

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОПОЛОСНЫХ ШИНОПРОВОДОВ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Инженеры ГЕРАСИМОВИЧ Д. А., НОСАЙРАТ ФАИЗ

*Белорусская государственная политехническая академия*

Определение динамической и термической стойкости шинных конструкций связано с расчетом распределения в них параметров электромагнитного поля в переходных режимах. В многополосных шинопроводах распределение параметров поля определяется как явлением поверхностного эффекта переходного режима, так и эффектом близости, вызывающим перераспределение тока по сечению полос вследствие влияния магнитного поля проводников пакета. Данная работа является продолжением исследований, начатых в [1, 2], и посвящена разработке метода расчета электромагнитных характеристик многополосных шинопроводов в переходных режимах. Здесь рассматриваются случаи наиболее часто применяемых на практике пакетов, составленных из двух, четырех (полюй пакет) и трех прямоугольных шин (рис. 1). Дифференциальное уравнение переходного режима относительно проекций любого из векторов электромагнитного поля, например плотности тока  $\sigma_{lx}(y, z, t)$ , в каждой  $l$ -й полосе шинопровода имеет вид [2]

$$\frac{\partial^2 \sigma_{lx}(y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{lx}(y, z, t)}{\partial z^2} = \gamma \mu \frac{\partial \sigma_{lx}(y, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельная проводимость материала проводников, принимаемая постоянной во времени [2];

$\mu$  — магнитная проницаемость материала проводников;

$l = 1, 2, \dots, m$  — номер полосы (рис. 1) ( $m$  — число полос в шинопровode).

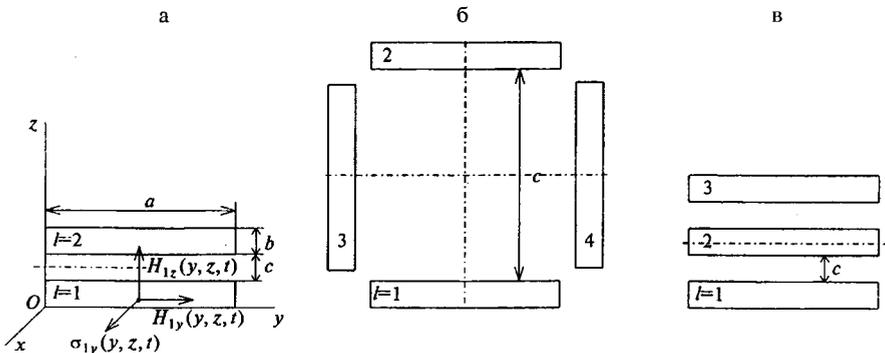


Рис. 1

Уравнение (1) справедливо также для проекций вектора напряженности магнитного поля в каждой полосе  $H_{ly}(y, z, t)$  и  $H_{lz}(y, z, t)$  [2].

Решение (1) применительно к рассматриваемым параметрам электромагнитного поля представляется как сумма решений для вынужденного и свободного режимов [2]:

$$H_{ly}(y, z, t) = H_{ly\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t) + H_{ly\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t); H_{lz}(y, z, t) = H_{ly\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t) + H_{lz\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t);$$

$$\sigma_{lx}(y, z, t) = \sigma_{lx\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t) + \sigma_{lx\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t), \quad (2)$$

где  $H_{ly\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$ ,  $H_{lz\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$  и  $\sigma_{lx\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$  – распределения проекций векторов напряженности магнитного поля и плотности тока вынужденного режима в  $l$ -й полосе;

$H_{ly\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t)$ ,  $H_{lz\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t)$  и  $\sigma_{lx\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t)$  – распределения проекций векторов напряженности магнитного поля и плотности тока свободного режима в  $l$ -й полосе.

В [2] получены вынужденные решения (1) для проводника прямоугольного сечения при заданном в нем токе переходного режима  $i_{\Sigma}(t)$ . Для многополосных шинпроводов известен ток переходного режима, протекающий по всему пакету. Он в общем случае определяется выражением [2]

$$i_{\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^n I_{mj} e^{-t/T_j} \sin(\omega_j t + \varphi_{0j}), \quad (3)$$

где  $I_{mj}$ ,  $T_j$ ,  $\omega_j$ ,  $\varphi_{0j}$  – известные амплитуда, постоянная времени затухания, частота и начальная фаза  $j$ -й составляющей тока переходного режима;

$n$  – число составляющих в токе переходного режима.

Для того чтобы использовать результаты [2] в расчетах параметров вынужденного режима многополосных шинпроводов, необходимо знать токи переходного режима в полосах пакета. Распределение каждой составляющей тока (3) между полосами в общем случае неизвестно и зависит от конструкции шинпровода, его геометрических размеров и электромагнитных свойств проводников пакета.

В двухполосном и полом пакетах (рис. 1а, б) проводники находятся в симметричных условиях, и ток переходного режима разделяется между ними одинаково, т. е.

$$i_{l\Sigma}(t) = \frac{1}{m} i_{\Sigma}(t), \quad (4)$$

где  $i_{l\Sigma}(t)$  – ток в  $l$ -й полосе пакета ( $l = 1, 2$  для двухполосного и  $l = 1, 2, 3, 4$  для полого пакетов).

Распределение переходного тока между полосами также легко найти при противоположном направлении токов между полосами двухполосного пакета (однофазный шинпровод). В этом случае  $i_{1\Sigma}(t) = -i_{2\Sigma}(t) = i_{\Sigma}(t)$ .

В трехполосных пакетах крайние и средняя полосы находятся в несимметричных условиях, что приводит к неравномерному распределе-

нию токов между ними. Величины токов переходного режима в каждой полосе неизвестны, и их необходимо определить по известному полному току пакета  $i_{\Sigma}(t)$ .

В токе (3) можно выделить вынужденные токи цепи переходного режима, вызванные ЭДС цепи (сверхпереходный, переходный и установившийся токи короткого замыкания), и свободную составляющую тока (апериодический ток). Величины вынужденных токов в полосах определяются распределением электромагнитного поля в установившихся (вынужденных) режимах, вызванных этими токами, а величины свободного тока – условием непрерывности тока каждой полосы во времени в момент нарушения режима. Присвоим свободному току индекс  $j = n$ , т. е. этот ток становится последним слагаемым в (3). Тогда для каждого вынужденного тока переходного режима в полосах и в пакете можно записать:

$$i_{lj}(t) = I_{mlj} e^{-t/T_j} \sin(\omega_j t + \varphi_{0lj}), \quad l = 1, 2, 3; \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^3 i_{lj}(t) = I_{mj} e^{-t/T_j} \sin(\omega_j t + \varphi_{0j}),$$

где  $j = 1, 2, \dots, n - 1$ ;

$i_{lj}(t)$  – величина  $j$ -й составляющей тока переходного режима в  $l$ -й полосе пакета;

$I_{mlj}$  и  $\varphi_{0lj}$  – амплитуда и фаза  $j$ -й составляющей тока переходного режима в  $l$ -й полосе, подлежащие определению.

Для нахождения величин  $I_{mlj}$  и  $\varphi_{0lj}$  ( $j = 1, 2, \dots, n - 1$ ;  $l = 1, 2, 3$ ) используем метод расчета установившихся режимов многополосных шиннопроводов, разработанный в [3]. При его применении шиннопровод рассматривается как многослойная среда, что позволяет определять комплексные амплитуды токов в каждой из полос трехполосного шиннопровода, а следовательно, амплитуды  $I_{mlj}$  и фазы  $\varphi_{0lj}$ . В полном токе переходного режима вынужденные токи его цепи могут быть как синусоидальными, так и колебательными затухающими. В последнем случае должны учитываться особенности комплексного представления колебательного затухающего тока [1].

После того как найдены амплитуды и фазы вынужденных токов переходного режима в полосах можно найти начальные значения свободного тока. Они определяются из условия непрерывности токов полос во времени (для  $t = 0$ )

$$i_{l\Sigma}(0) = i_{l0}(0), \quad l = 1, 2, 3, \quad (6)$$

где  $i_{l0}(0) = I_{ml0} \sin(\varphi_{0l0})$  – величина тока предшествующего режима в нулевой момент времени (величины амплитуды  $I_{ml0}$  и фазы  $\varphi_{0l0}$  тока предшествующего режима определяются на основе результатов [3], как и для рассмотренных выше вынужденных токов переходного режима).

Подставив (3) в (6) и учитывая (5), получим выражение для расчета начальных значений свободного тока в полосах

$$I_{mln} = I_{m10} \sin(\varphi_{010}) - \sum_{j=1}^{n-1} I_{mj} \sin(\varphi_{0lj}), \quad l = 1, 2, 3, \quad (7)$$

а изменение свободного аperiodического тока во времени будет

$$i_{ln}(t) = I_{mln} e^{-t/T_n} \sin(\omega_n t + \varphi_{0ln}), \quad l = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где

$$\omega_n = 0; \quad \varphi_{0ln} = \pi / 2 \quad [1].$$

Одним из наиболее простых случаев переходного режима является внезапное короткое замыкание в простейшей цепи переменного тока. В этом режиме вынужденные токи (5) содержат только одну составляющую (периодический ток). Определение начальных значений свободного аperiodического тока в полосах трехполосного пакета в данном случае иллюстрируется диаграммой, приведенной на рис. 2. Величины токов предшествующего режима в нулевой момент времени, согласно (7), составляют  $I_{m10} \sin(\varphi_{010})$ . Периодические токи короткого замыкания в каждой полосе отстают от аналогичных токов предшествующего режима

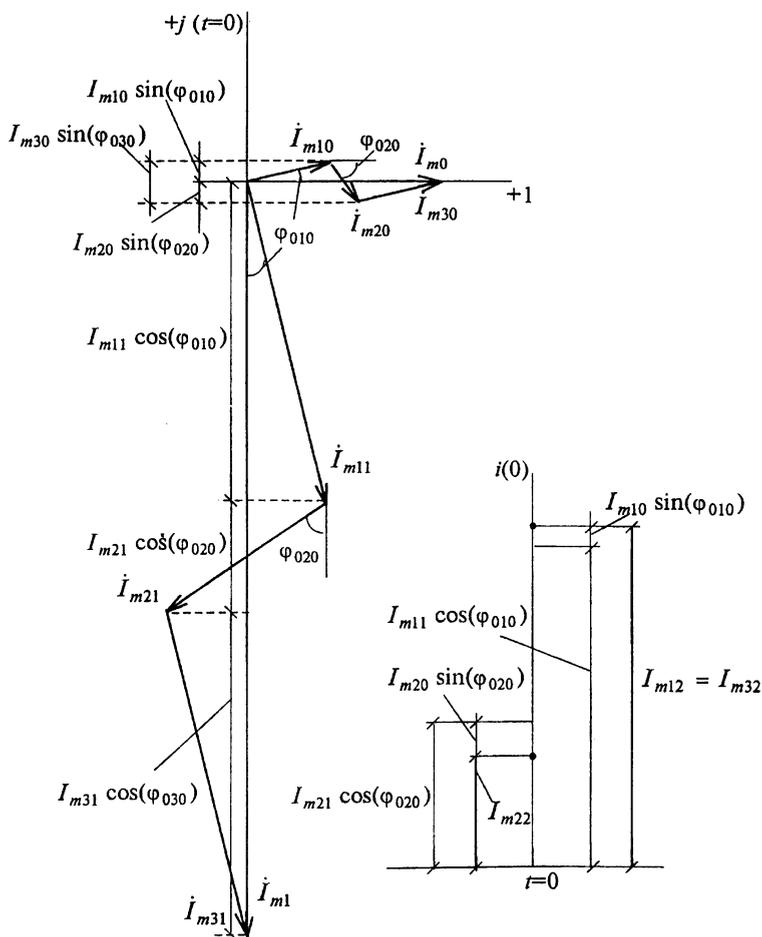


Рис. 2. Векторная диаграмма периодических токов трехполосного шинпровода для определения начальных значений аperiodического тока в полосах

на угол  $\pi/2$  и их начальные значения составляют  $-I_{m1} \cos(\varphi_{010})$ . С учетом отмеченного (7) принимает вид

$$I_{m12} = I_{m10} \sin(\varphi_{010}) - I_{m11} \sin(\varphi_{011}) = I_{m10} \sin(\varphi_{010}) + I_{m11} \cos(\varphi_{010}),$$

где

$$\varphi_{011} = \varphi_{010} - \pi/2.$$

Известные величины составляющих тока переходного режима в каждой полосе, определяемые по (4) для двухполосного и полого и по (5), (8) для трехполосного пакетов, позволяют рассчитать вынужденные параметры поля  $H_{y\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$ ,  $H_{xz\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$  и  $\sigma_{xz\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$  на основе выражений, полученных в [2]. Граничные условия находятся итерационным методом и при их расчете для каждой полосы необходимо учитывать влияние остальных полос многополосного шинпровода [3]. Расчет свободных составляющих производится по распределениям вынужденных составляющих в нулевой момент времени и полностью совпадает с расчетом свободного режима уединенной полосы [2]. Таким образом, после нахождения величины и закона изменения во времени тока переходного режима в каждой полосе расчет параметров электромагнитного поля многополосных шинпроводов становится аналогичным расчету переходного режима в уединенной прямоугольной шине.

В дальнейшем на основе расчета распределения параметров электромагнитного поля в переходном режиме можно перейти к исследованию других явлений в пакетных шинпроводах. Ограничимся исследованием некоторых характеристик многополосных шинпроводов для случая внезапного короткого замыкания в простейшей цепи переменного тока. Ток пакета в переходном режиме в относительных единицах, как и в [2], принят равным  $i_{\Sigma^*}(t) = \sin(\omega t - \pi/2) + e^{-t/T}$ ,  $T = 0,045$  с (рис. 3а). Амплитуда тока предшествующего режима равна 0,2 о. е. В расчетах использованы пакеты из алюминиевых полос размерами  $a \times b = 100 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Интегральные характеристики поля (действующие значения мощности потерь  $P_{Д^*}$  в относительных единицах и коэффициент добавочных потерь переходного режима  $K_{Д}$ ) двухполосного и полого пакетов приведены на рис. 3б, в. Как следует из рис. 3, наименьшая величина мощности потерь и, следовательно, коэффициента добавочных потерь присуща двухполосному пакету с противоположным направлением токов в полосах (кривые 3), а наибольшая — двухполосному пакету с одинаковым направлением токов в полосах (кривые 1). Характеристики полого пакета (кривые 2) практически совпадают с аналогичными характеристиками уединенной полосы [2]. Кривые мощности потерь рассматриваемых шинпроводов (кривые 1–3 рис. 3б) лежат выше кривых мощности потерь при равномерном распределении плотности тока (кривая 4 рис. 3б). Увеличение мощности потерь вызвано неравномерным распределением плотности тока, причем чем значительнее выражено неравномерное распределение плотности тока, тем выше расположена кривая мощности потерь. Следует также отметить изменение  $K_{Д}$  в переходном режиме. Его величина на этом временном интервале не-

сколькo меньше значения установившегося режима. Последнее, как и для уединенной полосы, вызвано наличием аperiodической составляющей в токе переходного режима и обусловленного ею явления «обратного» скин-эффекта.

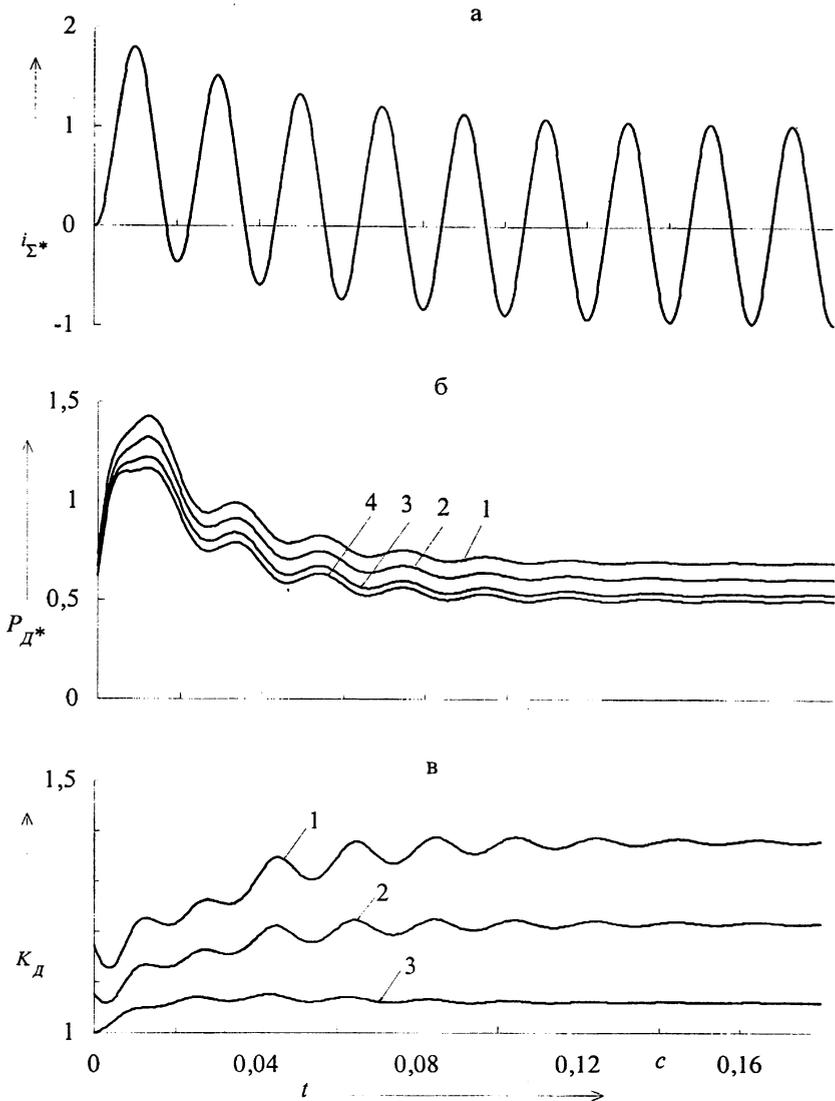


Рис. 3. Электромагнитные характеристики многополосных шинопроводов при коротком замыкании в простейшей цепи переменного тока: 1, 3 — двухполосных пакетов с одинаковым и противоположным направлениями токов полос ( $c = b = 10$  мм); 2 — полого пакета ( $c = 154$  мм); 4 — при равномерном распределении плотности тока

Для трехполосного пакета результаты исследования характеристик полос и пакета приведены на рис. 4. Токи в крайних полосах (кривая 1 рис. 4а) больше тока в средней полосе (кривая 2 рис. 4а), и по результатам расчетов они составили:  $i_{1\Sigma^*}(t) = i_{3\Sigma^*}(t) = 0,37\sin(\omega t - 0,456\pi) + 0,377e^{-t/T}$  (крайние полосы);  $i_{2\Sigma^*}(t) = 0,286\sin(\omega t - 0,616\pi) + 0,247e^{-t/T}$  (средняя полоса). Наличие фазовых сдвигов между периодическими составляющими токов полос приводит к тому, что токи переходного режима в пакете и в

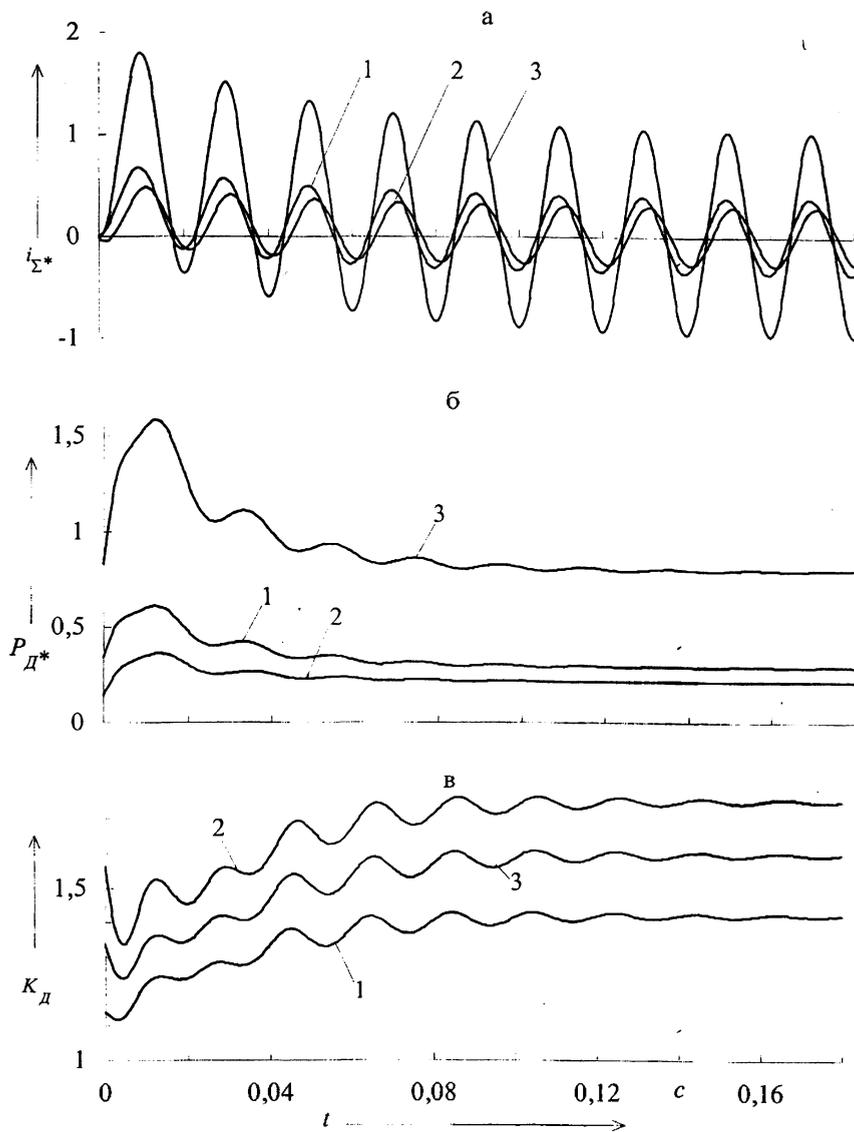


Рис. 4. Электромагнитные характеристики трехполосного пакета при коротком замыкании в простейшей цепи переменного тока: 1 — крайних полос; 2 — средней полосы; 3 — всего пакета ( $c = b = 10$  мм)

отдельных полосах достигают наибольших мгновенных значений в разные моменты времени. Если в пакете ударный ток наступает через  $t = 0,01$  с и составляет 1,8 о. е., то в крайних полосах ток достигает максимального значения при  $t = 0,0095$  с и составляет 0,67 о. е., а в средней полосе — при  $t = 0,011$  с и составляет 0,48 о. е. В средней полосе действующие значения мощности потерь (кривая 2 рис. 4б) меньше, чем в крайних, а коэффициент добавочных потерь наоборот больше. Для пакета (кривая 3 рис. 4в) он принимает некоторые промежуточные значения между коэффициентами добавочных потерь средней и крайних полос.

## ВЫВОДЫ

1. Метод расчета параметров электромагнитного поля переходного режима проводника уединенного прямоугольного сечения распространен на случай многополосных шинопроводов.

2. Исследования характеристик поля многополосных шинопроводов при коротких замыканиях показали, что они сопровождаются неравномерным распределением плотности тока в полосах пакета и снижением величины коэффициента добавочных потерь в переходном режиме. Отмеченные особенности вызывают необходимость обоснования допущений (равномерное распределение плотности тока и постоянство коэффициента добавочных потерь во времени), принимаемых при расчете динамической и термической стойкости многополосных шинопроводов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович Д. А., Носайрат Фаиз, Мелешко И. Н. Токораспределение в шине прямоугольного сечения при затухающем законе изменения силы тока // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 1. – С. 27–35.

2. Герасимович Д. А., Носайрат Фаиз. Электромагнитные характеристики шины прямоугольного профиля в переходных режимах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 2. – С. 15–24.

3. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А. Расчет токораспределения в многополосных шинопроводах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1997. – № 1–2. – С. 25–32.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 10.03.2000

УДК 621.311

## ВЫБОР ЗАМЕЩАЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ НЕДОСТОВЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АНАЛОГОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Докт. техн. наук АНИЩЕНКО В. А., инж. ГОРОШ А. В.

*Белорусская государственная политехническая академия*

**Постановка задачи.** Для автоматического бесперебойного обеспечения достоверной информацией о состоянии электро- и теплоэнергетических объектов необходимо в темпе контроля и управления технологическими процессами программно выбирать замещающие значения аналоговых переменных (электрических токов, напряжений, мощностей, температур, давлений, расходов пара, газа, воды), измеренных с большими, выходящими за допустимые пределы, погрешностями.

Показателем качества замещения недостоверного результата измерения является рассогласование замещающего значения  $x_{\text{зам}}(t)$  и неизвестного истинного значения контролируемой переменной  $x(t)$