий ток $I_{\mu k}$, соответствующий критическому скольжению, определяется

Рассмотрены вопросы самозапуска асинхронных и синхронных двигателей и условия ресинхронизации последних. Показано, что форсирование возбуждения способствует как удержанию в синхронизме при глубоких понижениях напряжения, так и обеспечению самозапуска нагруженных двигателей. Даны рекомендации для промышленных предприятий по выбору числа двигателей, участвующих в самозапуске.

Рассмотрены вопросы выбора защит и уставок защит асинхронных и синхронных двигателей.

Электричество, № 9, 1955.

Выводы. 1. Трансформаторы тока с сердечниками из материала типа пермаллой не пригодны для измерений в выпрямительных цепях при частоте 50 гц. Трансформаторы с сердечниками из электротехнической стали дают относительно небольшую погрешность.

2. Трансформаторы тока для измерений в цепях с выпрямителями следует выбирать с запасом по току, не допуская их перегрузки.

3. Целесообразно включить в программу типовых испытаний трансформаторов тока осциллографирование вторичного тока при включении в первичную обмотку постоянного тока. Это дает возможность судить о пригодности данного типа трансформатора для измерений в выпрямительных цепях.

Электричество, № 9, 1955.

ничтожной постоянной времени. Измеритель представляет собой маленький генератор постоянного тока, у которого свободно вращаются как вал с якорем, так и станина с обмоткой возбуждения. Станина жестко соединяется с вращающимся объектом, ускорение которого подлежит измерению. Измерительный генератор снабжен четырьмя контактными кольцами, из которых два служат для питания обмотки возбуждения, а другие два — для питания внешнего сопротивления от цепи якоря. Когда станина генератора начинает вращаться, то при замкнутой цепи якоря за ней увлекается и якорь, имея некоторое отставание по скорости. Как показано в статье, возникающий при этом ток в цепи якоря будет пропорционален ускорению. Дана теория работы описанного устройства и приведены результаты испытания опытного образца.

Arch. f. Elektrotechnik, т. 41, стр. 312, № 6, 1954.

(Э-во, 9, 1955)

Описаны схема и аппаратура, необходимые для проведения эксперимента. Показано преимущество описанного метода перед существовавшими ранее.

Приведено описание эксперимента при исследовании работы подпятника крупного вертикального электродвигателя при пуске, реверсе и выбеге.

Электричество, № 9, 1955.

ее можно легко различить от ионизации в масле посредством обычной схемы включения осциллоскопа. Чтобы иметь возможность наблюдать одновременно широкий предел интенсивности ионизации на осциллоскопе был разработан двухчастотный элемент с двумя чувствительностями.

Авторы указывают, что посредством данного метода, несмотря на его некоторые ограничения, удается производить определение ионизирующих напряжений почти всех родов изоляционных структур: больших силовых трансформаторов (обмотки, крепежные приспособления, отводы, вводы), кабельной арматуры и основных изолирующих материалов.

El. Eng., стр. 1081, № 12, 1954

(Э-во, 9, 1955)

мыкания на ответвлении, защищенном выключателем нагрузки с отключением после третьего толчка. Силовой выключатель в начале линии отключается защитой, затем периодически повторно включается (автоматически или вручную). Если после первого или второго отключения короткое замыкание самоликвидируется, питание всех потребителей восстанавливается при последующем повторном включении. Если же короткое замыкание носит длительный характер, то вслед за третьим отключением силового выключателя отключается и выключатель нагрузки поврежденного ответвления; при третьем повторном включении питание потребителей на всех здоровых ответвлениях восстанавливается.

El. World, т. 143, стр 96, № 10, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

равенством подкасательных к кривой намагничивания и кривой тока ротора. При наличии кривой намагничивания двигателя предлагается графический метод определения $I_{\mu k}$.

На основании нормальной кривой намагничивания построены кривые зависимости M_m и s_k от величины тока возбуждения. Выяснено, что с увеличением тока возбуждения критическое скольжение увеличивается

за счет уменьшения коэффициента $\phi = \frac{I_{\mu k}}{I_{2k}}$ и реактивного сопротивления намагничивания $x_{\mu k}$.

Для упрощения практических расчетов выведены упрощенные аналитические выражения для M_m и s_k , которые дают возможность производить расчет по каталожным данным двигателя.

В приложении дается пример расчета и производится сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

Электричество, № 9, 1955.

что нулевой прибор, включенный для фиксации положения равновесия между значениями измеряемой и вспомогательной величин, связан со специальным управляющим устройством. При отсутствии равновесия, определяемого по нулевому прибору, управляющее устройство так регулирует значение вспомогательной величины, чтобы равновесие установилось. В качестве управляющего устройства можно использовать поляризованное реле. Более совершенными устройствами являются: генератор высокой частоты с выпрямителем и усилитель, на входе которого находятся два фотоэлемента, включенных как делитель напряжения. Пределы измерения такого устройства по току $3 \cdot 10^{-7}$ а, по напряжению $3 \cdot 10^{-5}$ в, точность 0,5%, потребление мощности от измерительной цепи $2 \cdot 10^{-13}$ вт.

АТМ, стр. 11, № 228, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С БОЛЬШИМ ДИАПАЗОНОМ СКОРОСТЕЙ

Описывается система автоматического управления скоростью двигателя постоянного тока с диапазоном изменения скорости от 2200 об/мин до 0,8 об/мин при неизменном потоке возбуждения двигателя. В схеме использован двигатель ПН-28,5 мощностью 4,2 кВт, $n_n = 2200$ об/мин; электромашинный усилитель ЭМУ-50 мощностью 4,5 кВт; асинхронный тахогенератор и электронный усилитель, включающий двигатель. В схеме переменного тока, фазочувствительный выпрямительный каскад и дифференциальный усилитель постоянного тока, работающий на две обмотки управления электромашинного усилителя.

Схема представляет собой комбинацию разомкнутой системы управления, при помощи которой устанавли-

ЭЛЕКТРОВОЗЫ ИНДИЙСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Индийские железные дороги заказали в Англии семь электровозов для работы на линиях возле Бомбея общей протяженностью 320 км (постоянный ток 1500 в).

Основные характеристики электровозов: ходовая формула СС, длина по буферам 20,8 м, диаметр колес 1220 мм, вес 123 т, максимальная сила тяги при сцеплении 25% — 31,3 т, часовая сила тяги (при скорости 46 км/час) — 21,77 т. Максимальная скорость 120 км/час.

Тяговые двигатели с независимой вентилляцией, с простым зубчатым приводом; передаточное число 59:16. Длительная мощность двигателя 530 л. с. (при 1400 в), часовая — 600 л. с. Торможение электровоза рекуперативное и воздушным тормозом. Имеется девять ходовых позиций, применяются две ступени ослабления поля.

НОВАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕМ ДВИГАТЕЛЯ БЛУМИНГА

В статье излагаются требования, которым должна удовлетворять схема управления полем двигателя постоянного тока для получения минимального времени протекания переходных процессов при ослаблении и усилении его поля. Показано, что при ослаблении поля начальная форсировка режима должна быть максимальной с последующим постепенным ее уменьшением; при усилении поля, наоборот, начальная форсировка должна быть ниже, а затем с ростом тока возбуждения двигателя увеличиваться.

Закон изменения величины форсировки в зависимости от тока возбуждения двигателя в переходном процессе может быть найден путем расчета и построения динамических характеристик системы. На основании динамических характеристик строятся приближен-

ГАЗООБРАЗНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

В свете теории Таунсенда изложена физика пробоя газообразных диэлектриков, в частности элегаза, фреона, четыреххлористого углерода при атмосферном и повышенном давлении в однородном и неоднородном полях. Исследованы причины аномальной зависимости электрической прочности фреона при промышленной частоте от давления: при расстоянии между электродами порядка 6 см и давлениях 1...2 ата электрическая прочность фреона превосходит прочность азота в 5...10 раз. Это связано с образованием отрицательных ионов, препятствующих развитию стримеров.

Практически наиболее благоприятным сочетанием электрической прочности, температуры кипения и химической стойкости обладает элегаз (SF₆), впервые исследованный в СССР. Элегаз предполагается использовать в высоковольтных трансформаторах и выключателях.

ВОПРОСЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПАДЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ

Одной из основных проблем в теории и практике непрерывных станов горячей прокатки является необходимость в обеспечении минимальных напряжений в металле на участке между клетями в динамических и установившихся режимах. Решение этой задачи определяется системой электропривода стана. В статье дается теоретический анализ переходных процессов натяжения полосы и скорости двигателя с учетом ряда технологических параметров, включая связь между клетями через прокатываемый металл. Получены зависимости изменения натяжения полосы и скорости двигателя от электрических и технологических параметров, позволяющие оценить влияние динамического падения скорости двигателя на характер переходного процесса.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАСЛОПРОПИТАННОЙ БУМАГИ

Предлагаемый метод предназначен для измерения диэлектрических потерь и проницаемости, сопротивления изоляции и ее электрической прочности. При помощи трех коаксиальных электродов воспроизводится изоляция кабеля с пропитанной маслом бумажной изоляцией. Внутренний цилиндрический электрод — из латуни (для определения электрической прочности) или из латуни, покрытой родием (для прочих испытаний), длиной 305 мм, диаметром 12,7/16 мм; внешний электрод — станиолевый цилиндр толщиной 0,076 мм, длиной 51 мм, охранный станиолевый электрод длиной 76 мм, изолирован от основных электродов бумагой.

Для навивки бумажной ленты внутренний электрод вставляется в специальное устройство, которое позволяет придать электроду нужный угол наклона и изме-

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПО РАДИО

На французских железных дорогах в апреле 1955 г. был произведен опыт управления по радио поездом, состоящим из четырехосного электровоза и трех вагонов. Во время пробега в поезде не было ни одного человека.

По второму пути одновременно с опытным поездом следовала автоматрисса, из которой на подстанцию, расположенную примерно посередине опытного участка, по радиотелефону передавались указания о режиме ведения поезда.

С подстанции на электровоз сигналы передавались на несущей частоте при длине волны 1,9 м (приказы на включение и отпуск тормозов и на переключения в силовой цепи).

ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯТОРОВ БЕЗ ИХ РАЗРУШЕНИЯ РЕНТГЕНОВЫМИ ЛУЧАМИ

Ультразвуковой метод испытания применим только в случае исследования однородного материала. Прослушивание разнородных последовательно расположенных материалов, например, металлического колпака, замазки и фарфора армированного изолятора, невозможно. Рентгеновы же лучи позволяют одновременно просвечивать разнородные материалы, однако в то время как проникаемость ультразвуковых волн достигает нескольких метров, обычные рентгеновы лучи с энергией до 300 кэв пригодны для просвечивания образцов относительно малой толщины. Например, для железа максимально допустимая толщина просвечивания нормальными рентгеновыми лучами составляет около 10 см. Эти пределы теряют свое значение с возрастом интенсивности рентгеновых лучей. Развитие элект-

Двигатель-генератор состоит из одного двигателя и двух генераторов, один из которых служит для возбуждения тяговых двигателей при рекуперативном торможении. Второй генератор, работающий совместно с аккумуляторной батареей, дает постоянный ток 110 в для цепей управления, освещения и для двигателей вентиляторов. На электровозе установлено два двухлыжных пантографа.

El. Review, т. 156, стр. 257, № 7, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

ливется требуемое значение скорости и замкнутой системы автоматического регулирования, обеспечивающей поддержание заданного значения скорости с точностью порядка 10% при изменении нагрузки от 25 до 85% номинального значения.

При мгновенном изменении нагрузки на величину не более половины ее номинального значения переходный процесс в системе получается аperiодическим с длительностью 0,2...0,3 сек.

Система отличается повышенной надежностью и плавностью регулирования скорости.

Электричество, № 9, 1955.

Опытный образец трансформатора 138 кв, заполненный элегазом при атмосферном давлении, успешно работал в течение двух лет при напряжении 187% от номинала; признаков разложения элегаза не было. По своим дугогасящим свойствам элегаз в десятки раз превосходит воздух. Изготовлен опытный образец выключателя 115 кв с одной герметизированной гасительной камерой, заполненной элегазом. По мнению автора, в течение всего срока службы выключателей смены элегаза не требуется.

Для заполнения высоковольтных электростатических машин элегаз и фреон мало пригодны ввиду недостаточной короностойкости. Рекомендуется применять водород под давлением 10...20 ата.

Research., стр. 122, № 4, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

ные статические характеристики и формулируются требования к схеме оптимального управления полем двигателя.

Описана новая схема электромашиного управления полем прокатного двигателя, обеспечивающая оптимальные переходные режимы, и дан сравнительный анализ новой и применяемой в настоящее время схем. Показано, что старая схема по своей структуре не способна обеспечить оптимальных переходных режимов.

Расчетные данные подтверждаются осциллограммами экспериментального исследования новой схемы, проведенного на электроприводе одного из действующих реверсивных прокатных станков.

Электричество, № 9, 1955.

нять число слоев и шаг бумажной обмотки; наиболее выгодная общая толщина слоев 0,51...0,64 мм.

Сушка, пропитка под вакуумом и измерения осуществляются в масляной бане; при этом образец помещается в стеклянный сосуд, соединенный с таким же сосудом, наполненным маслом.

Это устройство позволяет проводить измерения при температурах до 100°С при импульсном и постоянном напряжении до 100 кв и при переменном напряжении до 40 кв. Для испытаний под давлением до 28 кг/см² образец помещается в специальный цилиндрический резервуар из изоляционного материала длиной 381 мм и диаметром 63,5 мм.

Proc, IEE, т. 101, ч. II, стр. 213, № 81, 1954.

(Э-во, 9, 1955)

Сделанные выводы облегчают решение практических вопросов, связанных с выбором типа главного привода непрерывных станков горячей прокатки. Поставленное экспериментальное исследование дало хорошее качественное совпадение с выводами анализа. В статье показано, что применение скоростных двигателей является более целесообразным с точки зрения динамического падения скорости. Это позволяет в ряде случаев использовать в непрерывных станах двигатели нормальной исполнения, без завышения их мощности или установки добавочных маховых масс.

Электричество, № 9, 1955.

тронных ускорителей, в частности, бетатронов, позволяет получить рентгеновые лучи с энергией, достаточной для просвечивания изделий большой толщины. Для этой цели построен бетатрон с энергией рентгеновых лучей в 31 мэв, позволяющий исследовать без разрушения через металлический колпак и замазку все применяемые типы изоляторов на наличие структурных пороков. При этом время экспозиции чрезвычайно мало и составляет для изоляторов только 1 мин. Полученные изображения отличаются большой резкостью и позволяют легко распознавать пороки в материале. При создании бетатроном двух перекрещивающихся пучков рентгеновых лучей можно получить стереоскопические изображения, позволяющие точно определить пространственное расположение структурных пороков.

ETZ—A, стр. 195, № 5, 1955.

(Э-во, 9, 1955)

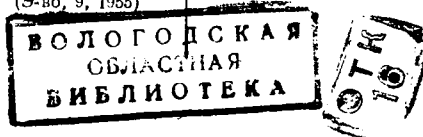
Трогание и ускорение производились автоматически и требовали только одного сигнала.

Для передачи приказов о тормозном режиме была применена модуляция, о режиме работы двигателей модуляция несущей частоты не применялась.

Для управления были использованы обычные радиоаппаратура и реле. Достигнутая скорость составила 120 км/час.

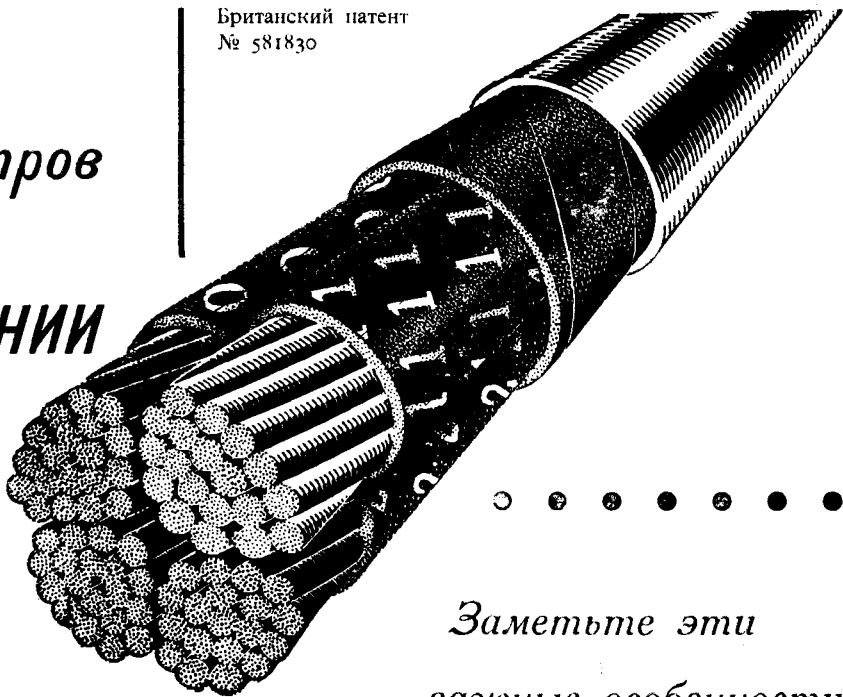
El. Review, т. 156, стр. 777, № 18, 1955.

(Э-во, 9, 1955)



**СВЫШЕ
4000 километров
УЖЕ
В УПОТРЕБЛЕНИИ**

Британский патент
№ 581830



ПРОПИТАННЫЕ
В ЦЕЛОМ ВИДЕ
КАБЕЛИ
С БУМАЖНОЙ
ИЗОЛЯЦИЕЙ
НЕ ВЫДЕЛЯЮЩИЕ
НАПОЛНИТЕЛЯ
В НОРМАЛЬНЫХ
РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ

ПРОТОТИП

ВІСС

*Заметьте эти
важные особенности*



Наполнитель не выделяется даже в вертикальных прогонах при максимальной допустимой температуре.



Рассчитан главным образом для применения в строениях и коях, но с тем же успехом может быть применен для подземных проводок.



Базирован на чрезвычайно обширном производственном опыте „ВІСС“.



Имеется для всех напряжений до 11 кВ включительно по той же цене, как и кабели обычных типов.

Разрешите выслать Вам дальнейшую информацию — Брошюру № 308.

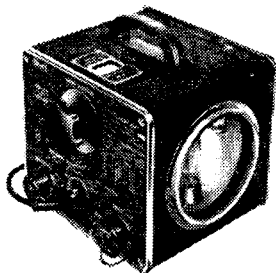




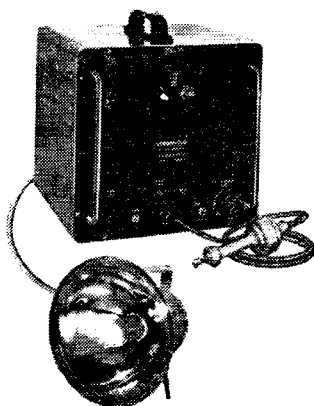
Стробоскопы DАWE

как бы останавливают движение и измеряют скорость

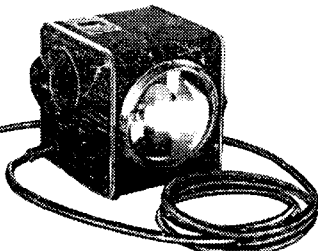
Прибор для каждой отрасли промышленности



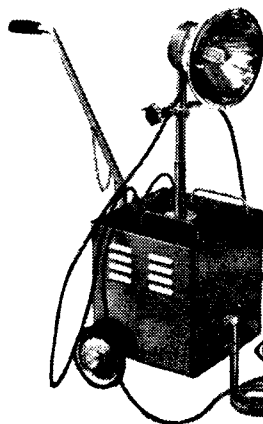
СТРОБОФЛАШ Тип 1200
для световых механизмов



СТРОБОФЛУД Тип 1201
с контактным наконечником
Тип 1201 I для поли-
графической и прочих
технических отраслей
промышленности



СТРОБОТОРЧ Тип 1202
в случаях, где требуется
сила света больше чем
получаемая от СТРОБО-
ФЛУДА



СТРОБОЛУМ Тип 1203
для текстильной промыш-
ленности



„ЗАМЕДЛЯЮЩИЙ“ СТРОБОСКОП Тип 1205
для исследования резонанса до 500 цикл. сек.



Проверка вращающегося антиматериала рентгеновской трубки на ускорение и плавность действия, в течение нескольких минут, посредством СТРОБОФЛАША „DAWE“



СТРОБОФЛУД „DAWE“ с контактным наконечником для исследования рабочего процесса типографской машины



Изучение распределения типографских красок на ротационной типографской машине посредством строботорча DАWE



Пользование СТРОБОЛУМОМ на текстильной фабрике

Полную техническую информацию относительно стробоскопов всех типов можно получить от:

DAWE INSTRUMENTS LTD.

89 UXBRIDGE ROAD, EALING, LONDON, W.5 · АНГЛИЯ