

УДК 621.3.066.6

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В КОНТАКТ-ДЕТАЛЯХ ПЛОСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.,
канд. техн. наук ГЕРАСИМОВИЧ Д. А., инж. КЛИМОВИЧ Ю. А.

*Белорусский национальный технический университет,
Минские кабельные сети РУП «Минскэнерго»,
Пинские электрические сети РУП «Брестэнерго»*

Контактные соединения являются неотъемлемой частью различных токоведущих систем. При прохождении электрического тока они подвергаются воздействию электродинамических усилий. Наибольшая величина усилий определяется ударным током короткого замыкания. При его прохождении контакты подвергаются внезапной механической нагрузке, носящей характер удара. Эта нагрузка предопределяет требуемую механическую прочность отдельных элементов контактного узла. Поэтому очень важно уметь рассчитывать возможные величины электродинамических усилий, действующих на контакт-детали, и характер их изменения во времени в режиме короткого замыкания.

В плоских контактных соединениях проводников, наряду с усилиями от токов соседних токоведущих частей, расчет которых не вызывает трудностей, появляются усилия от собственных токов проводников, образующих контактный узел. Это существенно усложняет решение задачи расчета электродинамических усилий, действующих на детали соединения. Поэтому здесь рассматривается только расчет усилий, действующих на элементы контакта от протекающего по нему тока.

На рис. 1 показано протекание токов в проводниках и соединяющем их многослойном плоском контактном узле. В нем в отличие от соединяемых проводников протекают составляющие тока I_x и I_z . Распределение этих токов в объеме контактного соединения носит резко неравномерный характер [1, 2]. Это не позволяет установить место приложения перетекаемых полных токов I_z для обоих типов контактов, а для контактов рубящего типа – и их величин. Следует особо отметить, что величины тока I_x в

контакт-деталей узла изменяются по длине контакта, а I_z – по его толщине. Наряду с этим геометрические размеры контактного узла (длина и толщина) намного меньше длины соединяемых проводников. Отмеченные факторы усложняют применение для расчета электродинамических усилий методов, основанных на законе Био–Савара–Лапласа.

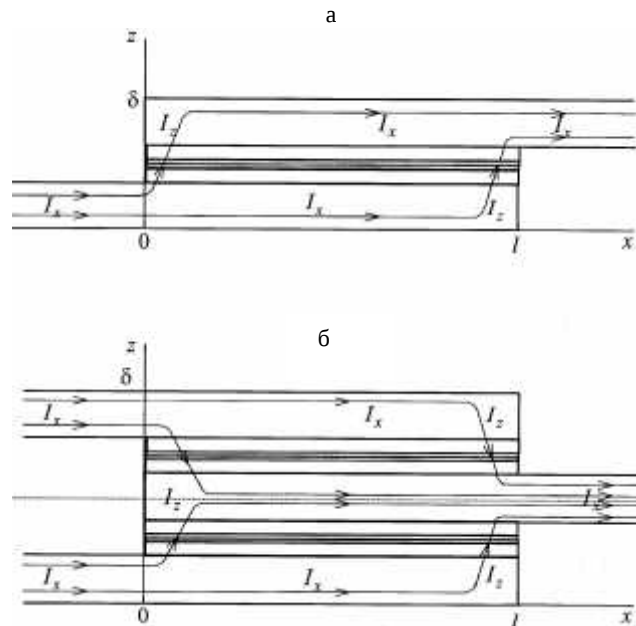


Рис. 1. Перетекание токов: а – в симметричном плоском контакте; б – в контакте рубящего типа

Положительные результаты в исследовании усилий, действующих на контакт-детали при протекании по соединению тока в режиме короткого замыкания, могут быть достигнуты при использовании величины удельной силы давления электромагнитного поля на среду, в которой протекает переменный ток. Такую возможность в оценке сил дает разработанный в [2, 3] метод расчета переходных электромагнитных процессов в многослойных структурах плоских контактных соединений. Удельная сила воздействия магнитного поля на элементарный объем материала проводника с током выражается векторным произведением плотности тока и индукции магнитного поля [4, 5]

$$\vec{f}(x, z, t) = [\vec{\sigma}(x, z, t) \vec{B}(x, z, t)], \quad (1)$$

где $\vec{\sigma}(x, z, t)$, $\vec{B}(x, z, t)$ – векторы плотности электрического тока и магнитной индукции в точке, где определяется нестационарное электродинамическое усилие.

В соответствии с принятым допущением, что электромагнитное поле в контактом узле оценивается плоской электромагнитной волной с неизмен-

ными в направлении координаты y параметрами, и принятой системой координат (рис. 1) в контакте будут присутствовать проекции плотности тока $\sigma_x(x, z, t)$, $\sigma_z(x, z, t)$ и вектора индукции – $B_y(x, z, t)$. При этом выражение (1) для любого i -го слоя многослойной структуры примет вид

$$\begin{aligned}\vec{f}_i(x, z, t) &= f_{ix}(x, z, t)\vec{i} + f_{iz}(x, z, t)\vec{k} = \\ &= -\mu_{yi}\sigma_{iz}(x, z, t)H_{iy}(x, z, t)\vec{i} + \mu_{yi}\sigma_{ix}(x, z, t)H_{iy}(x, z, t)\vec{k},\end{aligned}\quad (2)$$

где $\vec{i}, \vec{k}$ – единичные векторы.

Результирующие силы, действующие на i -й слой контактного узла единичной ширины, находятся интегрированием составляющих удельного электродинамического усилия по объему слоя, а результирующие мгновенные значения проекций сил, действующих на отдельные слои, – путем суммирования. При этом можно определить как результирующую силу на весь контакт, так и на контактирующую часть проводников, т. е. проекции сил, действующих на часть слоев k ($i, \dots, i + k$), будут:

$$F_{kx}(t) = -\sum_i^{i+k} \mu_{yi} \int_0^{\delta_i} \int_0^l \sigma_{iz}(x, z', t) H_{iy}(x, z', t) dx dz'; \quad (a)$$

$$F_{kz}(t) = \sum_i^{i+k} \mu_{yi} \int_0^{\delta_i} \int_0^l \sigma_{ix}(x, z', t) H_{iy}(x, z', t) dx dz', \quad (б)$$

где z' – локальная координата, изменяющаяся только в пределах рассматриваемого слоя.

Исследование электродинамических усилий в контакт-деталях соединений при коротких замыканиях. На основе выражений по расчету распределения параметров электромагнитного поля в слоях многослойного плоского контактного узла в переходных режимах, полученных в [2, 3], разработан программный модуль для расчета электродинамических усилий в контактных деталях и на его основе исследованы усилия, действующие на элементы плоских разъемных соединений и соединений рубящего типа алюминиевых проводников с защитными хромоникелевыми покрытиями.

Результаты исследований распределения плотностей и результирующих значений проекций электродинамических усилий, действующих на отдельные слои контактов, представлены на рис. 2...4. При определении усилий в качестве расчетного вида короткого замыкания в электрической цепи принято трехфазное короткое замыкание, при котором протекает периодическая и апериодическая составляющие тока, и выполняются условия появления ударного тока [6].

Плотность сил электромагнитного давления, действующих на верхнюю и нижнюю части контактных соединений в момент наступления ударного тока, приведена на рис. 2. Как и следовало ожидать, распределение этих сил для обоих видов контактов в некотором масштабе соответствует рас-

пределению токов, т. е. наибольшая плотность сил приходится на области протекания наибольшей плотности тока.

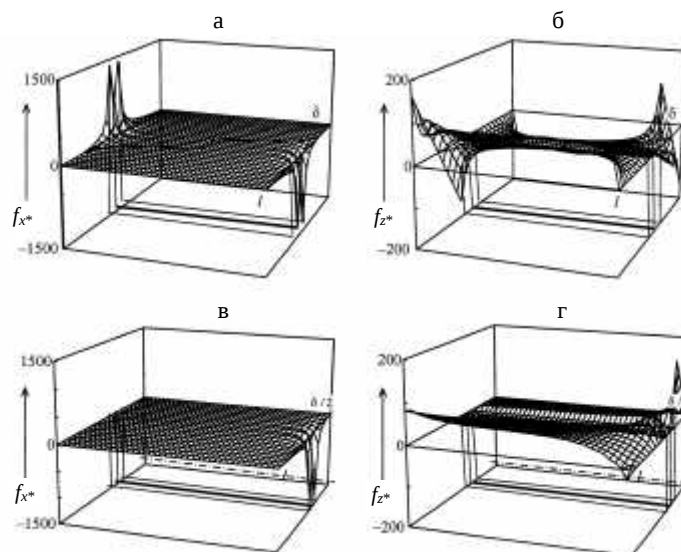


Рис. 2. Распределения плотности горизонтальной ($f_x = f_{x*} \cdot 4\pi(J_m h)^2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$) и вертикальной ($f_z = f_{z*} \cdot 4\pi(J_m h)^2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$) составляющих усилий в момент ударного тока короткого замыкания в плоских контактных соединениях (а, б) и соединениях рубящего типа (в, г)

Результирующие значения проекций сил, действующих на части контактного узла длиной 0,04 м (рис. 3, 4), изменяются пропорционально квадрату тока и носят пульсирующий характер с удвоенной частотой протекающего тока. Следует особо отметить направление действия проекций сил на контакты. На верхнюю и нижнюю части плоского соединения в силу разной направленности вектора напряженности магнитного поля действуют одинаковые по величине, но противоположные по направлению проекции сил. При этом результирующее воздействие этих сил в целом на весь контактный узел равно нулю. Однако вертикальные силы F_z обеспечивают дополнительное сжатие проводников, что повышает контактное давление и благоприятно сказывается на работе узла в режиме короткого замыкания. Аналогичное соотношение выполняется и для горизонтальных составляющих усилий F_x . При этом в режиме короткого замыкания они стремятся сместить верхнюю и нижнюю части контакта относительно друг друга, что может вызвать повреждение стяжных болтов разъёмных соединений.

Для контактов рубящего типа силы сжатия действуют аналогично, как и для плоских соединений. Горизонтальные силы действуют на элементы рубящего соединения в одном направлении и стремятся сместить неподвижные щеки узла с опорного элемента, что вызывает механические усилия в крепежных деталях и может привести к их разрушению или вырыванию подвижного ножа. Особенно это возможно для рубящих контактов небольшой длины.

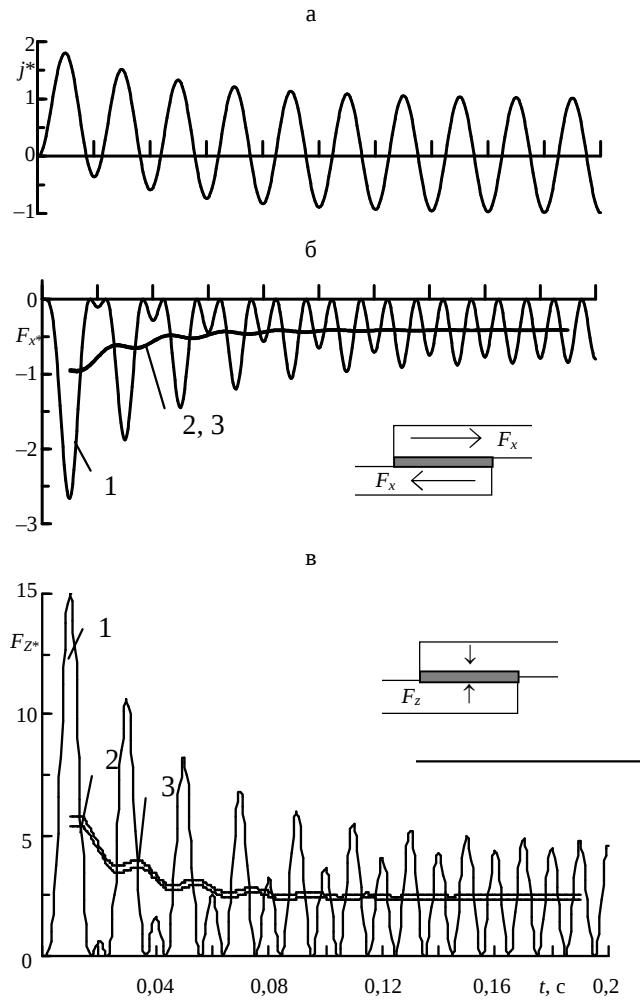


Рис. 3. Мгновенные значения линейной плотности тока $j = j_m J_m$ А/м (а), горизонтальных $F_x = F_{x*} \cdot 4\pi(J_m h)^2 \cdot 10^{-10}$ Н (б) и вертикальных $F_z = F_{z*} \cdot 4\pi(J_m h)^2 \cdot 10^{-10}$ Н (в) составляющих усилий в плоском контактном соединении: 1 – мгновенные значения; 2 – средние за период; 3 – то же при равномерном распределении горизонтальной составляющей плотности тока в контакте

Проведенные исследования зависимостей результирующих усилий F_x и F_z для контактов различной длины ($l = 0,02; 0,04; 0,08$ м) показали, что силы сжатия F_z возрастают прямо пропорционально вместе с увеличением длины. Это обусловлено увеличением пути протекания горизонтальной составляющей тока соединения. Величина горизонтальной составляющей усилий F_x остается практически неизменной. Ток при этом, как следует из [1...3], перетекает из одного проводника в другой в областях краев контакта. Размеры этих областей определяются в первую очередь толщиной контакта и электромагнитными свойствами проводников и мало зависят от его

длины. Таким образом, увеличение рабочей длины узла соединения способствует улучшению работы контакта при коротких замыканиях.

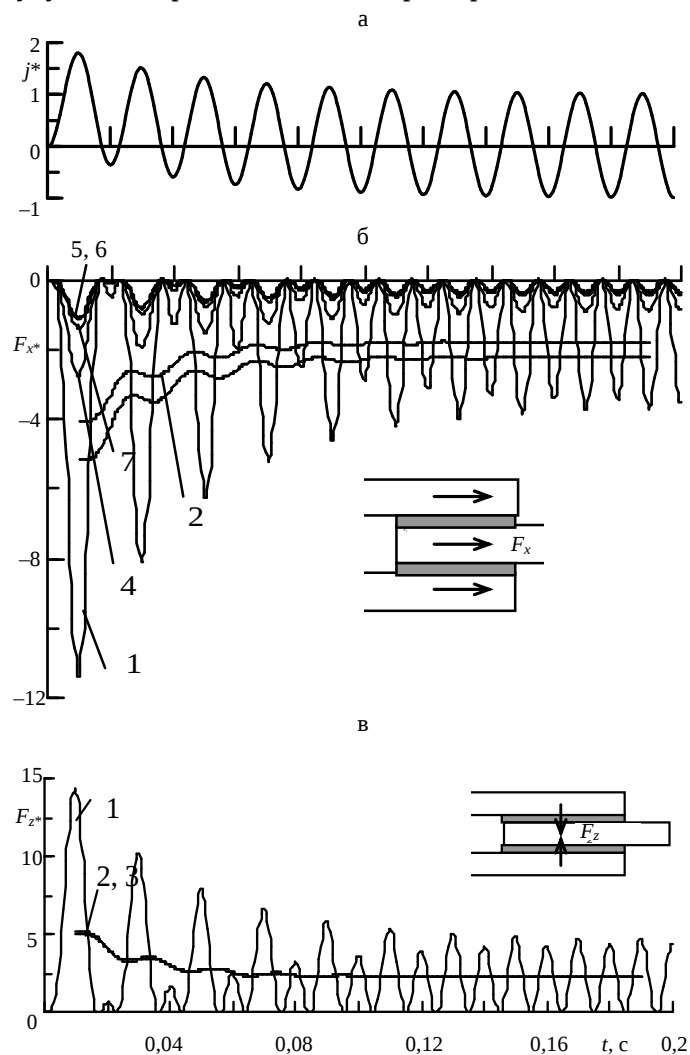


Рис. 4. Мгновенные значения линейной плотности тока $j = j_m J_m$ А/м (а), горизонтальных $F_x = F_{x*} \cdot 4\pi(J_m h)^2 \cdot 10^{-10}$ Н (б) и вертикальных $F_z = F_{z*} \cdot 4\pi(J_m h)^2 \cdot 10^{-10}$ Н (в) составляющих усилий в контактном соединении рубящего типа: 1 – мгновенные значения полных усилий; 2 – средние за период; 3 – то же при равномерном распределении горизонтальной составляющей плотности тока в контакте; 4 – усилия на внешние проводники контакта; 5, 6 – усилия на хромоникелевые защитные покрытия; 7 – усилия на внутренний проводник контакта

Наряду с отмеченным, для контактов рубящего типа рассчитывались горизонтальные проекции результирующих электродинамических усилий, действующих собственно на проводники и их защитные покрытия (кривые 4...7 на рис. 4.). Исследованиями установлено наличие результирующих горизонтальных усилий между слоями, стремящихся нарушить связи между покрытиями и защищаемыми ими проводниками, что может вызвать

появление пустот между поверхностью проводника и покрытием, расслоение и разрушение защитных слоев контакт-деталей.

Для соединений медных проводников с серебряными защитными покрытиями характер распределения плотности усилий, как показали расчеты, соответствует распределению усилий в контактах алюминиевых проводников с хромоникелевыми покрытиями. При этом плотность вертикальных усилий на поверхности контактирования для них практически одинакова, в отличие от горизонтальной составляющей f_x , максимальные значения которой примерно в пять раз выше для алюминиевых контактов. Это вызвано соответствующим распределением плотности тока в таких контактных узлах. Однако результирующие величины электродинамических усилий для контактов одинаковой длины практически не отличаются, т. е. мало зависят от электромагнитных свойств указанных проводников и их защитных покрытий.

Приближенная оценка результирующих электромагнитных усилий на контакт-детали. На начальной стадии проектирования, когда производятся предварительные расчеты по определению геометрических размеров контакт-деталей, целесообразно использовать приближенные методы по оценке результирующих усилий, действующих на элементы соединения. Ориентировочные величины интегральных усилий, действующих на отдельные слои соединения, можно получить, приняв упрощенное распределение плотности тока (например, равномерное или концентрация тока на оси симметрии).

При принятии равномерного распределения для горизонтальной составляющей плотности тока она будет неизменной по длине и толщине контакта (рис. 5а) и равна

$$\sigma_x(t) = \frac{i(t)}{h\delta} = \frac{j(t)}{\delta}, \quad (4)$$

где $i(t)$ – мгновенные значения силы тока в контакте; $j(t)$ – линейная плотность тока; h – ширина контактного соединения.

Такому распределению плотности тока приближенно будет соответствовать линейный закон распределения напряженности магнитного поля по толщине контакта (рис. 5б)

$$H_y(z,t) = H_y(0,t) - \frac{H_y(0,t) - H_y(\delta,t)}{\delta} z = \frac{j(t)}{2\delta} (\delta - 2z), \quad (5)$$

где величина $H_y(0,t) = -H_y(\delta,t)$ определяется из закона полного тока и

$$\text{при } h \gg \delta \text{ принимается равной } H_y(0,t) = \frac{i(t)}{2(h+\delta)} \approx \frac{j(t)}{2}.$$

Для вертикальной составляющей ток считается сосредоточенным на краях контакта и учитывается его зависимость только от координаты z , т. е. плотность тока будет $\sigma_z(0,z,t)$ и $\sigma_z(l,z,t)$. На поверхностях контактирования проводников происходит токообмен между ними, и в этом сечении вертикальная составляющая равна протекающему по соединению току. На верхней и нижней границах соединения вертикальная составляющая

тока равна нулю. Ее распределение по толщине контакта, как следует из приведенных в [7, 8] исследований, также можно принимать линейным. Для плоского и рубящего контактов распределение вертикальной плотности тока приведено на рис. 5в, д.

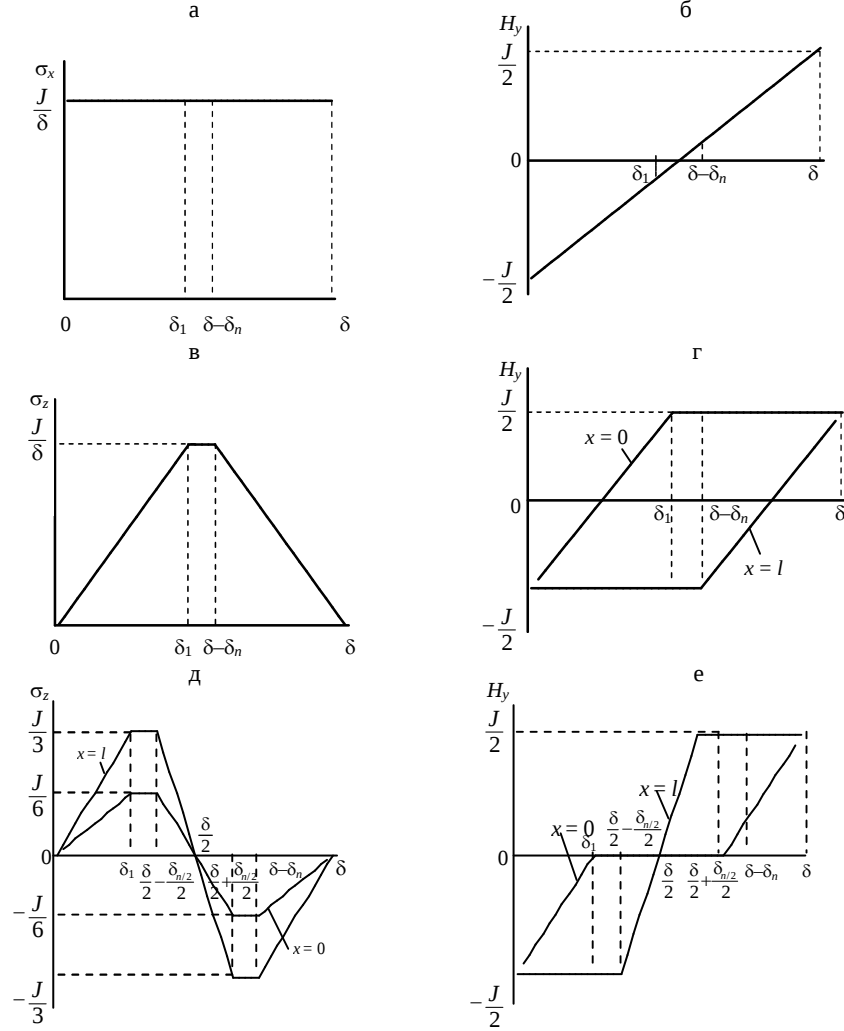


Рис. 5. Упрощенные распределения плотности тока (а, в, д) и напряженности магнитного поля (б, г, е) для различных типов контактов

В соответствии с приведенными распределениями формулы по расчету плотности тока для обоих типов контактов принимают вид:
для плоских контактов –

$$\sigma_z(0, z, t) = \sigma_z(l, z, t) = \begin{cases} \frac{j(t)}{2\delta_1} z, & z \in [0, \delta_1]; \\ \frac{j(t)}{2}, & z \in [\delta_1, (\delta - \delta_n)]; \\ \frac{j(t)}{2\delta_n} (\delta - z), & z \in [(\delta - \delta_n), \delta]; \end{cases} \quad (6)$$

для контактов рубящего типа с учетом их симметрии –

$$\sigma_z(0, z, t) = \begin{cases} \frac{j(t)(\delta - 2\delta_1)}{2\delta} \frac{z}{\delta_1}, & z \in [0, \delta_1]; \\ \frac{j(t)(\delta - 2\delta_1)}{2\delta}, & z \in [\delta_1, (\delta/2 - \delta_{n/2}/2)]; \\ \frac{j(t)(\delta - 2\delta_1)}{2\delta} \frac{2(\delta/2 - z)}{\delta_{n/2}}, & z \in [(\delta/2 - \delta_{n/2}/2), \delta/2]; \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_z(l, z, t) = \begin{cases} \frac{j(t)(\delta - \delta_{n/2})}{2\delta} \frac{z}{\delta_1}, & z \in [0, \delta_1]; \\ \frac{j(t)(\delta - \delta_1)}{2\delta}, & z \in [\delta_1, (\delta/2 - \delta_{n/2}/2)]; \\ \frac{j(t)(\delta - \delta_{n/2})}{2\delta} \frac{2(\delta/2 - z)}{\delta_{n/2}}, & z \in [(\delta/2 - \delta_{n/2}/2), \delta/2]. \end{cases}$$

Распределение напряженности магнитного поля по краям контакта в соответствии с рис. 5г, е будет определяться по выражениям:

для плоских контактов –

$$H_y(0, z, t) = \begin{cases} j(t) \left(\frac{z}{\delta_1} - \frac{1}{2} \right), & z \in [0, \delta_1]; \\ \frac{j(t)}{2}, & z \in [\delta_1, \delta]; \end{cases} \quad (8)$$

$$H_y(l, z, t) = \begin{cases} -\frac{j(t)}{2}, & z \in [0, (\delta - \delta_n)]; \\ j(t) \left(\frac{1}{2} - \frac{\delta - z}{\delta_n} \right), & z \in [(\delta - \delta_n), \delta], \end{cases}$$

для контактов рубящего типа с учетом их симметрии –

$$H_y(0, z, t) = \begin{cases} j(t) \left(\frac{z}{2\delta_1} - \frac{1}{2} \right), & z \in [0, \delta_1]; \\ 0, & z \in [\delta_1, \delta/2]; \end{cases} \quad (9)$$

$$H_y(l, z, t) = \begin{cases} -\frac{j(t)}{2}, & z \in [0, (\delta/2 - \delta_{n/2}/2)]; \\ j(t) \left(\frac{z - \delta/2 + \delta_{n/2}/2}{\delta_{n/2}} - \frac{1}{2} \right), & z \in [(\delta/2 - \delta_{n/2}/2), \delta/2]. \end{cases}$$

Выражения (4)...(9) позволяют определять как удельные, так и результирующие силы электромагнитного давления в контактном узле. Для рас-

смаатриваемых примеров контактных узлов расчетные выражения для определения результирующих усилий, действующих на единицу их ширины, будут:

результирующая сила сжатия для обоих типов контактов –

$$F_z(t) = 0,125\mu_y j^2(t)l; \quad (10)$$

горизонтальные усилия для плоских контактов –

$$|F_{xi}(t)| = \begin{cases} 0,0833\mu_{yi} j^2(t)\delta_i, & i = 1, 6; \\ 0, & i = 2, 3, 4, 5; \end{cases} \quad (11)$$

для контактов рубящего типа –

$$|F_{xi}(t)| = \begin{cases} 0,0972\mu_{yi} j^2(t)\delta_i, & i = 1, 11; \\ 0,1667\mu_{yi} j^2(t)\delta_i, & i = 2, 5, 7, 10; \\ 0,0833\mu_{yi} j^2(t)\delta_i, & i = 6. \end{cases} \quad (12)$$

Из (10) следует, что сжимающее усилие F_z прямо пропорционально длине контактного соединения и не зависит от его толщины, а усилие F_x , рассчитываемое по (11), (12), наоборот, зависит только от толщины контакта и не зависит от длины. Это подтверждается полученными выше результатами расчетов усилий с учетом неравномерного распределения электромагнитного поля.

Таким образом, приведенные выражения по расчету результирующих динамических усилий в контакт-деталях позволяют приближенно определять динамические нагрузки при наступлении ударного тока короткого замыкания. Так как среднее значение электродинамических усилий пропорционально квадрату действующего значения полного тока, протекающего через проводник [9], по ним можно рассчитывать и средние за период значения усилий в контакт-деталях.

На основании полученных выражений рассчитаны ударные электродинамические усилия, действующие на проводники контактных узлов с учетом реального распределения плотности тока и по приближенным выражениям. Результаты этих расчетов приведены в табл. 1.

В табл. 1 в числителе приведены значения результирующих проекций усилий, рассчитанные по (10)...(12), а в знаменателе – полученные по (3). Как следует из данных табл. 1, рассчитанные по приближенным выражениям силы практически во всех случаях превышают результаты, полученные с учетом реального распределения плотности тока в контактном соединении. Наибольшее отличие характерно для контактов рубящего типа. Для сил F_z оно составляет примерно 10...20 %, для F_x – 20...25 %. Для плоских контактов эти превышения составляют примерно 5...15 %.

Таблица 1

Материал проводников	Тип контакта и его толщина	Длина соединения, м	Ударные усилия	
			F_{*z}	F_{*x}
Алюминий	Плоский контакт с хромо- никелевым покрытием, $\delta = 22$ мм	0,02	$\frac{8,10}{7,06}$	$\frac{2,70}{2,65}$
		0,04	$\frac{16,20}{15,04}$	$\frac{2,70}{2,65}$
		0,08	$\frac{32,40}{31,19}$	$\frac{2,70}{2,57}$
	Рубящий контакт с хромо- никелевым покрытием, $\delta = 33$ мм	0,02	$\frac{8,10}{6,92}$	$\frac{14,41}{11,55}$
		0,04	$\frac{16,20}{14,35}$	$\frac{14,41}{11,41}$
		0,08	$\frac{32,40}{29,45}$	$\frac{14,41}{12,20}$
Медь	Плоский контакт с покрытием серебром, $\delta = 22$ мм	0,04	$\frac{16,20}{13,81}$	$\frac{2,70}{2,79}$
	Рубящий контакт с покрытием серебром, $\delta = 33$ мм	0,04	$\frac{16,20}{13,38}$	$\frac{11,17}{8,78}$

Таким образом, полученные приближенные выражения по расчету результирующих усилий на слои узла и в целом на контактирующие проводники позволяют с достаточной для инженерной практики точностью определять величины сжимающих и разрывных усилий. При этом их величина получается завышенной по сравнению с усилиями, учитывающими реальные распределения плотности тока, что будет при их использовании на этапе проектирования способствовать увеличению запаса механической прочности контактного соединения.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика, алгоритмы и программа расчета электродинамических усилий, действующих на токоведущие слои контакт-деталей многослойных соединений при протекании по ним тока короткого замыкания, основанные на расчете распределения параметров электромагнитного поля в контакте и позволяющие на стадии проектирования определять механические нагрузки на элементы его составных крепежных и опорных конструкций.

2. Исследованиями установлено, что при протекании тока короткого замыкания в контактном узле возникают как силы сжатия, которые увеличивают контактное давление и способствуют работе контакта, так и силы, стремящиеся сместить проводники относительно друг друга и нарушить целостность соединения. При этом для контактных узлов с геометрическими размерами, не превышающими четырех глубин проникновения плоской электромагнитной волны, показано, что силы сжатия практически

не зависят от электрической проводимости проводников и их толщины, а силы смещения – от длины соединения.

3. Предложены приближенные аналитические выражения по расчету результирующих усилий, действующих как на отдельные слои, так и контактирующие проводники плоского соединения, позволяющие предварительно на стадии проектирования определять механические нагрузки на элементы контактного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев Г. В. Электрические характеристики плоских контактных соединений разъединителей на переменном токе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / БГПА. – Мн., 2001. – 21 с.
2. Электромагнитные характеристики плоских контактных соединений в переходных режимах / А. Н. Герасимович, Д. А. Герасимович, М. А. Мишкина и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 3. – С. 12–17.
3. Метод расчета переходных электромагнитных процессов в многослойных структурах плоских контактных соединений / А. Н. Герасимович, Д. А. Герасимович, М. А. Мишкина и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 6. – С. 27–35.
4. Туровский Я. Техническая электродинамика / Пер. с польск. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
5. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. – Ч. 3: Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
6. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
7. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А., Яковлев Г. В. Токораспределение в плоском контактном соединении разнородных проводников // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 5. – С. 13–26.
8. Основы расчета токораспределения в плоских контактных соединениях / А. Н. Герасимович, Д. А. Герасимович, Г. В. Яковлев и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 3. – С. 12–24.
9. Холявский Г. Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. – Л.: Энергия, 1971. – 156 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 30.05.2005