

УДК 621.3.014.32:066.06

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В МНОГОПОЛОСНЫХ ШИНОПРОВОДАХ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Докт. техн. наук, проф. ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.,  
инженеры ГЕРАСИМОВИЧ Д. А., НОСАЙРАТ ФАИЗ

*Белорусская государственная политехническая академия*

Существующие методы определения электродинамических усилий в большинстве случаев основаны на весьма упрощенных представлениях о распределении электромагнитного поля в сечении проводников. Так, определение силовых взаимодействий сводят к нахождению сил между линейными проводниками или принимают допущение о равномерном распределении плотности тока, что приемлемо при малых сечениях проводников. Однако при больших размерах сечений неравномерное распределение электромагнитного поля в проводниках носит достаточно выраженный характер [1]. Поэтому для надежной оценки электродинамической стойкости необходимо определение результирующих и распределенных электромагнитных сил, соответствующих реальным законам изменения токов во времени, геометрии шинпровода, его электромагнитным свойствам и т. п., т. е. необходим учет явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в переходных режимах. Эта задача может быть решена на основе расчета распределения параметров электромагнитного поля переходного режима в сечении многополосных шинпроводов, рассмотренного в [1, 2].

**Расчетные соотношения для определения электродинамических усилий от взаимодействия токов полюсов в пакетных шинпроводах.** Результирующие усилия, действующие на единицу длины каждой полосы пакета, для протяженного в направлении оси  $Ox$  (рис. 1) шинпровода определяются интегрированием плотности электромагнитных сил по сечению исследуемой полосы. В рассматриваемых шинпроводах при принятой системе координат плотность электромагнитных сил имеет две составляющие  $f_y$  и  $f_z$ . Выражения для их расчета в сечении  $l$ -й полосы имеют вид:

$$f_{ly}(y, z, t) = -\sigma_{lx}(y, z, t)B_{lz}(y, z, t) = -\mu\sigma_{lx}(y, z, t)H_{lz}(y, z, t); \quad (1)$$

$$f_{lz}(y, z, t) = \sigma_{lx}(y, z, t)B_{ly}(y, z, t) = \mu\sigma_{lx}(y, z, t)H_{ly}(y, z, t), \quad l = 1, \dots, n,$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость материала проводников;

$n = 2, 3, 4$  — для двухполосного (рис. 1а), трехполосного (рис. 1в) и полого (рис. 1б) пакетов соответственно;

$\sigma_{lx}(y, z, t)$ ,  $B_{ly}(y, z, t)$ ,  $B_{lz}(y, z, t)$ ,  $H_{ly}(y, z, t)$ ,  $H_{lz}(y, z, t)$  — мгновенные значения проекций векторов плотности тока, индукции и напряженности магнитного поля в сечении  $l$ -й полосы соответственно, которые при известном полном токе переходного режима в пакете  $i_{\Sigma}(t)$  находятся рассмотренным в [1, 2] методом и в дальнейшем считаются известными.

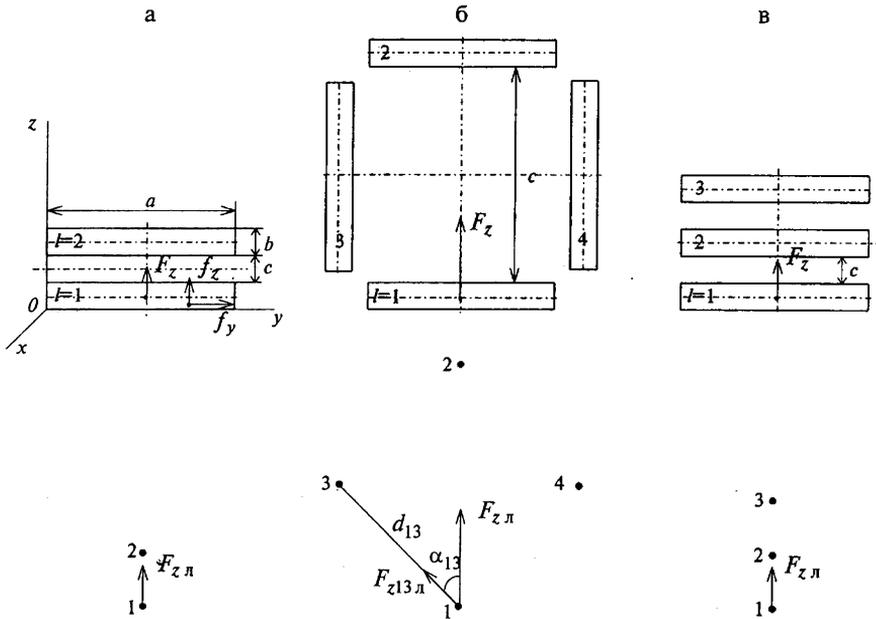


Рис. 1. Многополосные шинопроводы и их замена линейными проводниками с током

Вектор результирующего усилия, в соответствии с (1), также имеет две проекции  $F_{ly}$  и  $F_{lz}$ . Их величины в любой момент времени переходного режима будут:

$$F_{ly}(t) = \int_{D_l} f_{ly}(y, z, t) ds = -\mu \int_{D_l} \sigma_{lx}(y, z, t) H_{lz}(y, z, t) ds, \quad ds = dydz; \quad (а)$$

(2)

$$F_{lz}(t) = \int_{D_l} f_{lz}(y, z, t) ds = \mu \int_{D_l} \sigma_{lx}(y, z, t) H_{ly}(y, z, t) ds, \quad ds = dydz, \quad (б)$$

где  $D_l (y \in [0, a], z \in [0, b])$  — область сечения  $l$ -й полосы.

В силу симметрии рассматриваемых шинопроводов (рис. 1) для каждого из них следуют равенства:  $F_{1y} = F_{2y} = 0$ ,  $F_{1z} = -F_{2z}$  (двухполосный пакет);  $F_{1y} = F_{2y} = F_{3y} = 0$ ,  $F_{1z} = -F_{3z}$ ,  $F_{2z} = 0$  (трехполосный);  $F_{1y} = F_{2y} = F_{3z} = F_{4z} = 0$ ,  $F_{1z} = -F_{2z} = F_{3y} = -F_{4y}$  (полый). Из приведенных

равенств следует, что на каждую полосу действует только одна составляющая результирующих усилий и для ее определения достаточно рассмотрения проекции  $F_{1z}$ . В дальнейшем индекс номера полосы опускается ( $F_z(t) = F_{1z}(t)$ ).

Усилие  $F_z(t)$  можно рассматривать как распределенное вдоль широких граней полос (размер  $a$ ). Линейная плотность его распределения будет

$$\varphi_z(y, t) = \int_0^b f_{1z}(y, z, t) dz = \mu \int_0^b \sigma_{1x}(y, z, t) H_{1y}(y, z, t) dz, \quad y \in [0, a]. \quad (3)$$

Выражения (2б) и (3) позволяют определять мгновенные значения результирующих электродинамических усилий и их линейную плотность распределения вдоль широких граней полос с учетом реального электромагнитного состояния проводников в переходном режиме.

В допущении равномерного распределения плотности тока электродинамические усилия можно найти на основе (2б). Для этого необходимо выразить проекцию вектора напряженности магнитного поля  $H_{1y}(y, z, t)$  через плотности тока соседних полос. Тогда выражение для расчета усилий принимает вид

$$F_z(t) = \frac{\mu i_{\Sigma}^2(t)}{2\pi n^2 a^2 b^2} \int \left( \sum_{l=2}^n \int_{D_l} \frac{z_0 - z}{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} ds_0 \right) ds, \quad (4)$$

где  $y_0, z_0$  — координаты точек сечения полос, определяемые по отношению к локальной системе координат 1-й полосы.

Аналогичным образом из (3) можно получить выражение, определяющее линейную плотность результирующего усилия в случае равномерного токораспределения.

При получении (4) токи в полосах  $i_{\Sigma}(t)$  приняты равными для каждого из рассматриваемых шинпроводов ( $i_{\Sigma}(t) = i_{\Sigma}(t)/n$ ). Для трехполосных пакетов ток переходного режима распределяется между полосами неравномерно [1]. Однако при упрощенных расчетах усилий токи полос также принимают равными, так как их определение является достаточно сложной задачей.

В многополосных шинпроводах влияние размеров сечения и распределение электромагнитного поля в переходных режимах на величину электродинамических усилий принято учитывать с помощью коэффициента формы  $k_{\phi}$ . Он определяется как отношение реальных усилий к усилиям, полученным при замене полос линейными проводниками с током, расположенными на пересечении осей симметрии каждой из полос (рис. 1). Электродинамические усилия от взаимодействия линейных проводников для рассматриваемых случаев находятся по следующей формуле:

$$F_{zn}(t) = \frac{\mu_{\Sigma}^2(t)}{2\pi n^2} \sum_{l=2}^n \frac{\cos \alpha_{ll}}{d_{ll}}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{ll}$  — угол между векторами результирующего усилия и усилия от взаимодействия 1-го и  $l$ -го линейных проводников (рис. 1);

$d_{ll}$  — расстояние между 1-м и  $l$ -м линейными проводниками (рис. 1).

Коэффициент формы определяется отношением

$$k_{\phi} = F_z(t) / F_{zn}(t). \quad (6)$$

При равномерном распределении плотности тока выражение для определения  $k_{\phi}$  получается при подстановке (4) и (5) в (6). Он зависит в этом случае только от геометрии шинпровода. Коэффициент формы, определяемый с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в переходном режиме, находится при подстановке (26) и (5) в (6) и зависит не только от геометрии шинпровода, но и от электромагнитных свойств материала полос, величины и характера токов переходного режима, а также от распределения поля в начальный момент времени. При этом  $k_{\phi}$  становится функцией времени, и его поведение в переходном режиме обусловлено перечисленными выше факторами.

Сравнение усилий, рассчитанных по (26), (3) и (4), и соответствующих им коэффициентов формы, т. е. с учетом и без учета явлений поверхностного эффекта и эффекта близости, позволяет оценить влияние распределения электромагнитного поля в переходном режиме на величины линейной плотности и результирующих сил взаимодействия между полосами пакетных шинпроводов.

**Электродинамические усилия в двухполосных пакетах.** Расчеты коэффициента формы, результирующих электродинамических усилий и их линейной плотности распределения выполнены на основе программ расчета электромагнитного поля переходного режима в многополосных шинпроводах [1]. Для этого они были дополнены блоками расчета усилий, осуществляющими численное интегрирование (26) и (3).

В соответствии с [3] оценку динамической стойкости шинных конструкций следует производить при ударном значении тока трехфазного короткого замыкания. Ток переходного режима при промышленной частоте в этом случае, как и в [2], в относительных единицах имеет вид:  $i_{\Sigma^*}(t) = \sin(\omega t - \pi / 2) + e^{-t/T}$ . Величина постоянной времени затухания  $T$  при исследовании усилий принята 0,045 с, что соответствует ударному коэффициенту 1,8, а амплитуда тока предшествующего режима — равной 0,2 о. е.

Исследования усилий в двухполосных пакетах проведены при одинаковых и противоположных направлениях токов в полосах. Поведение результирующих усилий в переходном режиме при принятом выше токе показано на примере пакетов, составленных из алюминиевых шин с размерами сечения  $100 \times 10 \text{ мм}^2$ . На рис. 2 для данных пакетов представлены зависимости мгновенных значений результирующих усилий и коэффициента формы при расположении полос широкими (рис. 2а) и узкими (рис. 2б) гра-

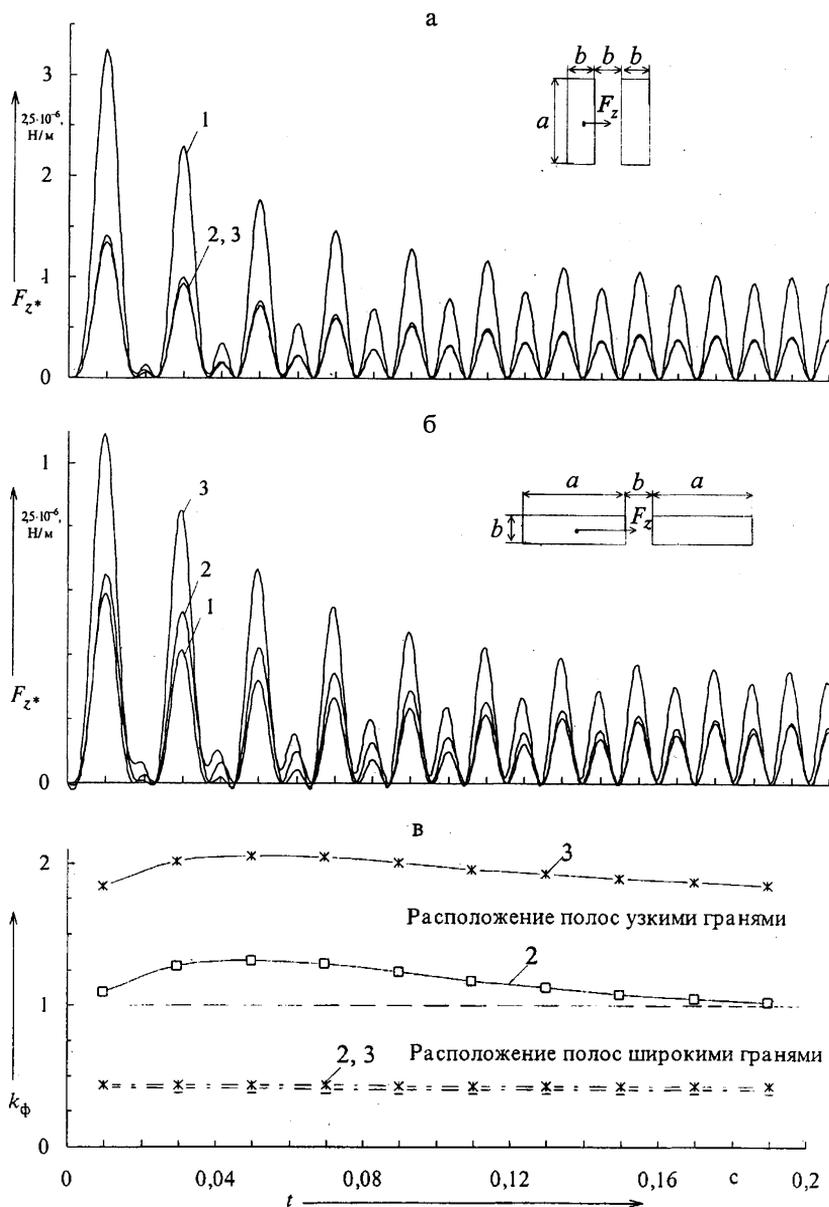


Рис. 2. Изменение мгновенных значений усилий и коэффициента формы в переходном режиме двухполосного пакета с расположением шин широкими (а) и узкими (б) гранями: 1 — замена полос линейными токами; 2, 3 — с учетом реального распределения поля при одинаковых и противоположных направлениях токов в полосах соответственно

ниями друг к другу и межполосном расстоянии, равном толщине полосы ( $c = 10$  мм). Относительные значения электродинамических усилий  $F_{z*}$  получены при амплитуде периодической составляющей тока переходного режима пакета, равной единице. Кривые 1 соответствуют усилиям, полученным при замене полос линейными проводниками, 2, 3 — усилиям, учитывающим реальное распределение электромагнитного поля в переходном

режиме, при одинаковых и противоположных направлениях токов в полосах соответственно. В случае расположения полос широкими гранями друг к другу амплитуды усилий, полученные с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в переходном режиме, значительно меньше аналогичных амплитуд, рассчитанных при замене полос линейными проводниками (коэффициент формы меньше единицы). Различия в усилиях при одинаковых и противоположных направлениях токов незначительны (с той разницей, что при одинаковых направлениях токов полосы притягиваются, а при противоположных — отталкиваются). Зависимости коэффициента формы во времени (рис. 2в) построены для главных максимумов мгновенных значений результирующих усилий в переходном режиме, т. е. для  $t = 0,01$  с;  $t = 0,03$  с;  $t = 0,05$  с и т. д. Как следует из рис. 2в, при расположении полос широкими гранями  $k_{\phi}$  во времени изменяется незначительно. Для одинаковых направлений токов полос его значение при ударном значении тока ( $t = 0,01$  с) составляет 0,416, а для противоположных — 0,437. Для рассматриваемого пакета коэффициент формы, рассчитанный в допущении равномерного распределения плотности тока, равен 0,421 [4], т. е. влияние распределения параметров поля на величину результирующих усилий в данном случае незначительно.

При принятом расположении проводников и их размерах плотности тока в переходном режиме распределены практически равномерно вдоль толщины (размер  $b$ ) полос, т. е. в направлении действия усилия. В направлении широкой грани распределение плотности тока, наоборот, существенно неравномерно. Поэтому распределение линейной плотности усилий вдоль этой грани значительно отличается от аналогичного распределения, полученного в допущении равномерной плотности тока, что иллюстрирует рис. 3, на котором приведены распределения относительных значений линейной плотности результирующего усилия  $\varphi_{z^*}$  при ударном значении

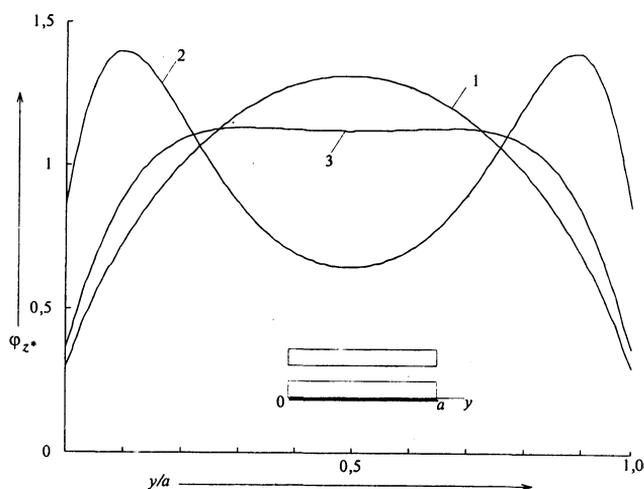


Рис. 3. Распределение линейной плотности усилий вдоль широких граней полос двухполосного пакета: 1 — при равномерном токораспределении; 2, 3 — с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в переходном режиме при одинаковых и противоположных направлениях токов в полосах соответственно

тока короткого замыкания. При равномерном токораспределении максимум линейной плотности усилия приходится на середину грани (кривая 1). Линейные плотности усилий, рассчитанные с учетом реального распределения параметров поля, распределены аналогично плотности тока в направлении широкой грани. При одинаковых направлениях токов полос линейная плотность усилий имеет два максимума вблизи углов полос (кривая 2), а при противоположных направлениях токов ее распределение носит наиболее равномерный характер (кривая 3).

При расположении шин узкими гранями друг к другу (рис. 2б) усилия действуют в направлении широких граней полос. Амплитудные значения результирующих усилий, рассчитанные с учетом реального распределения параметров поля, в этом случае больше, чем при замене полос линейными проводниками ( $k_{\phi}$  больше единицы). В предположении равномерного распределения плотности тока коэффициент формы составляет 1,222. Коэффициент формы, полученный с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости, значительно изменяется в переходном режиме, и его значения в момент времени  $t = 0,01$  с равны 1,101 — при одинаковых направлениях токов полос и 1,837 — при противоположных. Значительные различия в  $k_{\phi}$  для исследуемого шинпровода обусловлены неравномерным распределением плотности тока по сечению полос в направлении действия результирующего усилия. Причем, при одинаковых направлениях токов их плотности вытесняются во внешние области пакета, что приводит как бы к «увеличению расстояния между токами» и уменьшению усилий и коэффициента формы по сравнению с усилиями и  $k_{\phi}$ , рассчитанными в допущении равномерного токораспределения. При противоположных направлениях токов плотности вытеснены, наоборот, во внутренние области сечения, и коэффициент формы увеличивается.

Рассмотренные примеры показывают, что характер распределения электромагнитного поля в направлении действия результирующего усилия влияет на величину коэффициента формы. В практических расчетах силового взаимодействия полос используется коэффициент формы, определенный в допущении равномерного распределения плотности тока. Для двухполосных пакетов однозначно определены и построены зависимости  $k_{\phi}$  от межполосного расстояния, приведенного к полупериметру полос ( $c/(a+b)$ ), для различных отношений размеров граней ( $b/a$ ) [4]. Аналогичные зависимости, рассчитанные с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в переходном режиме, представлены на рис. 4. В этом случае коэффициент формы неоднозначно определяется только соотношениями  $c/(a+b)$  и  $b/a$ . Кривые на рис. 4 получены при принятом ранее токе для момента времени  $t = 0,01$  с на примере алюминиевых полос с различными размерами сечения. Сравнение зависимостей коэффициента формы показывает, что если размер полос  $b$ , в направлении которого действует усилие, достаточно мал (кривые 1 на рис. 4), то значения  $k_{\phi}$ , рассчитанные с учетом реального распределения электромагнитного поля в переходном режиме и в предположении равномерного токораспределения, отличаются незначительно. При увеличении толщины для пакетов с одинаковыми направлениями токов значения  $k_{\phi}$  становятся значительно меньше (кривые 3 — 6 на рис. 4а), а с противоположными — больше значений коэффициента формы, рассчитанных в допущении равномерного токораспределения. Эти

различия возрастают с увеличением толщины  $b$  и в меньшей степени обусловлены отношением размеров граней полос  $b/a$ .

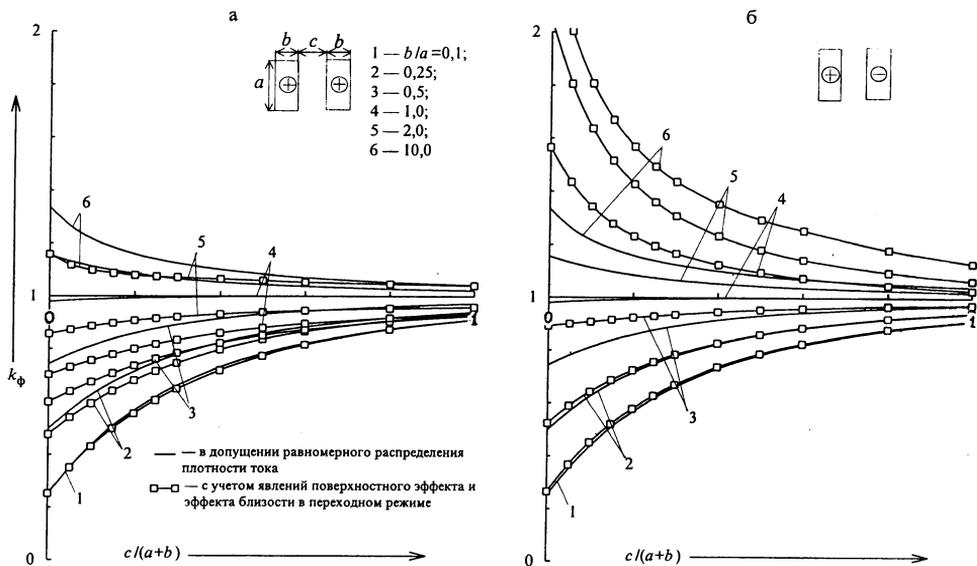


Рис. 4. Кривые коэффициента формы двухполосных пакетов из алюминиевых шин с размерами сечения: 1 —  $a \times b = 100 \times 10 \text{ мм}^2$ ; 2 —  $100 \times 25$ ; 3 —  $100 \times 50$ ; 4 —  $100 \times 100$ ; 5 —  $50 \times 100$ ; 6 —  $10 \times 100 \text{ мм}^2$ ; а — одинаковые; б — противоположные направления токов полос

**Электродинамические усилия в полых пакетах.** Наряду с двухполосными пакетами проведены исследования результирующих усилий и коэффициента формы в переходном режиме для рекомендуемых сечений полых пакетов из алюминиевых шин [3]. Они показали, что коэффициент формы для этих случаев близок к единице. Сближение шин (уменьшение межполосного расстояния  $c$ ) приводит к незначительному увеличению  $k_\Phi$ . Максимальное значение он принимает при соприкосновении полос ( $c = a$ ). Для пакетов, составленных из полос стандартных размеров сечения, максимальное значение коэффициента формы не превышает 1,04 (полоса размером  $120 \times 10 \text{ мм}^2$ ). Таким образом, замена полос в полном пакете линейными проводниками дает достаточную точность определения результирующих электродинамических усилий при любых межполосных расстояниях.

Исследования линейной плотности результирующих усилий показали, что распределение электромагнитного поля существенно влияет на их величину и характер. При этом плотность усилий, полученная с учетом реального электромагнитного состояния в переходном режиме, как и для двухполосных пакетов, распределена подобно плотности тока в направлении широкой грани полосы.

**Электродинамические усилия в трехполосных пакетах.** Особенности расчета электромагнитных характеристик трехполосных пакетов в переходных режимах рассмотрены в [1]. В них токи крайних полос больше тока средней. Они достигают наибольших мгновенных значений в разные моменты времени. Несмотря на отмеченное, для трехполосного пакета с размерами  $a \times b = 100 \times 10 \text{ мм}^2$  и  $c = 10 \text{ мм}$  максимальное амплитудное значение результирующих усилий, как показали исследования, соответ-

вует ударному току всего пакета, т. е. имеет место при  $t = 0,01$  с. Влияние фактического распределения электромагнитного поля с учетом неравномерного разделения тока между полосами на величину коэффициента формы несущественно. В момент времени  $t = 0,01$  с он равен 0,495. Величина  $k_\Phi$ , рассчитанная в допущении равномерного токораспределения, составляет 0,493. Распределение же линейной плотности усилий значительно отличается от распределения, полученного в допущении равномерного токораспределения.

С увеличением размера полос  $b$  явления поверхностного эффекта и эффекта близости в переходном режиме оказывают заметное влияние на величину коэффициента формы. Отмеченное иллюстрирует рис. 5, на котором приведены зависимости  $k_\Phi$  двух- и трехполосных пакетов от отноше-

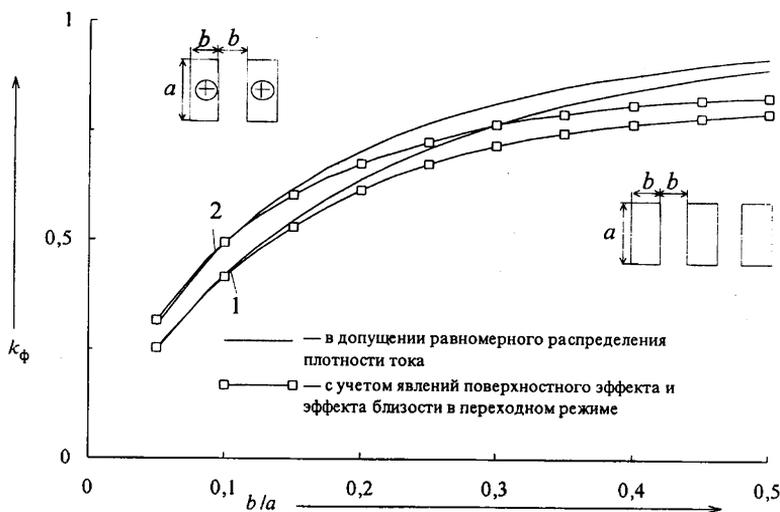


Рис. 5. Зависимости коэффициента формы пакетных шинопроводов от отношения размеров граней полос  $b/a$  при изменении размера  $b$  полос и постоянном размере  $a$ : 1 — двухполосный; 2 — трехполосный пакеты

ния размеров полос  $b/a$  при межполосном расстоянии  $c = b$  для момента времени  $t = 0,01$  с. Данные зависимости получены при постоянном размере  $a = 100$  мм и изменении толщины  $b$  от 5 до 50 мм. При малых толщинах (до 15 мм) различия в  $k_\Phi$ , рассчитанном с учетом и без учета реального распределения параметров поля, незначительны. С увеличением размера  $b$  полос значения  $k_\Phi$  становятся заметно меньше значений при равномерном распределении тока, как для двух-, так и для трехполосных пакетов.

## ВЫВОДЫ

1. Влияние электромагнитного состояния полос пакета в переходном режиме на величину коэффициента формы определяется характером распределения плотности тока в направлении действия электродинамических усилий. При малом размере полос в этом направлении коэффициенты формы, рассчитанные с учетом и без учета реального распределения поля, практически совпадают. С увеличением размера полос в направлении действия усилий величины коэффициента формы значительно отличаются от аналогичных значений, рассчитанных в допущении равномерного распределения плотности тока. Распределение плотности усилий вне зависимости

от размеров полос определяется распределением параметров поля в них в переходном режиме, и предположение о равномерном распределении плотности тока для расчета плотности усилий приводит к ложным результатам.

2. Для используемых сечений многополосных шинопроводов размер полос в направлении действия усилий мал, и коэффициент формы для них можно определять в допущении равномерного распределения плотности тока. Расчет усилий для пакетов с достаточно большим размером полос в направлении действия усилий (например, при расположении полос узкими гранями) необходимо проводить с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости переходного режима.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимович Д. А., Носайрат Фаиз. Электромагнитные характеристики многополосных шинопроводов в переходных режимах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 2001. — № 1. — С. 18—25.
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. Правила устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. D w i g h t Н. В. Repulsion between strap conductors, Electr. — World, 1917. — V. 70. — P. 522 — 524.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 6.12.2000

УДК 621.316.925

## УЧЕТ ПОТЕРЬ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук, доц. **НОВАШ И. В.**

*Белорусская государственная политехническая академия*

Потери в обмотках и магнитопроводах силовых трансформаторов малой и средней мощности составляют 1–2 %, а в трансформаторах мощностью более 10000 кВ·А – 0,5–1 % номинальной мощности. Столь малые значения потерь практически не сказываются на величинах токов и напряжений (десятые доли процента) даже при коротких замыканиях, когда потери в обмотках возрастают в десятки раз. Более заметное влияние потери активной мощности оказывают на скорость затухания переходных процессов, гармонический состав токов и напряжений, взаимные фазовые сдвиги отдельных гармоник, которые могут использоваться в качестве диагностических признаков тех или иных видов повреждений или ненормальных режимов трансформатора. В качестве диагностических признаков могут выступать также сами величины потерь, гармонический состав их мгновенных значений.