

Электродинамические усилия в контактных системах электрических аппаратов

БЕЛКИН Г.С., РОМОЧКИН Ю.Г.

Анализируются возможные осевые усилия, возникающие в осесимметричных токоведущих элементах и в контактных системах электрических аппаратов при токах короткого замыкания. При анализе учитываются неравномерность распределения тока по поперечному сечению и влияние радиальной составляющей тока на осевое усилие. Определены необходимые значения дополнительного контактного нажатия для некоторых вакуумных дугогасительных камер.

Ключевые слова: вакуумная дугогасительная камера, токоведущий элемент, контактная система, осевое усилие, распределение тока, анализ

При оценках электродинамической устойчивости контактных систем большой интерес представляет определение осевых усилий, стремящихся развести замкнутые контакты. Это связано с выбором дополнительного контактного нажатия, при котором отбросы контактов при токах короткого замыкания (КЗ) исключены.

Известные расчетные выражения [1–3], полученные вслед за Двайтом, для отбрасывающих контакты усилий основаны на рассмотрении осевых усилий в токоведущих элементах (ТЭ) с конической боковой поверхностью при равномерном распределении тока по поперечному сечению ТЭ. Согласно этой расчетной модели при переменном поперечном сечении кроме радиальных сил возникают силы, направленные вдоль оси ТЭ в сторону большего сечения. При этом из полученных выражений следует, что результирующее осевое усилие, действующее на участок ТЭ, определяется отношением радиусов (площадей) поперечного сечения у концов участка. Эти выражения обычно используют и для оценки усилий, возникающих в контактных системах аппаратов.

Расчетная модель ТЭ с конической боковой поверхностью и равномерным распределением тока в пределах его поперечного сечения далека от реальной картины растекания тока в контактных системах. В статье определяются осевые усилия в осесимметричных ТЭ произвольной формы и в контактных системах с учетом неравномерности распределения тока в пределах их поперечного сечения. Кроме того проведена оценка влияния магнитного поля от радиальной составляющей тока на

Possible axial forces that can arise in axially symmetrical current-carrying elements and in the contact systems of electrical apparatuses during short-circuit currents are analyzed. The analysis is carried out taking into account nonuniform distribution of current over the cross section and the influence the radial component of the current has on the axial force. The necessary values of additional contact pressing force for some vacuum arc chutes are determined.

Key words: vacuum interrupter, current-carrying element, contact system, axial force, current distribution

осевое усилие. Определены необходимые значения дополнительного контактного нажатия для вакуумных дугогасительных камер (ВДК) с различными номинальными токами отключения.

Электродинамические усилия в осесимметричных ТЭ произвольной формы. Рассмотрим усилия, возникающие на участке ТЭ переменного сечения, боковая поверхность которого образована вращением криволинейной трапеции $ABCD$ вокруг стороны BC (рис. 1). Протекающий в ТЭ ток взаимодействует с магнитным полем, вызванным этим же током. При токах КЗ в результате такого взаимодействия в ТЭ имеют место большие электродинамические усилия.

Электродинамическое усилие \bar{P} , возникающее в некотором объеме V , определяется распределением тока в этом объеме:

$$\bar{P} = \int_V [\bar{j}' \cdot \bar{B}] dV, \quad (1)$$

где \bar{j} – плотность тока в некоторой точке M ; \bar{B} – индукция магнитного поля в точке M .

Векторное поле $\bar{j}(M)$ и $\bar{B}(M)$ в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\bar{j}(M) = j_z(M)\bar{e}_z + j_r(M)\bar{e}_r + j_j(M)\bar{e}_j; \quad (2)$$

$$\bar{B}(M) = B_z(M)\bar{e}_z + B_r(M)\bar{e}_r + B_j(M)\bar{e}_j, \quad (3)$$

где $j_z, j_r, j_j, B_z, B_r, B_j$ – составляющие векторов \bar{j} и \bar{B} в точке M в цилиндрической системе координат; \bar{e}_z, \bar{e}_r и \bar{e}_j – единичные векторы в точке M (рис. 1).

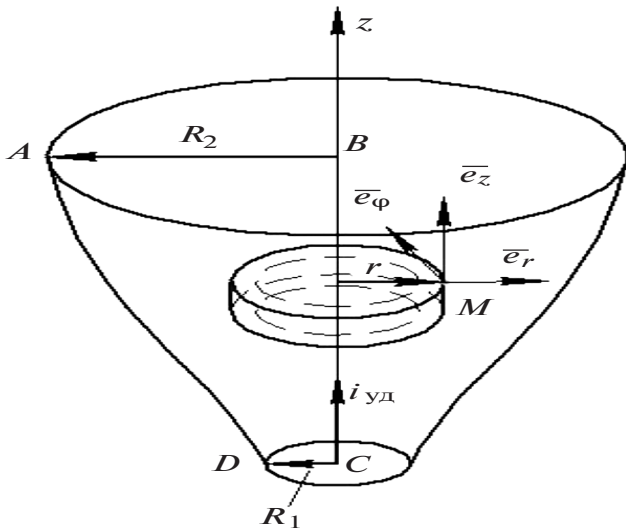


Рис. 1. ТЭ с осесимметричным участком произвольной формы

У осесимметричного векторного поля $\vec{j}(M)$ (рис. 1) есть только две составляющие – осевая j_z и радиальная j_r . Этими двумя составляющими плотностями тока и определяется векторное поле $\vec{B}(M)$.

В соответствии с (1)–(3) осевое электродинамическое усилие связано с радиальной составляющей плотности тока и тангенциальной составляющей индукции магнитного поля, т.е.

$$\vec{P}_z = \int_V \partial j_r B_j [\vec{e}_r \times \vec{e}_j] dV. \quad (4)$$

Составляющая индукции B_j вызывается как составляющей тока в направлении оси z , так и радиальной составляющей тока. Оценка осевых усилий, связанных с магнитным полем от радиальной составляющей тока, важна для контактных систем, так как при КЗ у поверхности контактов протекают большие радиальные токи противоположного направления.

При расчете осевых усилий, действующих на участок ТЭ переменного сечения, будем считать, что ток неравномерно распределен по сечению этого участка и равномерно за его пределами, а усилием, связанным с полем от радиальной составляющей тока, можно пренебречь, так как значение тангенциальной составляющей магнитной индукции от этого тока существенно меньше значения от осевой составляющей.

Чтобы получить выражение, связывающее плотность радиального тока j_r и ток в направлении оси z , выделим в ТЭ элемент объема в виде диска радиусом r и толщиной dz (рис. 1). Для этого элемента объема можно записать:

$$j_r 2\pi r dz = - di_z |_{r=\text{const}} = - \frac{di_z}{dz} dz \quad (5)$$

или

$$j_r = - \frac{1}{2\pi r} \frac{di_z}{dz}, \quad (5a)$$

где i_z – ток в направлении оси z через торцевые поверхности элемента объема (рис. 1); $di_z |_{r=\text{const}}$ – изменение тока i_z с изменением z при $r = \text{const}$.

Частная производная di_z / dz и плотность радиального тока определяются формой участка ТЭ. Если поперечные размеры медленно изменяются с изменением координаты z , то радиальная составляющая тока невелика и плотность продольного тока примерно постоянна в пределах всего поперечного сечения. Если же диаметр ТЭ изменяется сильно на некотором участке его длины, то резко возрастает плотность радиального тока и плотность осевого тока нельзя считать постоянной в пределах поперечного сечения. Второй случай наиболее интересен с точки зрения оценки возможной силы, отбрасывающей контакты при КЗ.

Для определения осевой силы, действующей на участок ТЭ, из дискообразного элемента объема (рис. 1) выделим элемент объема dV в виде кольца с центром на оси z толщиной dz и шириной dr :

$$dV = 2\pi r dr dz. \quad (6)$$

Тангенциальная составляющая индукции магнитного поля от осевой составляющей тока i_z для этого элемента объема равна

$$B_j = \frac{\mu_0 i_z}{2\pi r}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Подставляя выражения (5)–(7) в (4), получим уравнение для осевого усилия, связанного с взаимодействием в ТЭ радиальной составляющей тока и магнитного поля от тока i_z :

$$P_z = - \frac{\mu_0}{2\pi} \int_V \frac{i_z}{r} di_z |_{r=\text{const}} dr. \quad (8)$$

Чтобы определить осевое усилие P_z , действующее в объеме V , с помощью (8) нужно проинтегрировать сначала по переменной i_z при постоянном радиусе r , а затем и по переменному r .

Разделим участок ТЭ с переменным сечением на две области – 1-я область, ограниченная условием $r \in R_1$, и 2-я область, где $R_1 \in r \in R_2$ (R_1 и R_2 – меньший и больший радиусы на границах участка (рис. 1)). Принимая во внимание, что за пределами участка ТЭ переменного сечения ток распределен

равномерно по сечению, можно определить пределы изменения i_z при постоянном r .

При КЗ в 1-й области ток i_z изменяется от $i_{уд} \frac{r^2}{R_1^2}$ до $i_{уд} \frac{r^2}{R_2^2}$, а во 2-й – от $i_{уд}$ до $i_{уд} \frac{r^2}{R_2^2}$ ($i_{уд}$ – ударное значение тока).

С учетом указанных пределов интегрирования интеграл (8) можно записать для двух выбранных областей в виде

$$P_z = - \frac{m_0}{2\pi} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \frac{r^2}{r^3} i_z di_z |_{r=\text{const}} dr + \frac{m_0 i_{уд}^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что осевое усилие не зависит от распределения тока по поперечному сечению ТЭ. При выводе (9) предполагалось, что ток распределен по сечению ТЭ произвольным образом. При $R_1 < R_2$ сила $P_z > 0$, т.е. осевое усилие направлено в сторону большего сечения ТЭ.

Если ТЭ несимметричны относительно оси z , то возможно появление тангенциальной составляющей тока. В этом случае при расчете распределения плотности тока и индукции магнитного поля следует учитывать и тангенциальную составляющую тока.

Осевые электродинамические усилия в контактных системах. В контактных системах электрических аппаратов, так же как и в ТЭ переменного сечения, при токах КЗ возникают большие осевые усилия, что может привести к отбросу контактов.

На рис. 2 показана осесимметричная картина растекания тока в контактах при одной площадке контактирования. Площадь сечения, через которое проходит ток, изменяется очень сильно, что приводит к появлению большой радиальной составляющей тока.

Очевидно, что вблизи области стягивания тока осевая составляющая тока i_z распределена неравномерно по сечению контакта (при фиксированном z). Только вдали от области стягивания тока плотность тока j_z можно считать постоянной по сечению.

Определим осевое электродинамическое усилие, возникающее в результате взаимодействия ра-

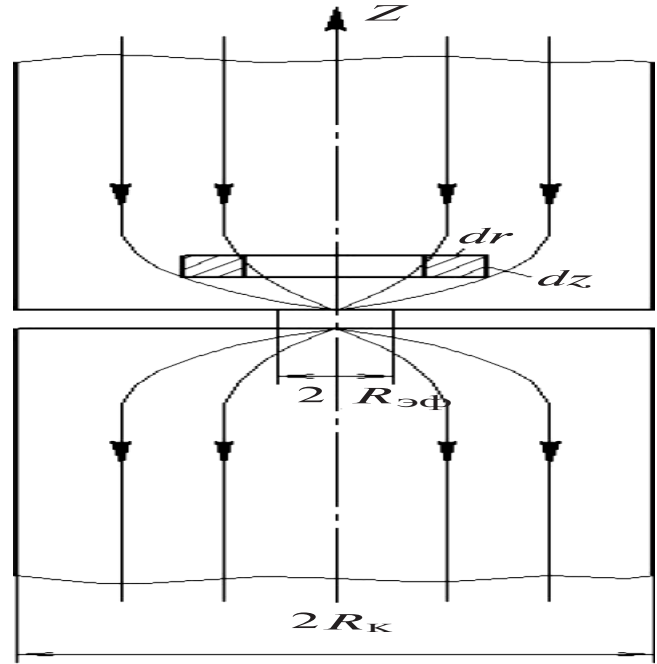


Рис. 2. Распределение тока в контактах

диального тока с магнитным полем от осевого тока. Для этого применим подход аналогичный тому, что был использован в предыдущем разделе. Выделим элемент объема в виде кольца шириной dr (рис. 2): $dV = 2\pi r dr dz$. Будем считать, что на большом расстоянии от площадки контактирования в контактах устанавливается равномерное распределение тока i_z по поперечному сечению. Кроме того, и в середине перемычки (рис. 2) распределение тока i_z можно считать равномерным.

В этих точках плотность радиального тока j_r равна нулю и ток, проходящий внутри кольцевого элемента объема dV , в этих точках будет определяться выражениями:

для точек вдали от области стягивания тока

$$i_z = i_{уд} \frac{r^2}{R_k^2}; \quad (10)$$

для середины перемычки радиусом $R_{эф}$

$$i_z = i_{уд} \frac{r^2}{R_{эф}^2}, \quad (11)$$

где $R_{эф} = b_{эф} \sqrt{\frac{P_k}{\rho H}}$ – радиус эффективной площадки контактирования (рис. 2); $b_{эф}$ – коэффициент; P_k – полное контактное нажатие; H – твердость материала контактов по Бринеллю.

Используя (4)–(7), получим для осевой силы, действующей на контакты, уравнение, по виду аналогичное уравнению (8).

Учитывая соотношения (10) и (11), интеграл (8) можно записать в виде двух слагаемых: для 1-й области (при $r \leq R_{эф}$) и для 2-й области (при $R_{эф} < r \leq R_k$) (рис. 2):

$$P_z = - \frac{\mu_0 \epsilon_0}{2\pi \epsilon} \int_0^{R_{эф}} \frac{1}{r} i_{уд} \frac{r^2}{R_k^2} i_z dr + \frac{\mu_0 \epsilon_0}{2\pi \epsilon} \int_{R_{эф}}^{R_k} \frac{1}{r} i_{уд} \frac{r^2}{R_{эф}^2} i_z dr + \frac{\mu_0 i_{уд}^2}{4\pi} \ln \frac{R_k}{R_{эф}}. \quad (12)$$

Переменная i_z при фиксированном радиусе r изменяется от $i_{уд} \frac{r^2}{R_{эф}^2}$ для середины перемычки до $i_{уд} \frac{r^2}{R_k^2}$ для удаленных от области стягивания тока участков контакта, если радиус r не превосходит $R_{эф}$ (первый член в выражении (12)). В середине перемычки и в удаленных от области стягивания точках можно считать осевой ток i_z равномерно распределенным по сечению, так как радиальная составляющая тока в этих точках мала (j_r практически равна нулю). Соответственно при $r \leq R_{эф}$ переменная i_z изменяется от ударного значения тока у поверхности контакта до $i_{уд} \frac{r^2}{R_k^2}$ далеко за пределами области стягивания тока (второе слагаемое в уравнении (12)).

В результате интегрирования приходим к выражению для силы, отбрасывающей контакты, аналогичному выражению (9) для случая ТЭ переменного сечения.

Осевое усилие при токах КЗ возникает не только в результате взаимодействия радиального тока с полем от тока вдоль оси z , но и в результате взаимодействия радиальных токов, протекающих у поверхности двух замкнутых контактов (рис. 2).

Оценим, насколько велика эта сила по сравнению с силой, определяемой выражением (12). Как видно из рис. 2, при протекании тока через область стягивания у поверхности контактов образуются радиальные токи противоположного направления и возникает усилие, стремящееся отбросить контакты.

Радиальные токи у поверхности контактов расположены недалеко друг от друга, так как длина перешейка (выступа) мала. Заменим радиальные токи, протекающие в приповерхностных слоях, двумя ленточными ТЭ шириной, равной средней длине окружности, проведенной из центра контактов, и длиной, равной радиусу контактов.

При двух ленточных ТЭ выражение для усилия, возникающего при протекании тока, имеет вид [3]:

$$P_z = \frac{\mu_0 i_{уд}^2 l}{2\pi L} K_\phi, \quad (13)$$

где L – расстояние между ТЭ; l – длина ТЭ; K_ϕ – коэффициент формы:

$$K_\phi = 2a \epsilon \operatorname{arctg} \frac{a}{\epsilon} - 0,5 \ln \left(1 + \frac{1}{a^2} \right)$$

$a = L/h$ – относительное расстояние; h – ширина ТЭ.

Если предположить, что в приповерхностном слое толщиной порядка радиуса площадки контактирования радиальный ток составляет порядка 25% полного тока, то при $i_{уд} = 50$ кА, радиусе контакта 2 см и эффективном радиусе контактирования $0,5 \cdot 10^{-3}$ м получим для осевого усилия от взаимодействия радиальных токов значение примерно 30 Н. Для торцевых контактов при $i_{уд} = 50$ кА выражение (12) дает намного большие значения для силы, отбрасывающей контакты, так что взаимодействие радиальных токов в контактах при оценке усилия в первом приближении можно не учитывать.

Оценка требуемого дополнительного контактного нажатия для вакуумных дугогасительных камер. В вакуумных дугогасительных камерах (ВДК) используются только торцевые контактные системы. Поэтому вопросы, связанные с предотвращением отбросов контактов и выбором дополнительного контактного нажатия, для ВДК особенно важны. Отсутствие отбросов контактов при ударных токах является одним из условий выбора дополнительного контактного нажатия.

Оценим с помощью приведенных выражений требуемое дополнительное нажатие для ВДК на номинальное напряжение 10 кВ с номинальными токами отключения 20 и 31,5 кА. Рассмотрим ВДК с аксиальным магнитным полем, материал контактов – ХД70 (70% по массе меди, остальное – хром).

Кроме электродинамической силы, возникающей в результате сужения линий тока у площадки контактирования $P_{э,с}$, на контакты ВДК воздействуют еще ряд продольных сил: сила взаимодействия индукторов контактной системы, собственное

контактное нажатие из-за перепада давления внутри и вне камеры, а также дополнительное нажатие, определяемое узлом нажатия выключателя. В ВДК с аксиальным магнитным полем индукторы контактных систем создают усилие, прижимающее контакты при протекании токов КЗ.

С учетом всех перечисленных сил, действующих на контакты ВДК, выражение (12) для электродинамического усилия в области стягивания тока можно записать в виде [3]:

$$P_{\text{э.с}} = 10^{-7} i_{\text{уд}}^2 \ln \sqrt{\frac{\rho R_k^2 H}{n(P_d + P_c + P_{\text{инд}} - P_{\text{э.с}})}} \quad (14)$$

где P_d – дополнительное нажатие; P_c – собственное нажатие контактов в ВДК; $P_{\text{инд}}$ – нажатие, связанное с взаимодействием индукторов контактной системы; n – число площадок контактирования.

Коэффициент $b_{\text{эф}}$ для ВДК принимаем равным единице. Для плоских индукторов силу $P_{\text{инд}}$ можно оценить с помощью соотношения

$$P_{\text{инд}} = 4\pi 10^{-7} i_{\text{инд}}^2 \frac{R_{\text{инд}}}{D_{\text{инд}}}, \quad (15)$$

где $i_{\text{инд}}$ – ток в индукторе с учетом разветвления тока; $R_{\text{инд}}$ – радиус витка индуктора; $D_{\text{инд}}$ – расстояние между индукторами при замкнутых контактах.

Для ВДК с номинальным током отключения 20 кА уравнение (14) дает для требуемого дополнительного нажатия значение 880 Н при $n=1$ и 780 Н при $n=2$. В расчетах принималось, что собственное контактное нажатие ВДК составляет 120 Н, а сила $P_{\text{инд}}$ при ударном токе равна 300 Н для четырехсекционного индуктора.

Для ВДК с номинальным током отключения 31,5 кА требуемое по условию отсутствия отброса контактов дополнительное нажатие по расчету составляет 1640 Н при $n=1$ и 1340 Н при $n=2$. Принималось, что собственное контактное нажатие ВДК составляет 160 Н, а сила $P_{\text{инд}}$ при ударном токе для четырехсекционного индуктора равна 1250 Н.

Следует отметить, что полученные значения нажатия определялись по условию отсутствия отброса контактов и могут быть приняты только при сравнительно небольших номинальных токах. По условию пропускания больших номинальных токов могут быть необходимы значительно большие дополнительные контактные нажатия. Так, для ВДК с номинальным током отключения 20 кА для пропускания номинального тока 1600 А потребуется увеличение P_d до 1200 Н, а для ВДК с номинальным током отключения 31,5 кА и номинальными

токами 2000–3150 А требуется P_d в диапазоне от 2000–2500 Н.

Силу отброса контактов ВДК при ударных токах можно уменьшить за счет применения специальной конфигурации контактной системы. В [4, 5] предложена контактная система, у которой рабочая поверхность одного из контактов имеет выпуклую форму, а другого контакта – вогнутую (рис. 3). Такая контактная система применяется во многих ВДК разработки ФГУП ВЭИ. Сила, отбрасывающая контакты, направлена под углом к продольной оси (рис. 3).

В результате осевая составляющая силы уменьшается по сравнению с контактной системой,

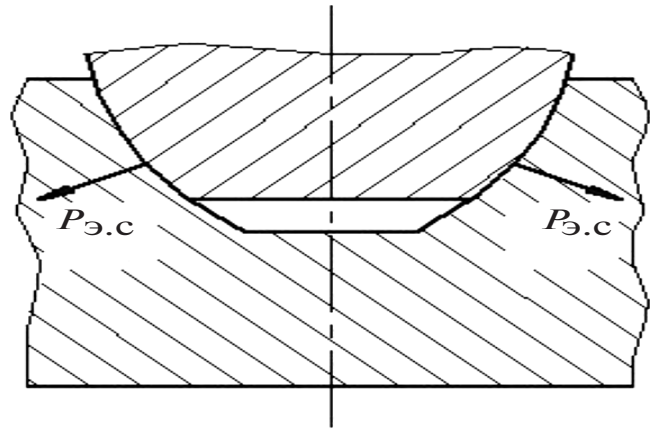


Рис. 3. Контактная система с малой продольной составляющей силы отброса

имеющей плоские рабочие поверхности. Поэтому, например, для вакуумной камеры КДВ-10-20/1000УХЛ2 необходимое дополнительное контактное нажатие составляет всего 700 Н.

Закключение. Осевое усилие, стремящееся отбросить контакты при токах короткого замыкания, связано с взаимодействием осевой составляющей тока и тангенциальной составляющей индукции магнитного поля. При этом вклад тангенциальной составляющей поля от осевого тока является основным, а сила, связанная с магнитным полем от радиальной составляющей тока, составляет менее 5%.

Осевая сила, возникающая в осесимметричных ТЭ переменного сечения и в контактных системах, не зависит от распределения тока по сечению. Она определяется ударным током и отношением радиусов (площадей) на границах интересующего нас участка.

Требуемое дополнительное контактное нажатие для ВДК можно уменьшить при использовании контактных систем с аксиальным магнитным полем, а также применяя контактные системы с выпуклой и вогнутой рабочими поверхностями контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залесский А.М. Электрические аппараты высокого напряжения. – М.: Госэнергоиздат, 1957.

2. **Основы** теории электрических аппаратов/Под ред. И.С.Таева. – М.: Высшая школа, 1987.

3. **Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Борисов В.В. и др.** Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов/Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

4. **Патент РФ № 2178927.** Контактная система вакуумной дугогасительной камеры/Г.С. Белкин, И.А. Лукацкая, Ю.Г. Ромочкин. – БИ, 2002, № 3.

5. **Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Ромочкин Ю.Г.** Влияние формы поверхности контактов на характеристики вакуумных дугогасительных камер. – Электротехника, 2007, №4.

[17.10.11]

*Авторы: **Белкин Герман Сергеевич** окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты» во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ). Начальник отдела ФГУП ВЭИ.*

***Ромочкин Юрий Геннадьевич** окончил энергомашиностроительный факультет МВТУ им. Баумана в 1979 г. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по вакуумной технике. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.*