

ДОЛИН А. П.

НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ

Излагается методика расчета распределения плотности тока, потерь, падения напряжения и других электромагнитных параметров пофазно-экранированных токопроводов кольцевого сечения при различной схеме соединения оболочек на основе решения системы интегральных уравнений Фредгольма второго рода методом коллокаций, а также расчета нагрева шин и экранов наружных и внутренних установок (при естественной и смешанной конвекции) в рабочих установившихся режимах. Проводится сопоставление аналитических и экспериментальных значений продольных токов, потерь, температур нагрева шин и экранов, подтвердивших достаточно высокую точность предлагаемой методики расчета. Обсуждаются результаты исследований нагрузочной способности и других параметров токопроводов при нештатном заземлении оболочек в двух точках, установке дросселей в цепи экранов, изменении окраски проводников, солнечной радиации, температуры воздуха.

Разработана и внедрена программа расчета на ПЭВМ типа IBM PC в диалоговом режиме электромагнитных параметров токопроводов, средней температуры нагрева шин и экранов, а также длительно допустимых токов токопроводов, предназначенная для проведения проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ.

Расчет нагрузочной способности экранированных токопроводов сводится к решению уравнений электромагнитного поля, в результате которого находится распределение плотности токов в проводниках (шинах и экранах) в рабочих режимах и решению уравнений теплового баланса токопровода относительно температуры или продольных токов шин. Методика расчета электромагнитных полей экранированных токопроводов разрабатывалась в [1—6] и других работах. Например, в [1] разработан экспериментально-расчетный метод, основанный на решении контурных уравнений. Однако использование этого метода в практике проектирования затруднительно, так как требует предварительного определения (например, на физических моделях) двух контурных сопротивлений.

В [2] использовался метод зеркальных отображений. Токи в шинах приняты нитевидными, а экраны сверхпроводящими. В [3] расчет полей сводится к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных численными методами. В качестве краевых условий принимается напряженность магнитного поля, определенная для сверхпроводящих экранов. При расчете электромагнитных полей на основе интегральных уравнений нет необходимости определять граничные условия [4, 5]. Однако решение этих уравнений методом итераций [4] требует достаточно большого машинного времени, что затрудняет внедрение этого метода в системах автоматизированного проектирования. Время вычисления на ЭВМ значительно сокращается при решении интегральных уравнений методом коллокаций [5, 6], который разрабатывался для токопроводов с общим экраном кольцевого сечения.

Ниже рассматривается методика расчета электромагнитных полей, плотностей

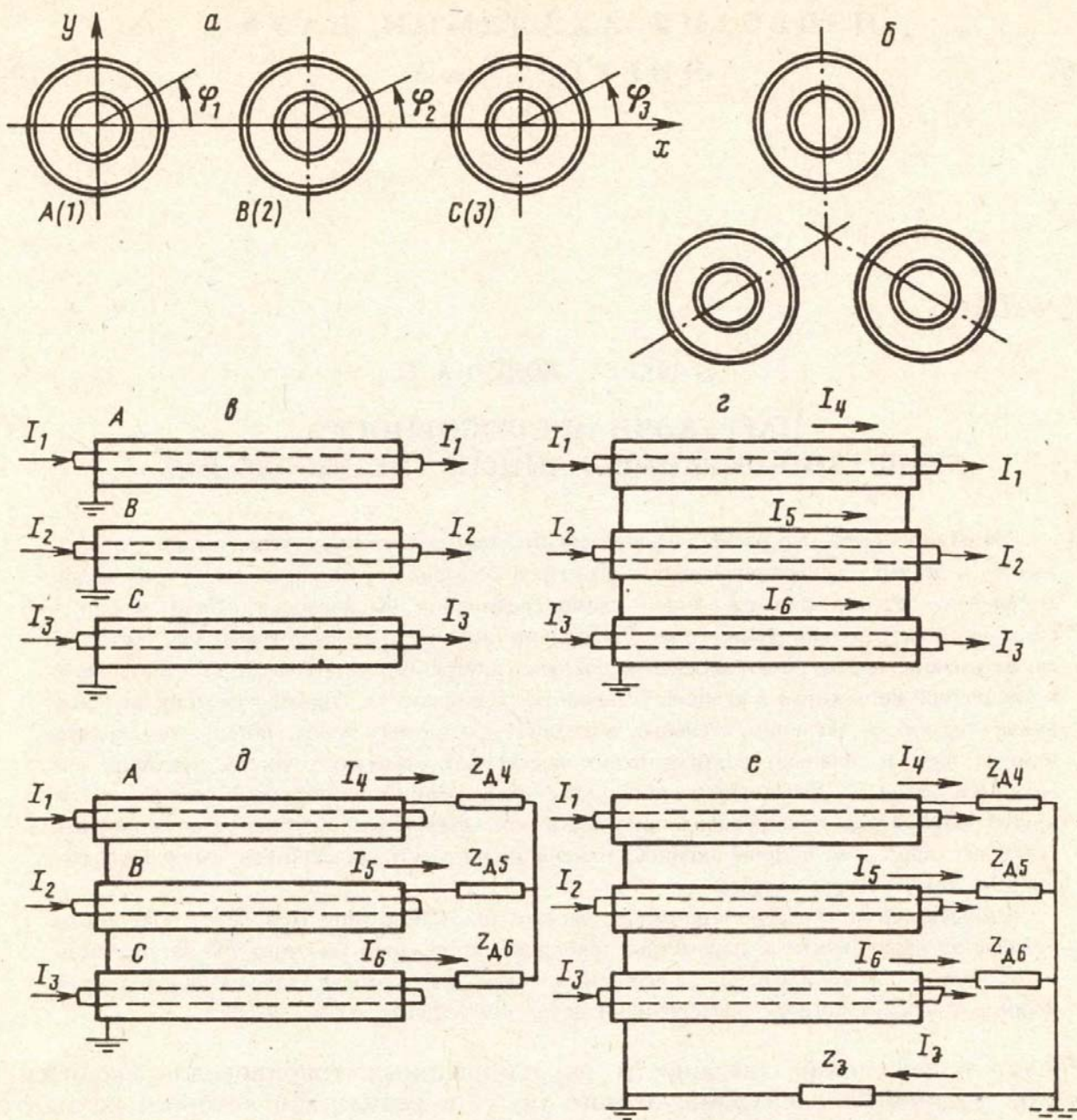


Рис. 1. Схемы соединения оболочек пофазно-экранированных токопроводов

токов, падений напряжений, а также температур нагрева шин и экранов, длительно допустимых рабочих токов и других параметров пофазно-экранированных токопроводов с проводниками кольцевого сечения (рис. 1а, б) в рабочих (установившихся) режимах на основе решения интегральных уравнений Фредгольма второго рода методом коллокаций, реализованным на ПЭВМ в диалоговом режиме. Разработанные методика, алгоритм и программа предназначены для расчета пофазно-экранированных токопроводов с разомкнутыми (секционированными) оболочками (рис. 1в), экранами замкнутыми накоротко или через сопротивления (обычно дроссели) (рис. 1г, д), с экранами (нестатно) заземленными в двух точках (рис. 1е), а также могут быть использованы для расчета электромагнитных параметров токопроводов без экранов и с общим экраном кольцевого сечения при произвольном расположении проводников.

Распределение плотности токов по сечениям проводников (с относительной магнитной проницаемостью μ , равной 1) в установившемся квазистационарном режиме описывается системой интегральных уравнений [4, 5]

$$\underline{\delta}_n \rho_n - j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{S_k} \underline{\delta}_k \ln R_{k(ns)} dS_k = \underline{u}_{np. n} \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

где n, k — номера проводников; N — число проводников токопровода (включая экраны); $\underline{\delta}_n, \rho_n, \underline{u}_{np. n}$ — плотность тока, А/м², удельное электрическое сопротивление, Ом·м, и падение напряжения на единицу длины проводника, В/м; ω — частота тока, рад/с; μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м; $R_{k(ns)}$ — расстояние между точкой s проводника, в которой определяется плотность тока и элементарной площадкой dS_k ; S_k — площадь поперечного сечения проводника с номером k , м². (Ниже черта под комплексными величинами для упрощения записи опущена.)

Систему (1) необходимо дополнить уравнениями, связывающими продольные токи проводников с плотностями токов, а для замкнутых экранов — узловыми уравнениями. Продольные токи в проводниках составляют

$$I_n = \int_{S_n} \delta_n dS_n \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (2)$$

Падения напряжения в цепи проводник — дроссель равны

$$U_n = u_n l = u_{np. n} l + U_{д. n}, \quad (3)$$

где u_n — падение напряжения в цепи на единицу длины токопроводов, В/м; l — длина токопровода, м; $U_{д. n} = I_n z_{д. n} l$ — падение напряжения в дросселе, В; $z_{д. n} = r_{д. n} + j\omega L_{д. n}$ — сопротивления дросселя на единицу длины токопровода, Ом/м.

Продольные токи в шинах токопровода I_n ($n = 1, 2, \dots, Q$, где Q — число шин) являются исходными (заданными) параметрами, а в оболочках токопроводов с общим экраном и в разомкнутых оболочках пофазно-экранированных токопроводов они равны нулю:

$$I_n = 0 \quad (n = Q + 1, Q + 2, \dots, N). \quad (4)$$

Погонные падения напряжения в цепях экранов этих токопроводов, а также шин всех типов токопроводов

$$u_n = u_{np. n}. \quad (5)$$

В пофазно-экранированных токопроводах, оболочки которых замкнуты коротко или через дроссели (рис. 1г, д) и заземлены в одной точке

$$\sum_{n=Q+1}^N I_n = 0; \quad (6)$$

$$u_{Q+1} = u_{Q+2} = \dots = u_N, \quad (7)$$

здесь $u_{Q+w} = u_{np. (Q+w)} + I_{Q+w} z_{д. (Q+w)}$ ($w = 1, 2, \dots, N - Q$).

Если экраны заземлены в двух точках (рис. 1е),

$$\sum_{n=Q+1} I_n = -I_3; \quad (8)$$

$$u_n = u_3 \quad (n = Q + 1, Q + 2, \dots, N), \quad (9)$$

где I_3 — ток в земле, А; $u_3 = U_3/l = I_3 z_3$ — падение напряжения в контуре заземления на единицу длины токопровода, В/м; $z_3 = r_3 + j\omega L_3$ — сопротивление контура заземления на единицу длины токопровода, Ом/м.

В частном случае, если сопротивление контура заземления равно нулю

$$u_n = 0 \quad (n = Q + 1, Q + 2, \dots, N). \quad (10)$$

Плотности тока в проводниках можно искать в виде рядов по гармоническим и цилиндрическим функциям с неопределенными коэффициентами

$$\delta_k = \sum_{m=0}^{\infty} [a_{km} J_m(\xi_k) \sin m\varphi_k + b_{km} H_m^{(2)}(\xi_k) \cos m\varphi_k + c_{km} J_m(\xi_k) \cos m\varphi_k + d_{km} H_m^{(2)}(\xi_k) \sin m\varphi_k], \quad (11)$$

где $a_{km}, b_{km}, c_{km}, d_{km}$ — коэффициенты плотностей токов, A/m^2 ; J_m и $H_m^{(2)}$ — функции Бесселя и Ганкеля m -ого порядка; $\xi_k = \lambda_k R_k$ — относительная радиальная координата; $\lambda = \sqrt{-j\omega\mu_k\mu_0/\rho}$ — параметр, модуль которого обратно пропорционален глубине проникновения электромагнитной волны, m^{-1} ; R_k и φ_k — радиальная (m) и угловая (рад) координаты точек в сечении k -ого проводника.

Коэффициенты плотностей токов шин b_{k0} и c_{k0} ($k = 1, 2, \dots, Q$) определяются для уединенной шины при заданных значениях продольных токов из уравнения (2), которое приводится к виду

$$I_k = \frac{2\pi}{\lambda} \left[b_{k0} \int_{R_{ki}}^{R_{ke}} R_k H_0^{(2)}(\xi_k) d\xi_k + c_{k0} \int_{R_{ki}}^{R_{ke}} R_k J_0(\xi_k) d\xi_k \right]. \quad (12)$$

После вычисления интегралов, принимая во внимание, что ток во внутренней полости трубчатой шины тождественно равен нулю, получим

$$b_{k0} = \frac{I_k \lambda_k}{2\pi R_{ke} D}; \quad c_{k0} = \frac{I_k \lambda_k}{2\pi R_{ki} D}, \quad (13)$$

где R_{ke} и R_{ki} — внешний и внутренний радиусы шины;

$$D = H_1^{(2)}(\xi_{ke}) J_1(\xi_{ki}) - H_1^{(2)}(\xi_{ki}) J_1(\xi_{ke}).$$

Если толщина стенки шины или экрана невелика, оправдано отказаться от учета неравномерности распределения тока по толщине проводника, что значительно упрощает решение задачи. В этом случае плотности токов можно представить в виде ряда Фурье

$$\delta_k = \frac{1}{h_k} \left[b_{k0} + \sum_{m=1}^{\infty} (a_{km} \sin m\varphi_k + b_{km} \cos m\varphi_k) \right], \quad (14)$$

где h_k — толщина стенки шины или экрана, м.

Тогда продольные токи в проводниках оказываются равными

$$I_k = 2\pi R_k b_{k0}. \quad (15)$$

Потребуем, чтобы уравнения (1) удовлетворялись в конечном числе точек (точках коллокаций). Подставляя (11) или (14) в (1), приходим к системе алгебраических уравнений относительно комплексных коэффициентов $a_{km}, b_{km}, c_{km}, d_{km}$ и падений напряжения u_k . Для токопроводов с малой толщиной стенки трубчатых проводников система (1) с учетом (3)—(9), (15) приводится к виду

$$\alpha \sum_{\substack{k=Q+1 \\ (k \neq i \text{ при } \beta=0)}}^N b_{k0} \left\{ \left[\Delta_n^k \left(\frac{\rho_n}{h_n} + 2\pi R_n r_{n,i} \right) + (\beta - 1) \Delta_i^n \times \right. \right. \\ \times \left. \frac{R_k}{R_i} \left(\frac{\rho_i}{h_i} + 2\pi R_i r_{n,i} \right) + \beta 2\pi R_k r_{n,i} \right] - \rho \left[\frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_k} \ln R_{k(ns)} dS_k - \Delta_n^k 2\pi R_n L_{n,i} + \right. \\ \left. + (\beta - 1) \frac{R_k}{R_i} \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_k} \ln R_{k(is)} dS_k + \Delta_i^n 2\pi R_i L_{n,i} \right) - \right.$$

Тип токопровода	Значения коэффициентов α , β и γ			
	α	β	γ_1	γ_2
Токопровод с общим экраном	0	—	1	0
Пофазно-экранированные токопроводы с экранами:				
секционированными (рис. 1, в)	0	—	1	0
замкнутыми накоротко или через дроссели (рис. 1, г, д)	1	0	0	1
заземленные в двух точках (рис. 1, е) при сопротивлении				
$z_3 = 0$	1	1	0	0
$z_3 \neq 0$	1	1	0	1

$$\begin{aligned}
& - \beta 2\pi R_k L_s \} + \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^{M_k} \{ a_{km} \left[\Delta_n^k \frac{\rho_n}{h_n} \sin m\varphi_{(ns)} - \right. \\
& - p \frac{\mu_0}{2\pi h_k} \int \sin m\varphi_k \ln R_{k(ns)} dS_k \left. \right] + b_{km} \times \\
& \times \left[\Delta_n^k \frac{\rho_n}{h_n} \cos m\varphi_{(ns)} - p \frac{\mu_0}{2\pi h_k} \int \cos m\varphi_k R_{k(ns)} \times \right. \\
& \times dS_k \left. \right] \} - \left[\sum_{k=1}^Q \Delta_n^k u_n + \gamma_1 \sum_{k=Q+1}^N \Delta_n^k u_n + \gamma_2 \Delta(k \geq Q+1) u_i \right] = - \sum_{k=1}^Q \frac{I_k}{2\pi R_k} \times \\
& \times \left[\Delta_n^k \frac{\rho_n}{h_n} - p \frac{\mu_0}{h_k} \int \ln R_{k(ns)} dS_k \right] \quad (n = 1, 2, \dots, N),
\end{aligned} \tag{16a}$$

где Δ_n^k — символ Кронекера ($\Delta_n^k = 1$, если $k = n$ и $\Delta_n^k = 0$, если $k \neq n$); $\Delta(k \geq Q+1)$ — функция, равная 1 при $k \geq Q+1$ и 0 при $k < Q+1$; R_k — средний радиус проводника с номером k ; i — номер экрана, принятого в расчетах за опорный; α , β , γ_1 и γ_2 — коэффициенты, равные 0 или 1 в зависимости от способа соединения экранов (табл. 1); M_k — удерживаемое число членов ряда (14).

Если экраны токопровода заземлены в двух точках и сопротивление контура заземления z_3 не равно нулю, систему уравнений (16а), согласно (8) и (10), необходимо дополнить уравнением

$$\gamma_2 \left[\sum_{k=Q+1}^N (b_{k0} 2\pi R_k z_3) + \Delta(k \geq Q+1) u_i \right] = 0. \tag{16б}$$

Система (16) для всех рассматриваемых токопроводов, кроме токопровода с экранами, заземленными в двух точках при $z_3 \neq 0$, содержит $\sum_{k=1}^N (2M_k + 1)$ линейно независимых алгебраических уравнений и соответствующее количество перемен-

ных. В токопроводах с экранами, заземленными в двух точках при сопротивлении контура заземления, не равном нулю, порядок системы (16) — $\sum_{k=1}^N (2M_k + 1) + 1$. В результате решения этой системы уравнений определяются коэффициенты продольных токов замкнутых экранов b_{k0} ($k > Q, k \neq i$), коэффициенты вихревых токов проводников a_{km} и b_{km} , а также погонные падения напряжения u_k . Коэффициенты продольного тока в опорном экране ($k = i$) вычисляются по формуле

$$b_{i0} = - \sum_{\substack{k=Q+1 \\ k \neq i}}^N R_k b_{k0} / R_i, \quad (17)$$

продольные токи в экранах — согласно (15), токи в контуре заземления — (8), а падения напряжения в экране и дросселе — (3).

Все интегралы в уравнениях (16) приводятся к табличным [7] и определены, например, в [5]. При использовании разложения (11) часть интегралов необходимо вычислять на ЭВМ.

При решении системы алгебраических уравнений (16) предпочтение отдано подпрограмме *DECOMP* [8] (реализованной с двойной точностью), основанной на гауссовском исключении с частичным выбором ведущего элемента, которая также дает оценку обусловленности матрицы коэффициентов при неизвестных. Число членов ряда (14) варьировалось от 0 до 9 и соответственно число точек коллокаций для каждого проводника изменялось от 1 до 19.

Расчеты показали, что для всех рассматриваемых типов токопроводов с достаточной для инженерных задач точностью можно ограничиться тремя членами ряда (14), а в ряде случаев одним-двумя членами. При этом время расчета на IBM PC трехфазных трехпроводных пофазно-экранированных токопроводов составляет менее 1 мин. Для симметричных токопроводов его можно сократить на 30—40%.

Например, если оси шин и экранов лежат в одной плоскости, то при выборе начала отсчета угловой координаты от этой плоскости (совпадающей с осью x на рис. 1, a), плотности токов δ_k оказываются четными функциями φ_k . В этом случае коэффициенты a_{km} ($k = 1, \dots, N$) равны 0, а число линейно независимых переменных и точек коллокаций сокращается до $\sum_{k=1}^N (M_k + 1)$ или $\sum_{k=1}^N (M_k + 1) + 1$.

Как подтвердили расчеты, наибольшая неравномерность распределения тока по периметру оболочек имеет место в токопроводах с разомкнутыми экранами. При установке в цепи экранов индуктивных сопротивлений амплитуды плотностей токов снижаются и в токопроводах с оболочками, замкнутыми накоротко, токи распределены почти равномерно.

Потери в проводниках токопровода определяются по формуле

$$P_k = \int_{S_k} \delta_k^2 \rho_k dS_k. \quad (18)$$

При равномерном распределении тока по толщине проводников потери приводятся к виду

$$P_k = \frac{\pi R_k \rho_k}{h_k} [b_{k0}^2 + \sum_{m=1}^{M_k} (a_{km}^2 + b_{km}^2)]. \quad (19)$$

Результаты расчетов сопоставить с экспериментальными данными. В качестве примера на рис. 2 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости потерь и продольных токов экранов от сопротивлений перемычек (включенных в фазах А и С) пофазно-экранированного токопровода ТЭН-300 (современный

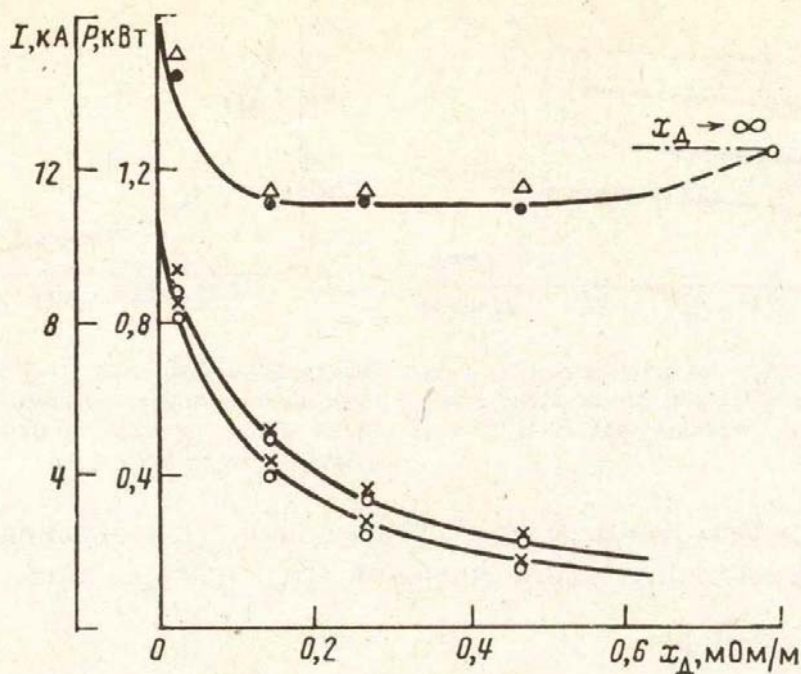


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные (отмеченные точками) зависимости продольных токов экранов и суммарных потерь в токопроводе ТЭН-300 от сопротивлений дросселей, включенных в цепь экранов крайних фаз А и С (проводников 4 и 6). \circ — продольные токи, измеренные поясом Роговского; \times — продольные токи, определенные по результатам интегрирования плотностей токов, измеренных с помощью потенциометра; $*$ — потери, вычисленные по экспериментальным значениям среднеквадратичных токов с учетом эффекта близости; \bullet — потери, определенные по результатам измерений токов и линейных падений напряжения

аналог — ТЭКЕ-20-12500-400УХЛ1) при рабочем токе $I = 10$ кА. Параметры токопровода: диаметры шин 420 мм, экранов — 890 мм, толщина стенок соответственно 10 и 5 мм, расстояние между фазами 1280 мм. Шины изготовлены из алюминия марки АДО, экраны — АД1Н. Испытания проводились в НИЦ ВВА сотрудниками испытательного центра и кафедры «Электрические станции» МЭИ Берберовым А. Э., Нечаевым Б. В., Солодовниковым Г. Н. и другими.

С увеличением сопротивления перемычек от 0 до ∞ продольные токи экранов снижаются от значения 10 кА, равного рабочему току шин, до 0. Суммарные потери токопровода с увеличением x_d сначала быстро уменьшаются, при $x_d \approx 0,2$ мОм/м стабилизируются, а затем медленно возрастают. Погрешность расчета продольных токов составила не более 10%, а потерь — 5—10%, что близко к точности измерений.

На рис. 3 приводятся зависимости падений напряжения (на единицу длины) в шинах $u_{ш}$ и экранах $u_{э}$ токопровода ТЭН-300 от сопротивлений, установленных в цепи оболочек фаз А и С. Точками на рис. 3 отмечены экспериментально полученные значения напряжений. Погрешность расчета напряжений не превышала 7%.

На рис. 4 представлена расчетная зависимость тока в земле от сопротивления контура заземления $|z_3|$ (при $r_3/x_3 = 1,9$ и рабочем токе 10 кА) при нештатном заземлении короткозамкнутых экранов токопровода ТЭН-300 в двух точках. Результаты расчетов показали, что ток в контуре заземления может достигать несколько десятков ампер, а при малых значениях сопротивления z_3 — сотни ампер.

Удельные электрические сопротивления в расчетах приняты с учетом температуры нагрева шин и экранов, определенных при испытаниях (или по описанной ниже методике). Сопоставление аналитических и экспериментальных данных показало достаточно высокую точность предлагаемой методики расчета электромагнитных параметров пофазно-экранированных токопроводов в рабочих режимах при различной схеме соединения оболочек.

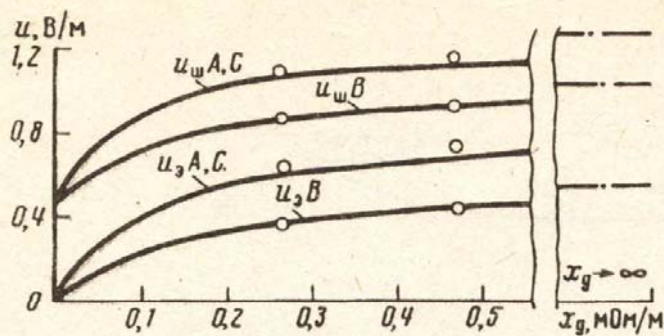


Рис. 3. Зависимости падений напряжений в проводниках токопровода ТЭН-300 от сопротивлений, установленных в цепи экранов фаз А и С при рабочем токе 10 кА

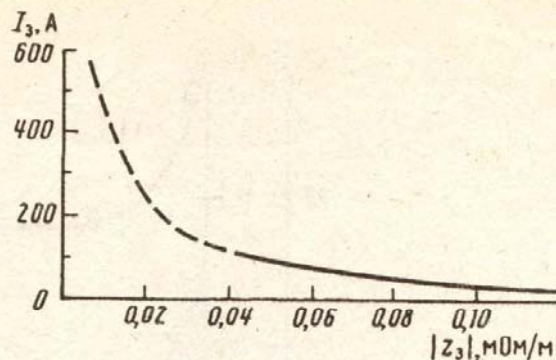


Рис. 4. Зависимости I_3 от сопротивления контура заземления при заземлении экранов токопровода в двух точках и отношении сопротивлений $r_3/x_3 = 1,9$

В рабочих режимах температуры нагрева шин $\vartheta_{ш}$ и экранов $\vartheta_э$ не должны превышать длительно допустимых значений $\vartheta_{ш, доп}$ и $\vartheta_{э, доп}$, т. е.

$$\vartheta_{ш} \leq \vartheta_{ш, доп}; \quad \vartheta_э \leq \vartheta_{э, доп}. \quad (20)$$

В соответствии с ГОСТ 8024-90 [9] допустимая температура шин принята 105°C , а экранов — 80°C . Токопроводы удовлетворяют условиям нагрузочной способности (20), если

$$I_{раб. нб} \leq I_{доп}, \quad (21)$$

где $I_{доп}$ — длительно допустимый рабочий ток токопровода, равный максимальному току, при котором температуры проводников не превышают допустимых.

Таким образом, расчет нагрузочной способности токопровода заключается в определении температур нагрева шин и экранов или допустимого рабочего тока. На практике температуры проводников принимаются неизменными по периметру шин и экранов, равными средним температурам. В этом случае задача сводится к решению системы трансцендентных уравнений теплового баланса коаксиальных проводников, которая при естественном охлаждении токопровода имеет вид

$$P_э(I, \vartheta_э) + Q_{к, шэ}(\vartheta_{ш}, \vartheta_э) + Q_{л, шэ}(\vartheta_{ш}, \vartheta_э) + Q_c - Q_{л, э}(\vartheta_э) - Q_{к, э}(\vartheta_э) = 0, \\ P_{ш}(I, \vartheta_{ш}) - Q_{к, шэ}(\vartheta_{ш}, \vartheta_э) - Q_{л, шэ}(\vartheta_{ш}, \vartheta_э) = 0, \quad (22)$$

где $P_э$ и $P_{ш}$ — потери в экране и шине, Вт; $Q_{к, шэ}$ и $Q_{л, шэ}$ — тепловые потоки, обусловленные естественной конвекцией и излучением между шиной и экраном, Вт; $Q_{к, э}$ — тепловой поток при естественной или смешанной (естественной и вынужденной) конвекцией с внешней поверхности экрана, Вт; $Q_{л, э}$ — тепловой поток излучением с внешней поверхности экрана, Вт; Q_c — тепловой поток, обусловленный солнечной радиацией, Вт; I — рабочий ток, А; $\vartheta_{ш}$ и $\vartheta_э$ — температуры шины и экрана, $^\circ\text{C}$.

Конвективный тепловой поток с поверхности экрана, согласно [10], на единицу длины равен

$$Q_{к, э} = F_{к, э} q_{к, э} = \pi Nu \lambda_b (\vartheta_э - \vartheta_a), \quad (23)$$

где $F_{к, э}$ — площадь внешней поверхности экрана, м^2 ; $q_{к, э}$ — плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; λ_b и ϑ_a — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{C})$, и температура, $^\circ\text{C}$, окружающего воздуха.

Число Нуссельта при естественной конвекции (во внутренних установках) и смешанной конвекции (характерной при малых скоростях ветра, в том числе при штиле, в наружных установках) определяется критериальными зависимостями вида [10, 11]

Индекс установки	Значения констант		Области значений Gr и Re
	n_i	m_i	
1	0,46	0,25	$1,4 \cdot 10^3 \leq Gr \leq 1,4 \cdot 10^8$
2	0,437	0,5	$5 < Re \leq 10^3$
—	0,218	0,6	$10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$
—	0,0201	0,8	$3 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$

Таблица 3

Материал	Коэффициенты излучения и поглощения	
	ϵ	a_c
Алюминий (окисленный)	0,11	0,40
Краска белая	0,81	0,30
желтая	0,92	0,44
зеленая	0,92	0,61
красная	0,92	0,63
серая	0,92	0,65
черная	0,96	0,90

$$Nu = \begin{cases} n_1 Gr^{m_1} k_1, & \text{во внутренних установках;} \\ n_2 Re_*^{m_2} k_2, & \text{в наружных установках,} \end{cases} \quad (24)$$

где n_1 , m_1 , n_2 , m_2 — константы при естественной свободной и вынужденной конвекции (табл. 2); Gr — число Грасгофа; Re_* — эквивалентный критерий Рейнольдса; k_1 и k_2 — коэффициенты, учитывающие влияние соседних фаз токопровода на процесс теплоотдачи конвекцией.

Число Грасгофа равно:

$$Gr = g\beta_s \theta d / \nu_s^2,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; β_s — температурный коэффициент объемного расширения воздуха, примерно равный $1/T_s$; $T_s = 273 + \vartheta_s$ — термодинамическая температура воздуха, К; $\theta = \vartheta_s - \vartheta_0$ — перепад температур между экраном и воздухом, °С; d — характерный размер, здесь равный внешнему диаметру экрана $d_{с1}$, м; ν_s — кинетический коэффициент вязкости воздуха, м²/с.

Эквивалентный критерий Рейнольдса, согласно подходу О. Кришера (о единицах соотношения теплообмена) при направлении вынужденного потока в вертикальной плоскости, равен [11]

$$Re_* = Re + \sqrt{0,5Gr}, \quad (25a)$$

а при горизонтальном потоке (ветре), может быть представлен в виде

$$Re_* \approx \sqrt{Re^2 + 0,5Gr}, \quad (25b)$$

где $Re = Vd_{с1}/\nu_s$ — критерий Рейнольдса; V — скорость ветра, м/с.

Коэффициенты теплопроводности λ_s и кинетической вязкости ν_s являются функциями температуры и в интервале (–50, +50)°С при нормальном атмо-

ферном давлении для сухого воздуха соответственно составляют $2,04 \cdot 10^{-2} \dots$
 $\dots 2,83 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·°С) и $9,23 \cdot 10^{-6} \dots 17,98 \cdot 10^{-6}$ м²/с. В программе эти коэф-
 фициенты определяются в зависимости от температуры ϑ_b путем линейной ап-
 проксимации табличных функций λ_b и ν_b (заданных с шагом 10° С).

В токопроводах, проводники которых расположены в горизонтальной плоскости, коэффициенты k_1 и k_2 экранов средних фаз незначительно меньше, чем в крайних. Тем не менее в практических расчетах эти коэффициенты для всех фаз обычно принимают одинаковыми, равными 1. При этом погрешность расчета температуры, как показывают измерения [12], не превышает 2—5%.

Тепловой поток излучением (на погонный метр) с внешней поверхности экрана в соответствии с [13, 14] составляет

$$Q_{л,э} = F_{л,э} q_{л,э} = \pi d_{э1} (1 - \varphi) \varepsilon_{э1} c_0 \left[\left(\frac{T_э}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right], \quad (26)$$

где φ — угловой коэффициент лучистого теплообмена между цилиндрическими экранами, указанный, например, в [13]; $\varepsilon_{э1}$ — коэффициент излучения с внешней поверхности экрана; $c_0 = 5,67$ — излучающая способность абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); $T_э$ — термодинамическая температура экрана, К.

Тепловой поток, поглощаемый экранами в наружных установках при солнечной радиации, равен

$$Q_c = a_c q_c d_{э1}, \quad (27)$$

где a_c — коэффициент поглощения солнечной радиации; q_c — интенсивность радиации, Вт/м².

Интенсивность радиации зависит от состояния атмосферы, высоты над уровнем моря, активного наклона солнечных лучей. Значения q_c на территории страны в летние месяцы достигают 800—900 Вт/м². Коэффициенты ε и a_c для различных материалов, принятые в расчетах в соответствии с рекомендациями [10, 13, 15], приводятся в табл. 3. При толщине окраски 40—50 мкр степень черноты и коэффициент поглощения практически не зависят от материала основы и равны ε и a_c покрытия [16]. Цвет окраски влияет только на коэффициент поглощения. Наименьшие значения a_c имеют краски и эмали белого цвета.

Конвективный тепловой поток от шин к экрану в цилиндрической прослойке (на единицу длины) приближенно определяется по формуле для эквивалентного процесса теплопроводности [14], которая приводится к виду

$$Q_{к,шэ} = \frac{2\pi \lambda_{эк} (\vartheta_{ш} - \vartheta_э)}{\ln(d_{э2}/d_{ш})}, \quad (28)$$

где $d_{э2}$ и $d_{ш}$ — внутренний диаметр экрана и диаметр шины, м; $\lambda_{эк} = \varepsilon_k \lambda_{в2}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий перенос теплоты через воздушную прослойку как теплопроводностью, так и конвекцией; $\lambda_{в2}$ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К), определяемый при средней температуре прослойки $\vartheta_{в2} = 0,5(\vartheta_{ш} + \vartheta_э)$; $\varepsilon_k = 0,18(\text{GrPr})^{0,25}$ при $\text{CrPr} > 10^3$; Cr — число Грасгофа при средней температуре прослойки и характерном размере $d = (d_{э2} - d_{ш})/2$; Pr — число Прандтля, равное для газов примерно 0,7.

Тепловой поток излучением между шиной и экраном равен

$$Q_{л,шэ} = \varepsilon_{шэ} c_0 F_{ш} \left[\left(\frac{T_{ш}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_э}{100} \right)^4 \right], \quad (29)$$

где $\varepsilon_{шэ}$ — приведенный коэффициент поглощения системы шина — экран:

$$\varepsilon_{шэ} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{ш}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{э2}} - 1 \right) \frac{F_{ш}}{F_{э2}} \right)^{-1} \quad (30)$$

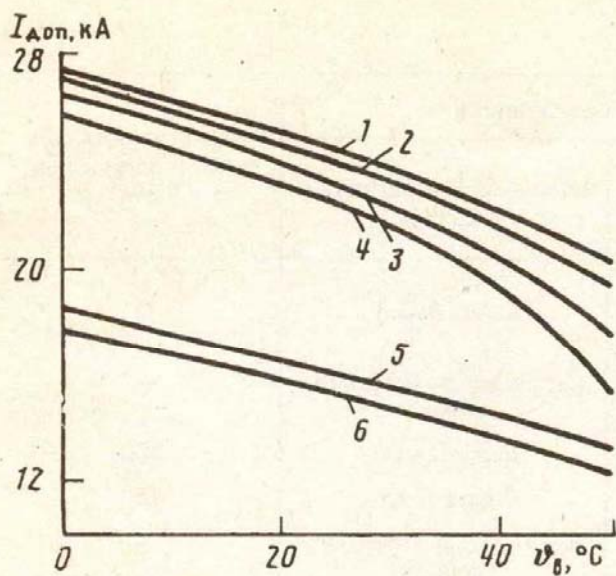


Рис. 5. Зависимости длительно допустимых токов токопровода ТЭНЭ-20-20000-560 УХЛ1 от температуры воздуха в наружных и внутренних установках при различной окраске шин и экранов

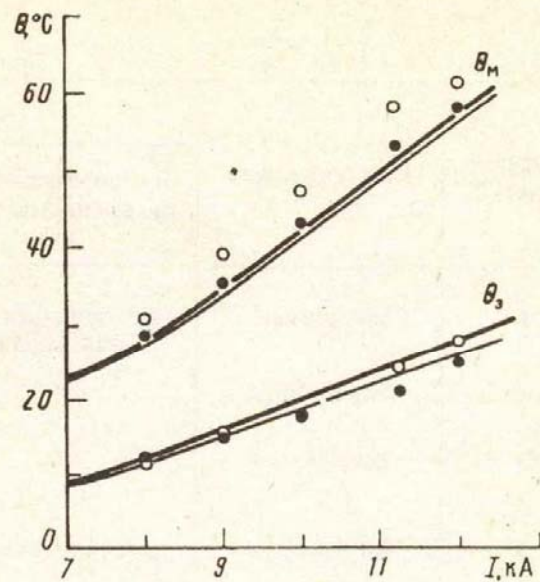


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные зависимости перегревов шин и экранов токопровода ТЭН-300 от рабочего тока —×— фаза А; —о— фаза В

здесь $F_{ш}$, $F_{э2}$, $\epsilon_{ш}$ и $\epsilon_{э2}$ — площади поверхности, а также коэффициенты поглощения шины и внутренней поверхности экрана.

Результаты исследований подтвердили, что инженерные расчеты пофазно-экранированных токопроводов допустимо проводить при равномерном распределении плотности токов по толщине проводников, а потери определять по формуле

$$P_k = k_{nk} P_k', \quad (31)$$

где P_k' — потери в k -ом проводнике при равномерном распределении тока по толщине, вычисленные по формуле (19); k_{nk} — коэффициент поверхностного эффекта, определяемый, например, в соответствии с рекомендациями [17].

Анализ конструкций современных пофазно-экранированных токопроводов показывает, что толщина стенки экранов не превышает 4—6 мм при диаметре 550—1160 мм, а шин — соответственно 8—17,5 мм при диаметре 120—650 мм. В этом случае коэффициент поверхностного эффекта экранов практически равен 1, а шин — составляет 1,03—1,15. Проведенные расчеты показали также, что потери в проводниках токопроводов при различной схеме соединения экранов оказываются равными

$$P_k(I, \vartheta) = I^2 [1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)] P_{k0}(\vartheta_0), \quad (32)$$

где I — рабочий ток (шин); α — температурный коэффициент электрического сопротивления материала проводника, $1/^\circ\text{C}$; ϑ_0 — начальная температура проводника (обычно 20°C); P_{k0} — потери в проводнике при температуре ϑ_0 и единичном рабочем токе (в шине), Вт.

Погрешность формулы (32) составляет менее одного процента, что позволяет проводить расчеты температуры проводников или длительно допустимых токов последовательно в два этапа: на первом этапе решать системы интегральных уравнений электромагнитного поля (определять плотности токов и потери в проводниках P_{k0} при единичном рабочем токе и активных сопротивлениях, соответствующих температуре ϑ_0); на втором — системы уравнений тепловых балансов (22) для каждой коаксиальной пары шина — экран (фазы) токопровода.

Температуры шин $\vartheta_{ш}$ и экранов $\vartheta_{э}$ являются решениями систем трансцендентных уравнений (22) при заданном рабочем токе I . Длительно допустимый рабочий

Таблица 4

№ кривой на рис. 5	Вид установки	Окраска проводников		Интенсивность солнечной радиации, Вт/м ²
		шин и внутренних поверхностей экранов	внешних поверхностей экранов	
1	Наружные	Цветная эмаль (белая, серая)	Белая эмаль	0
2	Внутренние	»	Белая эмаль (цветная, серая)	—
3	Наружные	»	Белая эмаль	850
4	»	»	Серая эмаль	850
5	Внутренние	Неокрашенные	Белая эмаль (цветная, серая)	—
6	Наружные	»	Белая эмаль	850

Таблица 5

Температуры шин и экранов, потери и тепловые потоки в средней фазе В токопровода ТЭНЕ-20-20000-560 УХЛ1 при температуре воздуха 40° С

№ кривой на рис. 5	V, м/с	I, кА	$\vartheta_{э}, ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{ш}, ^\circ\text{C}$	$P_{э}$	$P_{ш}$	$Q_{к,шэ}$	$Q_{л,шэ}$	Q_c	$Q_{к,э}$	$Q_{л,э}$
					кВт/м						
1	0,6	21800	76	105	755	684	121	564	0	551	892
2	0	21570	77	105	741	666	116	549	0	412	916
3	0,6	20590	79,5	105	680	612	105	510	298	610	986
	5,0	20590	61	88	644	587	115	472	298	1054	476
	10,0	20590	54	83	631	579	119	459	298	1185	322
4	0,6	19100	80	102	589	520	87	434	646	619	1140
5	0	14500	57	105	315	302	230	72	0	182	435
6	0,6	13510	62	105	279	263	198	657	298	322	519

ток токопровода $I_{\text{доп}}$ равен наименьшему значению токов I_k' или I_k'' ($k=1, 2, \dots, Q$), которые являются корнями систем уравнений (22) при их решении относительно тока $I = I_k'$ и температуры шины $\vartheta_{ш,к}$ (при температуре экрана, равной длительно допустимой $\vartheta_{э,доп}$) или относительно тока $I = I_k''$ и температуры экрана $\vartheta_{э}$ (при температуре шины, равной $\vartheta_{ш,доп}$).

Условия окружающей среды, а также окраска проводников оказывают существенное влияние на нагрузочную способность токопроводов. В качестве примера на рис. 5 приводятся расчетные зависимости длительно допустимого тока токопровода ТЭНЕ-20-20000-560УХЛ1 от температуры воздуха в наружных и внутренних установках. Данные об окраске шин и экранов, а также интенсивности солнечной радиации приводятся в табл. 4. Расчет токопроводов в наружных установках проводился при штиле, т. е. скорости ветра до 0,6 м/с, с учетом и без учета солнечной радиации.

Наибольший допустимый рабочий ток имеют токопроводы с окрашенными проводниками и экранами белого цвета в наружных установках при отсутствии солнечной радиации (кривая 1). Наибольший нагрев проводников (наименьший рабочий ток) оказывается у токопроводов с неокрашенными шинами и внутрен-

ними поверхностями экранов (кривые 5 и 6). При штатной окраске проводников (кривая 3), нормативном уровне солнечной радиации (850 Вт/м^2), штиле и температуре воздуха 40° С расчетный длительно допустимый ток токопровода равен номинальному току $20\,000 \text{ А}$, установленному заводом-изготовителем.

Расчеты показывают, что для современных токопроводов при нормированных условиях окружающей среды токи I_k' и I_k'' , как правило, отличаются незначительно, т. е. в номинальном режиме температуры шин и экранов равны или незначительно ниже длительно допустимых значений. Например, у токопровода ТЭН-20-20000-560УХЛ1 (табл. 5) температуры экранов при допустимых токах обычно ниже длительно допустимых температур 80° С (т. е. $I_k'' < I_k'$). Окраска в наружных установках при штатной окраске шин и окраске внешней поверхности экранов белой или серой краской, интенсивности солнечной радиации 850 Вт/м^2 (рис. 5, кривые 3 и 4), температуре воздуха больше $35\text{—}40^\circ \text{ С}$ ток I_k'' оказывается больше I_k' , т. е. при температуре экранов 80° С температура шин остается меньше допустимой 105° С .

При номинальных условиях тепловые потоки излучением с внешней поверхности экранов, а также между шинами и экранами обычно в $1,5\text{—}5$ раз больше соответствующих конвективных потоков (табл. 5). Вместе с тем в наружных установках с ростом скорости ветра V возрастает конвективный поток с поверхности экранов, который сначала достигает, а затем существенно превосходит поток излучением.

Расчетные температуры нагрева шин и экранов сопоставлялись с результатами экспериментальных исследований опытного токопровода ТЭН-300, а также других генераторных токопроводов, приведенными, например, в [12] и других работах. Погрешность расчета температур не превышала $5\text{—}30\%$. В качестве примера на рис. 6 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости перепадов температур θ между шинами или экранами (средней и крайних фаз) токопровода ТЭН-300 и окружающим воздухом. Испытания проводились в НИЦ ВВА. Для измерения температур использовались термопары типа хромель — копель и медь — констант, подключенные к электронным потенциометрам. Температура воздуха, кроме того, контролировалась ртутными термометрами.

Экспериментальные значения температур (рис. 6) определялись на горизонтальных участках токопровода в верхних (наиболее нагретых) точках шин и экранов, удаленных от торцов опытного токопровода, поворотов, тепловых компенсаторов и сварных швов. У торцов токопровода температуры шин были примерно на $15\text{—}20\%$ ниже, вблизи сварных швов у тепловых компенсаторов — на $0,5\text{—}10\%$ выше. Температура экранов в различных точках изменялась незначительно.

Температура воздуха при испытаниях была $28\text{—}33^\circ \text{ С}$. Такая же температура принята в расчетах. Поскольку испытания проводились в закрытом помещении, при оценке нагрузочной способности вынужденный конвективный теплообмен и солнечная радиация не учитывались. Так как длина экспериментального токопровода невелика ($\sim 9,5 \text{ м}$), при расчете потерь и других параметров учитывалось сопротивление коротковолновых экранов, примерно равное $0,019 \text{ мОм/м}$.

Расчетные и экспериментальные температуры экранов различаются незначительно (рис. 6). Экспериментально полученные значения температур шин в верхних слоях оказались на $4\text{—}10\%$ выше расчетных средних температур. Для инженерных расчетов нагрузочной способности пофазно-экранированных токопроводов, такую погрешность можно считать вполне удовлетворительной.

Для проведения научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ разработана программа *EKRAN*, реализованная на ПЭВМ IBM PC в диалоговом режиме, предназначенная для расчетов пофазно-экранированных токопроводов наружных и внутренних электроустановок в рабочих режимах при различной схеме электрических соединений оболочек. Программа работает в следующих режимах: 1) расчет потерь и других электромагнитных параметров (продольных

токов, падений напряжений в проводниках, активных и индуктивных сопротивлений) при заданном рабочем токе и температуре проводников; 2) расчет средней температуры проводников (при заданном рабочем токе) токопроводов с естественным охлаждением, а также потерь и других электромагнитных параметров; 3) расчет длительно допустимых рабочих токов токопроводов с естественным охлаждением (при заданных допустимых температурах шин и экранов), а также потерь и других электромагнитных параметров.

Для удобства пользователей в программе предусмотрен выбор из меню схемы соединения экранов (рис. 1), марки сплавов шин и экранов, состояния поверхности проводников (нескрашенные, окрашенные, а для внешней поверхности экранов в наружных установках — окрашенные различными цветами: белой, желтой, зеленой, красной, серой, черной красками), места прокладки токопровода (внутренние, наружные или одновременно внутренние и наружные установки), условий окружающей среды (стандартные или нестандартные). При необходимости возможен ввод (или коррекция) параметров сплавов проводников, коэффициентов излучения и поглощения, температуры воздуха в наружных и внутренних установках, интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра.

Кроме того, в программу вводятся геометрические размеры проводников токопровода, расстояние между фазами, а также (в зависимости от режима работы программы) рабочий ток, температура шин и экранов или длительно допустимые температуры проводников, сопротивления дросселей и контура заземления. Исходные данные и результаты расчетов в виде таблиц, выводов и рекомендаций выводятся на дисплей (для текущего контроля). При выполнении программы формируется файл исходных данных, а также протокол расчета, который можно просматривать и выводить на принтер без выхода из программы.

Программа *EKRAN* прошла апробацию при исследовании нештатных режимов работы токопроводов генераторов 100 МВт на одной из ТЭЦ Мосэнерго и используется в конструкторских бюро заводов-изготовителей токопроводов России и Украины.

Выводы. 1. Методика расчета электромагнитных параметров токопроводов с шинами и экранами кольцевого сечения на основе решения интегральных уравнений методом коллокаций позволяет создать эффективно работающие алгоритмы и программы для систем автоматизированного проектирования токопроводов с воздушной и элегазовой изоляцией.

2. Наибольшие температуры нагрева проводников токопровода следует ожидать в наружных установках при наибольшем уровне солнечной радиации или внутри помещения (у токопроводов, защищенных от прямых солнечных лучей).

3. Окраска экранов цветными или серыми эмалями и красками в наружных установках приводит к снижению нагрузочной способности токопроводов (по сравнению с экранами белого цвета).

4. Изменения способа соединения экранов (заземление в двух точках, снятие перемычек), которые иногда имеют место при эксплуатации токопроводов, приводят к циркуляции больших токов в контуре заземления или появлению потенциала (до сотен вольт) на поверхности экранов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечаев Б. Н., Солодовников Г. Г. Экспериментально-расчетный метод определения электрических параметров пофазно-экранированных токопроводов мощных генераторов // Тр. МЭИ. Вып. 162. М.: МЭИ, 1972. С. 157—165.
2. Кузнецов И. Ф., Цицикян Г. Н. Электродинамические условия в токоведущих частях электрических аппаратов. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
3. Чальян К. М. Методы расчета электромагнитных параметров токопроводов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 280 с.
4. Тозони О. В. Расчет электрических полей на вычислительных машинах. Киев: Техника, 1967. 252 с.