

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

*Да здравствует 1 Мая — День международной солидарности  
трудящихся в борьбе против империализма,  
за мир, демократию и социализм!*

(Из Призывов ЦК КПСС к 1 Мая 1977 года)

1977



ИЗДАТЕЛЬСТВО · ЭНЕРГИЯ ·

5

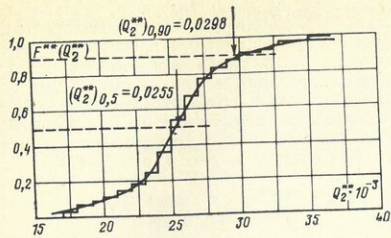


Рис. 4. Результаты статистического моделирования функции распределения  $F^*(Q_2^*)$  в интервале времени планового ремонта выключателя В2.

определяющим надежностью схемы, является междушинный выключатель В1.

Обеспечиваемая безаварийность энергосистемы определяется условиями эксплуатации, режимом работы, надежностью оборудования. В целом ряде случаев наибольшее влияние оказывают структурные изменения. Если количественная оценка безаварийности рассчитана по всевозможным плановым и аварийным состояниям, то она, очевидно, не всегда может быть использована для характеристики системы в интервале с фиксированными состояниями плановых ремонтов.

Рассмотрим структурную надежность схемы рис. 1 на текущий год эксплуатации. Планируется отключение Т2 и В2 на капитальный ремонт с относительной длительностью  $t^*_{T2} = 0,033$  и  $t^*_{B2} = 0,011$ . При ремонте В2 создается нефиксированная схема: Л1 подключается к Ш1 через В1.

Для оценки обеспечиваемой безаварийности необходимо провести изменения массива относительной длительности состояний схемы. Массив описывается среднегодовыми значениями длительности простоя в аварийном ремонте (как случайные события) и длительностью плановых ремонтов Т2 и В2. Результаты расчета показывают, что степень безаварийности подстанции почти не изменилась и составляет  $(Q_2^{**})_{0,9} = 0,0098$ , а  $(Q_2^{**})_{0,5} = 0,0320$ . Простота схемы позволяет объяснить эти результаты. В обоих примерах относительная длительность работы подстанции по нефиксированной схеме не превышает 5%. Отличие в том, что в первом примере она распределена по элементам схемы, а во втором — сосредоточена для В2. Данный пример представляет несомненный интерес в части контроля работоспособности основных логических связей алгоритма.

Результаты моделирования позволяют сделать выводы о влиянии длительности простоя в ремонте на безаварийность работы. Чтобы оценить это

Таблица

Условный номер элемента	Тип элемента	Матрица индексов последствий отказа элементов схемы рис. 1 в состоянии планового ремонта В2 (в условиях текущего контроля)		
		Без развития отказа	С развитием отказа	
			первая степень	вторая степень
1	Л1	0	2	2
2	Л2	0	2	2
3	Т1	0	2	2
4	Т2	0	0	0
5	В1	2	2	2
6	ВШ1/1	2	2	2
7	ВШ1/2	0	0	0

влияние количественно, рассмотрим надежность подстанции в состоянии планового ремонта В2. Это состояние представляет интерес также ввиду возможности количественной оценки риска возникновения аварии подстанции при работе по нефиксированной схеме, структурная надежность которой хорошо известна.

При фиксированном состоянии системы (условия текущего контроля безаварийности), формула представления МИП упрощается. Для рассматриваемого примера МИП приведена в табл. 3.

Расчетная функция распределения  $F^*(Q_2^{**})$  при  $t^*_{B2} = 1$  показана на рис. 4. Если иметь в виду, что  $(Q_2^{**})_{0,5} \ll 1$ , то вероятность обесточения потребителя в интервале  $t^*_{B2}$  будет равна  $(Q_2^{**})_{0,5} = 0,33 \cdot 10^{-3}$  и почти в 30 раз меньше среднегодовой безаварийности.

**Вывод.** Приведенные результаты дают основание считать, что вычисляемые разработанным методом показатели обеспечиваемой безаварийности наиболее полно и объективно отображают структурную надежность схем энергосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patton A. D. Assessment of the Security of Operation of Electric Power Systems Using Probability Methods. — IEEE Trans. on AP, vol. 62, № 7, 1974.
2. Венков В. А., Руденко Ю. Н., Совалов С. А. Задачи исследования надежности электроэнергетических систем. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1973, № 5.
3. Рабинин И. А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л., «Судостроение», 1971.
4. Щур Е. В. Алгоритмы структурно-логического анализа и количественная оценка надежности электроэнергетических систем. Автореф. дис. на соиск. учен. степени к-та техн. наук. Минск, 1975. (Белорусский ПИ.)
5. Фархадзаде Э. М., Мурадалиева Э. М. Сравнительная оценка надежности схем электрических станций и подстанций. — «За технический прогресс», 1974, № 3.

Методика расчета электродинамической стойкости токопроводов напряжением 110 кВ и выше с учетом податливости опор

Канд. техн. наук КУДРЯВЦЕВ Е. П., ДОЛИН А. П.  
Московский энергетический институт

Рост уровней токов коротких замыканий (к. з.) требует достаточно точных оценок электродинамической стойкости токопроводов. Однако распространенные в практике проектирования упрощенные расчеты приводят иногда к значительным погрешностям. Несовершенство расчета токопроводов на статическую нагрузку, равную максимуму электродинамической силы. При значительной податливости опор ощутимые погрешности дают и расчеты, учитывающие колебания шин при к. з., но не учитывающие колебания изоляторов [Л. 1—3]. С податливыми опорами чаще всего приходится встречаться в распределительных устройствах напряжением 110 кВ и выше. Податливость опор обусловлена податливостью изоляторов, деформациями конструкций, к которым они крепятся, и подвижностью болтовых соединений. Расчеты электродинамической стойкости токопроводов в таких распределительных устройствах затруднены из-за отсутствия методик, доведенных до простых расчетных графиков.

В статье излагается методика расчета сил, действующих на изоляторы, и напряжений в материале шин при к. з. с учетом упругих колебаний системы «шина—изолятор». Приводятся облегчающие вычисления графики. Обсуждаются результаты исследования влияния на электродинамическую стойкость шин и изоляторов отдельных составляющих электродинамических нагрузок, некоторых параметров токопроводов, фазы включения и продолжительности времени затухания аperiodической составляющей тока к. з.

Шину можно, как и в [Л. 4], рассматривать как неразрезную балку с равномерно распределенной по длине массой, на которую при к. з. действует переменная во времени нагрузка. При равных расстояниях между изоляторами все пролеты параллельных шин находятся в одинаковых условиях, поэтому достаточно рассмотреть один пролет.

Колебания шины в ее главных плоскостях инерции  $\nu$  и  $\tau$  (рис. 1) описываются дифференциальными уравнениями [Л. 5]:

$$\frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} + \frac{EJ_j}{m} \frac{\partial^4 y_j}{\partial x^4} = \frac{q_j}{m}, \quad (j=1, 2), \quad (1)$$

где  $t$  — время, с;  $y_j$  — прогибы шины, м;  $m$  — ее поперечная масса, кг/м;  $EJ_j$  — изгибные жесткости, кг·м<sup>2</sup>;  $q_j$  — электродинамические нагрузки на единицу длины шины, Н/м. Значение  $j=1$  соответствует колебаниям шины в плоскости инерции  $\nu$ , значение  $j=2$  — колебаниям в плоскости  $\tau$ . При любом расположении параллельных между собой  $\nu$  и  $\tau$  при к. з. возникнут равномерно распределенные по длине шины нагрузки, равные:

$$q_j = \frac{\alpha}{a} I^2 m \sum_{n=1}^6 D_{jn} T_n(t), \quad (2)$$

где  $a=2 \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>;  $a$  — параметр, характеризующий расстояния между шинами, м;  $I_M$  — амплитуда периодической составляющей тока к. з., А;

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 1; T_2 = e^{-2t/T_a}; T_3 = e^{-t/T_a} \cos \omega t; \\ T_4 &= e^{-t/T_a} \sin \omega t; T_5 = \cos 2\omega t; T_6 = \sin 2\omega t. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь  $T_a$  — постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к. з., с;  $\omega$  — угловая частота тока, рад/с.

Величины постоянных коэффициентов  $D_{jn}$  ( $j=1, 2$ ;  $n=1, 2, \dots, 6$ ) определяются взаимным расположением шин токопровода, ориентацией опор, видом к. з. и фазой включения  $\psi$  тока к. з. Для некоторых типов токопроводов эти постоянные определены [Л. 1 и 6].

Каждую из функций (3) можно записать в комплексной форме:

$$T_n(t) = b_n e^{(\beta_n + i\gamma_n)t} + d_n e^{(\beta_n - i\gamma_n)t}, \quad (4)$$

где  $b_n, d_n, \beta_n$  и  $\gamma_n$  — константы, выражающиеся через параметры функций (3). Таким образом, задача об оценке электродинамической стойкости токопровода при достаточно сложных нагрузках (2) может быть сведена к суммированию решений уравнений (1) с правыми частями вида (4) [Л. 7].

Полным решением дифференциального уравнения (1) с правой частью (4) будет сумма его частного решения  $\bar{y}(x, t)$  и полного решения уравнения (1) без правой части  $\bar{y}(x, t)$ :

$$y(x, t) = \bar{y}(x, t) + \bar{y}(x, t). \quad (5)$$

Будем разыскивать частное решение уравнения (1) с правой частью (4) в виде

$$\bar{y}(x, t) = \sum_{s=1}^2 \bar{Y}_s(x) e^{[\beta_s - (-1)^s i\gamma_s]t}. \quad (6)$$

Индексы, указывающие на номер главной плоскости инерции и номер составляющей нагрузки (3), в формуле (6) и в дальнейшем изложении опущены. Подставляя (6) в (1), приходим к обыкновенным линейным дифференциальным уравне-

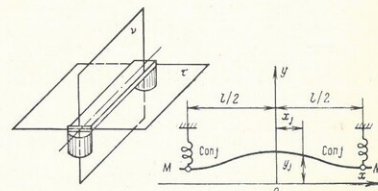


Рис. 1

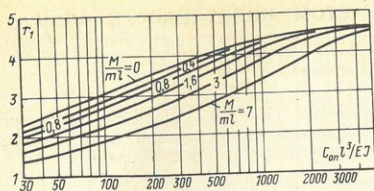


Рис. 2

ниям с постоянными коэффициентами относительных функций  $\bar{Y}_s$ :

$$\frac{d^2\bar{Y}_s}{dx^2} + \frac{m}{EJ} [\beta - (-1)^s \gamma] \bar{Y}_s = U_s, \quad (7)$$

где  $U_s$  — постоянные. Частные решения уравнений (7) с правой частью также постоянные. Произвольные постоянные решений уравнений (7) без правой части могут быть определены из граничных условий: при  $x = \pm l/2$

$$\frac{\partial \bar{y}}{\partial x} = 0; \quad (8a)$$

$$2EJ \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial x^2} - c_{оп} \bar{y} - M \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial t^2} = 0, \quad (8б)$$

где  $l$  — длина пролета шины, м;  $c_{оп}$  — жесткость опоры, Н/м;  $M$  — приведенная масса опоры, кг. Обычно оси изоляторов лежат в одной из главных плоскостей инерции шин. На рис. 1 такой плоскостью является плоскость  $v$ . При колебаниях в этой плоскости приведенная масса  $M$  может приниматься равной массе опоры. Если колебания происходят в плоскости  $\tau$ , приведенную массу можно определить, например, по формуле

$$M = \frac{c_{оп}}{\Omega_{оп}^2}, \quad (9)$$

где  $\Omega_{оп}$  — угловая частота собственных колебаний опоры, рад/с.

Условие (8a) требует отсутствия поворотов опорных сечений шин, (8б) является условием равновесия узла крепления шины к изолятору. В этом условии слагаемое  $2EJ \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial x^2}$  представляет собой сумму поперечных сил в шине слева и справа от опорного сечения, слагаемое  $c_{оп} \bar{y}$  является силой взаимодействия шины и изолятора, пропорциональной смещению головки изолятора, слагаемое  $M \frac{\partial^2 \bar{y}}{\partial t^2}$  учитывает инерцию массы опоры.

Полное решение  $\bar{y}(x, t)$  однородного уравнения, удовлетворяющее, как и решение (6), граничным условиям (8), получим в виде ряда по собственным функциям [1. 5]:

$$\bar{y}(x, t) = \sum_{k=1, 3, 5, \dots}^{\infty} X_k(x) (L_k \sin \Omega_k t + N_k \cos \Omega_k t). \quad (10)$$

Можно показать, что собственные функции  $X_k$  равны:

$$X_k = \frac{\text{ch } \frac{r_k x}{l} + \cos \frac{r_k x}{l}}{\text{sh } \frac{r_k}{2} + \sin \frac{r_k}{2}}. \quad (11)$$

где  $r_k$  — параметры собственных частот колебаний упругой системы «шина — изоляторы», определенные из трансцендентного уравнения

$$\left( \frac{c_{оп} l^3}{EJ r_k^3} - \frac{M}{ml} r_k \right) \left( \text{ch } \frac{r_k}{2} + \text{ctg } \frac{r_k}{2} \right) - 4 = 0. \quad (12)$$

Корни уравнения (12) вычислялись на ЦВМ. Полученные в результате расчетов кривые параметра  $r_1$  приведены на рис. 2.

Угловые частоты собственных колебаний  $\Omega_k$  рад/с, равны

$$\Omega_k = 2\pi f_k = \frac{r_k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Здесь  $f_k$  — собственные частоты колебаний шин на упругих опорах, Гц.

Константы  $L_k$  и  $N_k$  определяются из начальных условий:

$$y|_{t=0} = 0; \quad \frac{\partial y}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0.$$

При практических расчетах оказывается достаточно потребовать точного выполнения начальных условий (14) лишь в некоторых сечениях шин. Так, если число таких сечений равно  $p$ , то для определения  $L_k$  и  $N_k$  условия (14) дают систему из  $2p$  линейных алгебраических уравнений.

Приведенные выше формулы позволяют определять прогибы шин и изоляторов от действия каждой отдельной составляющей электродинамической нагрузки, так и от действия нагрузки (2) в целом. Взаимное расположение и ориентация шин могут быть произвольными. Расчет пригоден для широкого класса токопроводов.

Нагрузки на изоляторы в ньютонах и наиболее опасные изгибные напряжения в сечениях шин в паскалях можно найти по формулам:

$$R(t) = c_{оп} y(l/2, t); \quad \sigma(x, t) = \frac{EJ}{W} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2}, \quad (13)$$

где  $W$  — момент сопротивления поперечного сечения шины при изгибе, м<sup>3</sup>. Решения (15) с учетом (2), (5), (6) и (10) могут быть приведены к виду

$$R = \frac{\alpha l}{a} I_M^* R(t); \quad \sigma = \frac{\alpha l^2}{12\alpha W} I_M^* \sigma(x, t), \quad (14)$$

где  $R$  и  $\sigma$  — относительные нагрузки на изолятор и относительные напряжения в материале шин.

Вернемся к случаю загрузки шины электродинамической нагрузкой (2). Нагрузку, действующую на изолятор в главной плоскости инерции с номером  $j$  при этом сложном нагружении, обозначим через  $R_{jz}(t)$ , максимальное напряжение в материале шины назовем  $\sigma_j(x, t)$ . Относительную силу, действующую на изолятор, когда линия в одной главной плоскости инерции  $j$  действует только одна из составляющих электродинамической нагрузок (2) с номером  $n$ , обозначим через  $R_{jn}^*$ . Для относительных напряжений при этом нагружении используем обозначение  $\sigma_{jn}^*$ .

При известных  $R_{jn}^*$  и  $\sigma_{jn}^*$  суммарные нагрузки на изолятор  $R_{jz}$  и напряжения  $\sigma_j$  можно определять по формулам:

$$R_{jz}(t) = \frac{\alpha l}{a} I_M^* R_{jz}^*(t); \quad \sigma_j(x, t) = \frac{\alpha l^2}{12\alpha W} I_M^* \sigma_j^*(x, t), \quad (15)$$

где относительные нагрузки  $R_{jn}^*$  равны:

$$R_{jn}^* = \sum_{n=1}^6 D_{jn} R_{jn}(t), \quad (16)$$

относительные напряжения  $\sigma_{jn}^*$  в материале шин в поперечном сечении, которые находят применение в (15) при напряжении 110 кВ и выше, определяются следующим образом:

$$\sigma_{jn}^*(x, t) = \sqrt{\sum_{j=1}^2 \left[ \sum_{n=1}^6 D_{jn} \sigma_{jn}^*(x, t) \right]^2}. \quad (17)$$

Особо важны максимальные по модулю значения функций  $R_{jn}^*$  и  $\sigma_{jn}^*$ . Как и в (1) будем называть их динамическими коэффициентами

$$\max |R_{jn}^*(t)| = \eta_{jn}; \quad \max |\sigma_{jn}^*(x, t)| = \eta_{\sigma j}.$$

По изложенной методике на ЦВМ Минск-32 вычислялись относительные нагрузки на изоляторы и относительные напряжения в различных поперечных сечениях параллельных шин, расположенных на расстоянии  $a$  друг от друга (рис. 4). Параметры токопроводов при расчетах варьировались в следующих пределах:  $0 \leq M/ml \leq 7$ ,  $25 \leq c_{оп} l^3/EJ \leq 50$  000,  $0,05 \leq \alpha \leq 0,2$  с,  $1 \leq f_1 \leq 500$  Гц,  $0 \leq \psi \leq 2\pi$  рад. Рассматривались двух- и трехфазные короткие замыкания. При вычислении удерживалось шесть членов ряда (10).

На рис. 3 в качестве примера приведены полученные из решения уравнения (1) относительные нагрузки на изолятор  $R_n(t)$  ( $n=1, 2, \dots, 6$ ) при  $ml=10$ ;  $c_{оп} l^3/EJ=1500$ ,  $T_a=0,05$  с и  $f_1=65$  Гц. В принятых здесь значений параметров графики могут рассматриваться как расчетные. С их помощью при известных константах  $D_n$  можно найти нагрузки на опоры для токопроводов различной конфигурации. Нижняя кривая на рис. 3 показывает нагрузки на изоляторы при двухфазном коротком замыкании. Отличные в этом случае от нуля параметры нагрузки принимались согласно (1) следующими:  $D_1=0,5$ ;  $D_2=10$ ;  $D_3=-20$ ;  $D_5=0,5$ .

Эти параметры нагрузки (2) соответствуют включению  $\psi=0,5\pi$ , при котором электродинамическая нагрузка достигает максимума (индекс  $j$  функций  $R_n(t)$  и констант  $D_n$  опущен, так как в примере рассматриваются колебания в одной главной плоскости инерции). Максимальная нагрузка на изолятор достигалась здесь через 0,031 с момента возникновения короткого замыкания.

Варьируя параметры  $M/ml$ ,  $c_{оп} l^3/EJ$ , а также фазовый угол  $\psi$ , можно изучать влияние их на максимальные нагрузки на изолятор и напряжения в шинах. На рис. 4 для случая, когда  $M/ml=0$ ;  $c_{оп} l^3/EJ=1000$ ;  $T_a=0,05$  с и  $\psi=0,5\pi$  приведены зависимости динамических коэффициентов нагрузки на изолятор и напряжений в материале шины при фазном коротком замыкании от первой соб-

ственной частоты колебаний системы «шина — изоляторы».

Вычисления показали, что в широком диапазоне значений параметров расчет шины, как балки с распределенной массой, близок к расчету шины на основе более простой расчетной модели с одной степенью свободы.

Рассмотрим упругую систему с одной степенью свободы, движение которой в одной из главных плоскостей инерции описывается уравнением

$$m_{пр} \frac{d^2 y_{пр}}{dt^2} + c_{пр} y_{пр} = F_{пр}, \quad (20)$$

где  $m_{пр}$ ,  $y_{пр}$ ,  $c_{пр}$  и  $F_{пр}$  — соответственно приведенная масса, прогиб, жесткость и электродинамическая сила. Решения уравнений (1) и (20) оказываются близкими, если приведенные параметры расчетной схемы с одной степенью свободы определяются из следующих условий:

$$F_{пр} = qI; \quad (21a)$$

$$\frac{1}{c_{пр}} = \frac{1}{c_{оп}} + \frac{1}{c_{пр,ш}}; \quad (21б)$$

$$\dot{I}_{пр} = \dot{I}, \quad (21в)$$

где  $c_{пр,ш} = 384EJ/l^3$  — приведенная жесткость шины, Н/м;  $\dot{I}_{пр}$  — приведенная частота системы, Гц. Условие (21б) требует равенства прогибов шины по середине пролета и смещения  $y_{пр}$  расчетной схемы

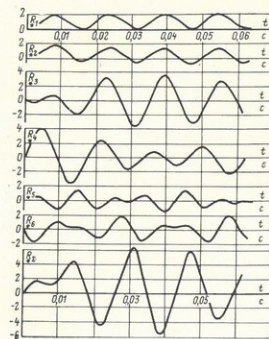


Рис. 3

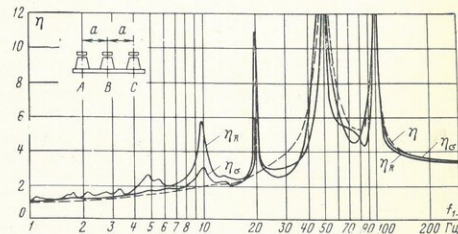


Рис. 4

при воздействии одинаковых по величине статических нагрузок. Условие (21в) требует равенства первой собственной частоты колебаний токопровода  $f_1$  и собственной частоты  $f_{1np}$  расчетной схемы. Эти два условия однозначно фиксируют величину приведенной массы, так как

$$m_{np} = c_{оп} / (2\pi f_{1np})^2.$$

Общее решение уравнения (20) содержится, например, в [Л. 5]. Нагрузки на изоляторы и напряжения в опорных сечениях шин при использовании расчетной схемы с одной степенью свободы определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R(t) &= c_{оп} u_{оп}(t); \\ \sigma(t) &= \frac{M}{W} = \frac{c_{оп} \cdot m \cdot l}{12W} y_m(t), \end{aligned} \right\} (22)$$

где  $M$  — изгибающий момент.

Максимальные нагрузки  $R_{max}$  и напряжения  $\sigma_{max}$  можно представить в виде

$$R_{max} = \frac{a l}{a} I^2 \eta; \quad \sigma_{max} = \frac{a l^2}{12aW} I^2 \eta, \quad (23)$$

где  $\eta$  — динамический коэффициент.

Для вполне определенной электродинамической нагрузки динамический коэффициент  $\eta$  является функцией одной только собственной частоты расчетной схемы  $f_1$ . Для выбранного типа токопровода и фиксированного вида к. з. одним и тем же графиком оказывается возможным пользоваться при любых жесткостях опор и массах изоляторов. Это придает расчетам по формулам (23) значительную универсальность. Необходимые для расчетов значения частот  $f_1$  можно найти по формуле (13).

Одно из решений уравнения (20) при начальных условиях (14) и приведенных параметрах, выбранных согласно (21), сопоставлено с более точным решением уравнения (1) на рис. 4. Результаты сопоставления можно считать удовлетворительными. Заметные расхождения имеют место только в области низких собственных частот колебаний  $f_1$ . Некоторое улучшение совпадения расчетных кривых может быть достигнуто корректировкой условия (21а), т. е. изменением величины приведенной нагрузки.

На рис. 5 представлены кривые динамических коэффициентов  $\eta = f(f_1)$  при трехфазном к. з. для параллельных шин, расположенных в одной плоскости.

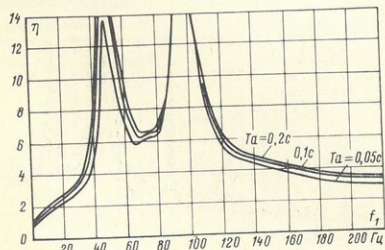


Рис. 5

кости при постоянных времени  $T_a$ , равных 0,05; 0,1 и 0,2 с. Графики  $\eta$  (рис. 5) являются огибающими кривых динамических коэффициентов средней частоты крайних шин.

Приведенные исследования позволяют сделать следующие заключения.

С ростом податливости опор токопровода с ростом массы изоляторов снижаются частоты собственных колебаний системы «шина-изолятор». Резонансные области при этом смещаются и деформируются. Путем варьирования жесткости опор можно, таким образом, воздействовать на режим колебаний, «отстраивать» токопроводы от резонансов.

Области параметров токопроводов, при которых возможны повышенные вибрации, как во время коротких замыканий, так и в рабочем режиме, пользоваться нецелесообразно из-за снижения в этих областях электродинамической стойкости и повышения виброшумовой активности токопроводов. Это оправдывает применение для расчетов уравнений (1) и (20), не учитывающих рассеяние энергии при колебаниях. Учет диссипативных сил замедляет на результаты расчетов лишь в резонансных областях.

Резонансные области, соответствующие высшим формам собственных колебаний, узки, здесь наблюдается отстройка от резонанса. При собственных частотах системы «шина-изолятор» выше 225 Гц значения  $R_{лс}$  и  $\sigma_{лс}$  во всем исследованном диапазоне параметров  $c_{оп}^3/EJ$  и  $M/ml$  при одних и тех же жесткостях опор практически совпадают. Существенные отличия наблюдаются лишь при низких значениях  $f_1$ .

При частоте, большей 200—300 Гц, максимальные напряжения в шинах и нагрузки на изоляторы приблизительно равны напряжениям и нагрузкам, имеющим место при статическом нагружении максимальными электродинамическими силами.

Если изоляторы обладают относительно высокой жесткостью ( $c_{оп}^3/EJ > 15\,000$ — $30\,000$ ), что имеет место в распределительных устройствах напряжением до 35 кВ, расчет можно проводить с учетом податливости опор по методике, изложенной, например, в [Л. 3].

При расположении шин в одной плоскости максимальные нагрузки на изоляторы и напряжения в материале шин оказываются большими у средней фазы, если частота собственных колебаний токопровода больше 50 Гц, и большими у крайней фазы, если частота меньше 50 Гц.

При собственных частотах колебаний токопровода, близких к 50 Гц, динамические коэффициенты быстро растут с увеличением постоянной времени  $T_a$ .

Во всех проделанных расчетах при фазе замыкания, при которой электродинамические нагрузки достигают наибольшей величины, нагрузки на изоляторы и напряжения в шинах достигали значений, близких к максимуму. Отклонения составили более десяти процентов.

**Пример расчета.** Для экспериментальной конструкции токопровода с жесткой ошиновкой напряжением 110 кВ найдем максимальные нагрузки на изолятор и напряжения в материале шин.

Исходные данные. Шины кольцевого сечения расположены в одной плоскости, внешний диаметр шины  $D = 30$  мм, внутренний —  $d = 20$  мм; модуль упругости материала шин  $E = 7 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>; погонная масса шин  $m = 1,06$  кг/м; длина пролета  $l = 7,65$  м; расстояние между осями соседних шин  $a = 1$  м.

Жесткость опор (включая изолятор, болтовые соединения и основание)  $c_{оп} = 1960$  Н/мм; частота собственных колебаний опор  $f_{оп} = 58,9$  Гц. Действующее значение периодической составляющей тока к. з.  $I_a = 7,5$  кА; постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к. з.  $T_a = 0,095$  с.

Решение. В соответствии с выражением (9) определяем приведенную массу изолятора:

$$M = \frac{c_{оп}}{(2\pi f_{оп})^2} = \frac{1960 \cdot 10^3}{(2\pi \cdot 58,9)^2} = 14,33 \text{ кг.}$$

Момент инерции и момент сопротивления поперечного сечения шины кольцевого сечения вычисляем по формулам:

$$J = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} (3^4 - 2^4) 10^{-8} = 3,19 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$W = \frac{\pi}{32} (D^3 - d^3) = \frac{\pi}{32} (3^3 - 2^3) 10^6 = 1,86 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Найдем параметры системы «шина-изолятор»:

$$\frac{M}{ml} = \frac{14,33}{1,06 \cdot 7,65} = 1,77;$$

$$\frac{c_{оп}^3}{EJ} = \frac{1960 \cdot 10^3 \cdot 7,65^3}{7 \cdot 10^4 \cdot 3,19 \cdot 10^{-8}} = 392962,6.$$

По кривым (рис. 2) для данных значений  $M/ml$  и  $c_{оп}^3/EJ$  определяем параметр частоты  $f_1 = 4,73$ . Затем по формуле (13) вычисляем частоту собственных колебаний системы «шина-изолятор»:

$$f_1 = \frac{4,73^2}{2\pi \cdot 7,65^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^4 \cdot 3,19 \cdot 10^{-8}}{1,06}} = 2,79 \text{ Гц.}$$

Воспользуемся упрощенной методикой расчета на основе решения задачи о колебании системы с одной степенью свободы.

Для вычисления значения частоты собственных колебаний и постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока к. з.  $T_a = 0,095$  с по кривым (рис. 5) находим динамический коэффициент трехфазного к. з.  $\eta = 1$ . Максимальную нагрузку на изолятор и напряжение в материале шин вычисляем по формулам (23):

$$R_{max} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 7,65}{1} [V \cdot 2 \cdot 7,5 \cdot 10^3]^2 \cdot 1 = 172,1 \text{ Н;}$$

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 7,65^2}{12 \cdot 1 \cdot 1,86 \cdot 10^{-6}} [V \cdot 2 \cdot 7,5 \cdot 10^3]^2 \cdot 1 = 59 \cdot 10^6 \text{ Па} = 59 \text{ МПа.}$$

Для двухфазного к. з., при котором проводились экспериментальные исследования [Л. 8], динамический коэффициент равен  $\eta = 1,2$ , а расчетное максимальное напряжение в материале шин  $\sigma_{max} = 70,8$  МПа. Экспериментально полученное значение максимального напряжения  $\sigma = 64,5$  МПа. Следовательно, погрешность расчета составляет 9,75%. В то же время погрешность измерения составляла величину  $\pm 10\%$ .

Таким образом, предлагаемый метод расчета достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными (приведенными, например, в [Л. 8]), удобен для инженерных расчетов, может найти применение в проектной практике при расчете электродинамической стойкости токопроводов любых напряжений и не уступает в точности более громоздким расчетам, разработанным за рубежом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций. Ч. 1. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 495 с.
2. Palante G. Study and Conclusions from the Results of the Enquiry on the Thermal and Dynamic Effects of Heavy Short—Circuit Currents in High Voltage Substations. — «Electra» (France), 1970, № 12, p. 51—89.
3. Кудрявцев Е. П., Долин А. П., Васильев А. А. Методика расчета шин и опорных изоляторов распределительных устройств напряжением до 35 кВ на электродинамическую стойкость. — «Промышленная энергетика», 1975, № 11, с. 36—39.
4. Романовский В. Б. Теория колебаний шин и изоляторов под действием электродинамических усилий. — В кн.: Высоковольтное аппаратостроение. ОНТИ НКТП СССР, 1935, с. 207—266.
5. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. Т. 3. М., «Машиностроение», 1968, 567 с.
6. Загорский Е. Н., Стрелюк М. И. Электродинамические силы при произвольном расположении фаз шинпровода. — «Изв. вузов. Энергетика», 1965, № 12, с. 8—16.
7. Кудрявцев Е. П. К методике оценки электродинамической стойкости токопроводов. — «Труды МЭИ», 1975, вып. 274, с. 142—146.
8. Palante G. Behaviour Rigid Conductors and Their Supports under Short—Circuit Conditions Comparison of Calculated and Measured Values. International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Session August 25—September 2, Study Committee № 23 (Substations), 1976, paper 23—10, 11 p.

[27.7.1976]

## Анализ электромагнитных потерь при колебаниях напряжения в сетях промпредприятий

ЖЕЖЕЛЕНКО И. В., ЛИПСКИЙ А. М.

Ждановский металлургический институт

Колебания напряжения вызываются резкопеременными и ударными нагрузками. К ним относятся, в первую очередь, электродуговые сталеплавильные печи и вентиляльные преобразователи обжимных проточных станков, а также установки дуговой и контактной электросварки, в ряде случаев электропечи.

Как известно, к колебаниям напряжения относятся изменения модуля напряжения, происходящие с частотой не менее одного процента номинального напряжения в секунду. Влияние колебаний

напряжения изучено, главным образом, применительно к особенностям зрительного восприятия человека; с этой точки зрения нормируются допустимые колебания напряжения в электрических сетях как в СССР, так и в США и ряде стран Западной Европы.

Указанный принцип нормирования обладает рядом существенных недостатков; отметим некоторые из них. Колебания напряжения отрицательно влияют на работу вычислительных машин, радиоэлектронной аппаратуры, систем автоматики и т. п.

## Р. А. ЛЮТЕР



10 декабря 1976 г. после тяжелой болезни скончался заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственных премий, доктор технических наук, шеф-электрик Ленинградского производственного электромашиностроительного объединения «Электросила» имени С. М. Кирова Роберт Андреевич Лютер.

Р. А. Лютер — один из основоположников советского электромашиностроения, с его именем связаны становление и развитие ЛПЭО «Электросила» — ведущего предприятия по выпуску энергооборудования для многих отраслей промышленности Советского Союза и ряда зарубежных стран.

Еще в 1919 г. Р. А. Лютер впервые в практике отечественного электромашиностроения провел расчеты гидрогенераторов для Волховской ГЭС, в то время крупнейших машин в Европе; эти машины по своим техническим данным оказались лучше генераторов, поставленных крупнейшей зарубежной фирмой.

Электромеханические, тепловые, вентиляционные расчеты многих крупных гидрогенераторов для электростанций, строящихся по плану ГОЭЛРО, велось лично Р. А. Лютером или под его непосредственным руководством. Это во многом способствовало досрочному осуществлению плана ГОЭЛРО и позволило отказаться от импорта энергетического оборудования.

В дальнейшем под руководством Р. А. Лютера были созданы серии турбогенераторов с непосредственным водородно-водяным охлаждением мощностью от 150 до 800 тыс. кВт и выше. Применение новой системы охлаждения машин этой серии позволяло резко под-

нять их мощность в единице без существенного увеличения габаритов и массы. На этих же принципах изготовлен генератор мощностью 1 млн. 200 тыс. кВт.

Большая заслуга принадлежит Р. А. Лютеру в создании первого советского электропривода для бломинов Златоустовского и Криворожского металлургических заводов, а также ряда крупных машин постоянного и переменного тока для различных прокатных станов. «Электросила» стала основным поставщиком электроприводов разных ти-

пов для металлургической, угольной, химической, судостроительной и других отраслей промышленности.

Р. А. Лютер — признанный глава советской теоретической школы крупного электромашиностроения. Литературное наследие Р. А. Лютера сравнительно невелико — оно охватывает немногим более полустолетия статей в отечественных периодических изданиях, но каждая статья в чрезвычайно сжатой и в то же время совершенно законченной форме дает исчерпывающее исследование рассматриваемого вопроса. Большинство нематериальных трудов Р. А. Лютера по справедливости следует считать классическими, не теряющими своей значимости и поныне. Большой интерес представляют его труды по теории чисел.

Научные работы Р. А. Лютера легли в основу методик расчетов электрических машин, принятых не только проектными организациями Советского Союза, но и рядом ведущих фирм зарубежных стран.

Р. А. Лютер явился воспитателем замечательной плеяды крупных ученых — специалистов — электромашинистов, среди которых пользовался безысчислимым авторитетом. Он активно участвовал в работе энергетической общественности, был одним из основателей Научно-технического общества энергетиков, членом ряда ученых и научно-технических советов, научным редактором сборника «Электросила», соавтором и редактором многих теоретических и научных трудов, руководителем и рецензентом диссертаций.

Память о Р. А. Лютере навсегда останется в наших сердцах.

Группа товарищей и учеников

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В. В., Бертинов А. И., Будко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Илатов П. М., Косенко М. В., Ларионов В. П., Лидеренко Н. С., Мамиконян Л. Г., Мучник Г. Ф., Негуша А. В., Петров И. И. (зам. главного редактора), Рабинович С. И., Сажановский О. В., Соколов С. А., Тарев Б. М., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шаталов А. С. (главный редактор), Меревиц Э. А.

Научные редакторы: Б. Н. Евсеев (зав. редакционным отделом), Л. С. Кудинова, А. Б. Желдыбин

Адрес редакции: 103012, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.

101000, Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648

Адрес для телеграмм: Москва, 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Н. Н. Хотулева

Сдано в набор 15/III 1977 г.  
Усл. печ. л. 12,0

Подписано к печати 28/IV 1977 г.  
Тираж 9275 экз.

Т-08280 Формат 60x90/4  
Цена 80 коп. Зак. 100

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлязовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, Москва, М-114, Шлязовая наб., 10.

Веников В. А., Солдаткина Л. А., Плотников Э. А. — Особенности прогнозирования при анализе развития электроэнергетических систем	1
Ирлахман М. Я., Рудаков А. И., Черняков В. И., Шнелль Р. В. — Принципы управления автоматизированной системой проектирования электросетевых объектов	6
Фархадзаде Э. М. — Расчет гарантированных оценок безаварийности энергосистем	10
Кудрявцев Е. П., Долгин А. П. — Методика расчета электродинамической стойкости токопроводов напряжением 110 кВ и выше с учетом податливости опор	15
Жежеленко И. В., Липский А. М. — Анализ электромагнитных потерь при колебаниях напряжения в сетях промпредприятий	19
Околовит М. Н., Шигин А. Г., Федин В. А. — Автоматизированная система проектирования электроустановок собственных нужд блочных КЭС	23
Верещанин И. П., Литвинов В. Е., Васяев В. И. — Сравнение методов расчета электрических характеристик внешней области униполярного коронного разряда для систем с плоскопараллельным полем	27
Аксенов Ю. П., Левитов В. И., Лапин А. Г. — Пробой сжато азота при криогенных температурах	33
Михайлов В. М. — Электромагнитные и тепловые процессы в проводниках при получении сильных импульсных магнитных полей	36
Шакров М. А. — Расчет линейных электрических цепей по частям	41
Попов Д. А. — «Точные» якорные обмотки машин переменного тока	48
Жемчугов Г. А., Погосов А. А. — Полная система дифференциальных уравнений вентиляльного двигателя постоянного тока	55

Усышкин Е. И., Зельдин В. Ш. — Преобразование информации многоцелевого датчика для автоматизированных микроприводов

59

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Вольнов К. Д., Майкопар А. С. — Регистрации токов утечки по гирляндам изоляторов линий 110—220 кВ в районах с промышленными загрязнениями	65
Кокурки Б. П. — Электрическая прочность внешней междуфазной изоляции трансформаторов при воздействии, имитирующем коммутационные перенапряжения	67
Таев И. С., Егоров Е. Г. — Измерение восстанавливающейся прочности в электрических аппаратах	70
Шустерман М. Н. — Частотные характеристики индукторных возбудителей	72

## СООБЩЕНИЯ

Лычкина Г. П. — О моделировании переходных процессов в цепях с иррациональными передаточными функциями	75
Ковфан Д. Б. — Выбор оптимального отношения потерь в трансформаторах малой мощности	77
Багин В. В., Ваков В. Ф., Сотников В. Я., Ушаков В. Я. — Исследование «времени жизни» полиэтиленовой изоляции при воздействии импульсного напряжения	79
Аврушкин В. А., Борисов Р. К., Прохоров Е. Н. — Влияние материала электродов на характеристики сильноточных разрядников	81
Моргунов В. Н. — Характеристики магнитоуправляемых контактов с возбуждением разряда в рабочем зазоре	83

## ХРОНИКА

85

## CONTENTS

Special Aspects of Forecasting in Analysis of the Development of Power Systems — V. A. Venikov, L. A. Soldatkina, E. A. Plotnikov	1
Fundamentals for Operating an Automatized System for Designing Elements in Networks — M. J. Irachman, A. I. Rudakov, V. N. Cherniakov, R. V. Shnell	6
Determining the Guaranteed Estimate for Faultless Operation of Power Systems — E. M. Farhadzade	10
A Method for Calculating the Electrodynamical Withstand Strength of Conductors for 110 kV and Higher With Account Taken of the «Give» in the Towers — E. P. Kudriavtsev, A. P. Dolin	15
Analysis of Electromagnetic Losses for Voltage Fluctuations in Industrial Power Supply Networks — I. V. Djedjitenko, A. M. Lipski	19
An Automatized System for Designing Elements in the Auxiliaries of Unit Connected Condensing Power Stations — M. N. Okolovitch, A. G. Shigin, V. A. Fedin	23
Comparison of Methods for Calculating the Electrical Characteristics of the Outer Region of Unipolar Corona for Systems With a Plane-Parallel Field — I. P. Vereshagin, V. E. Litvinov, V. I. Vasyaev	27
Breakdown in Compressed Nitrogen at Cryogenic Temperatures — U. P. Aksenov, V. I. Levitov, A. G. Liapin	33
Electromagnetic and Thermal Processes in Conductors When Obtaining Strong Magnetic Pulse Fields — V. M. Mikhailov	36
Calculation of Linear Electric Circuits by Parts — M. A. Shakirov	41
«Accurate» Armature Windings for A. C. Machines — D. A. Popov	48
The Complete System of Differential Equations for an Electronic D. C. Motor — G. A. Djemchugov, A. A. Pogosov	55

Conversion of Information From a Multi-purpose Transducer for Automatized Micro-Drives — E. I. Ushshkin, V. S. Zeldin

59

## FROM OPERATING EXPERIENCE

Recording Leakage Currents Over Insulator Strings on 110—220 kV Lines in Industrial Contaminated Atmospheres — K. D. Volpov, A. S. Maikopar	65
The Electrical Withstand Strength of the External Phase-to-Phase Insulation of Transformers for Perturbances Simulating Switching Surges — B. P. Kokurki	67
Measuring the Recovery Withstand Strength in Electrical Apparatus — I. S. Tayev, E. G. Egorov	70
Frequency Characteristics of Inductor Exciters — M. N. Shusterman	72

## REPORTS

On Simulation of Transients in Circuits With Irrational Transfer Functions — G. P. Lichkina	75
Selecting the Optimum Relationship for Losses in Small Transformers — D. B. Kaufman	77
A Study of the «Life» of Polyethylene Insulation Subjected to Pulse Voltages — V. V. Bagin, V. F. Vadjov, V. G. Sotnikov, V. J. Ushakov	79
How the Electrode Material Influences the Characteristics of Power Arresters — V. A. Avruski, R. K. Borisov, E. N. Prokhorov	81
Characteristics of Magnetically Controlled Contacts With a Discharge Stimulated in the Working Gap — V. N. Morgunov	83

## CHRONICLE

85

## СЕБА—ДИНАТРОНИК Д 8601 БАУНАХ ФРГ

Приглашаем посетить нашу экспозицию на выставке ЭЛЕКТРО-77 в Москве 9—23 июня 1977 г.

В состав наших экспонатов входят приборы, служащие для предварительного и точного определения поврежденных мест силовых кабелей и кабелей связи, и оборудование для высоковольтных испытаний.

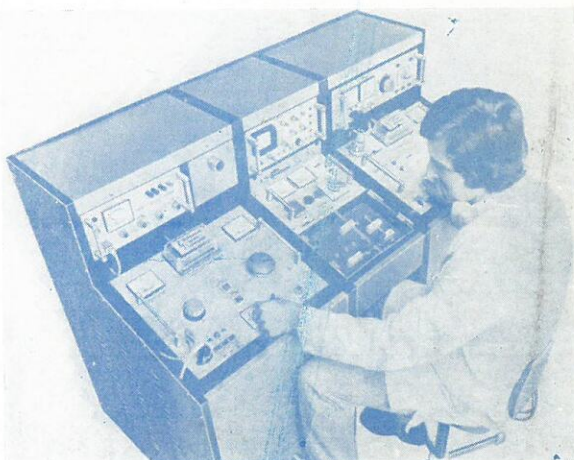
Наша производственная программа: генераторы звуковой частоты, импульсные волновые генераторы, приборы для прожигания мест повреждений кабеля, приборы для предварительного обнаружения дефектов в кабелях (радар) и источники испытательного напряжения до 350 кВ.

Нашим новейшим экспонатом является комплект приборов, вставленных в панели, которые легко монтируются в любом автофургоне.

Среди экспонатов — измерительный автофургон Даймлер — Бенз Л 508 Д, оборудованный источником испытательного напряжения до 140 кВ, который может быть дополнен комплектом элементов, обеспечивающих испытательное напряжение 260 или 350 кВ (два подобных измерительных автофургона с успехом работают в Мосэнерго).

Информация о приборах и установках содержится в проспектах на русском языке. Более подробную информацию можно получить у наших специалистов.

Местонахождение нашей экспозиции — перед главным входом в павильон ФРГ.



**seba dynatronik**

СЕБА — ДИНАТРОНИК  
Д 8601 БАУНАХ ФРГ

Приобретение товаров у иностранных фирм осуществляется организациями и предприятиями в установленном порядке через МИНИСТЕРСТВА и ВЕДОМСТВА, в ведении которых они находятся.

Запросы на проспекты и каталоги следует направлять по адресу: 103074, Москва, пл. Ногина, 2/5. Отдел промышленных каталогов Государственной публичной научно-технической библиотеки СССР.

Ссылайтесь на № 3707—610 117/114

В.О «Внешторгреклама»