

УДК 621.3.066.6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ПЛОСКИХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ГЕРАСИМОВИЧ А. Н., инж. ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.,
канд. техн. наук ЯКОВЛЕВ Г. В., канд. техн. наук МИШКИНА М. А.,
инж. ЕЖЕНКОВ Г. Г.

*Белорусская государственная политехническая академия,
ПО «Витебскэнерго»*

Среди разнообразных конструкций контактных соединений плоские разборные и размыкающиеся контакты относятся к группе малонадежных [1, 2]. Показатели их качества в первую очередь определяются величиной переходного сопротивления, которое не должно превышать сопротивление эквивалентного участка целого проводника. В процессе эксплуатации металл подвергается коррозии, что вызывает образование на контактирующих поверхностях различных пленок, приводящих к уменьшению рабочих поверхностей контакта и созданию дополнительного сопротивления [3, 4]. Для защиты металла контакт-деталей от коррозии и обеспечения незначительного и стабильного сопротивления на их поверхности наносятся антикоррозийные покрытия, что превращает контактный узел в многослойную среду.

Исследования электрических контактов из-за сложности и разнообразия вопросов осуществляются с помощью изучения протекающих в них физических процессов, природы и механизмов их отказов [3–8], а также натурных испытаний [1, 2]. Теоретические расчеты переходного контактного сопротивления получены путем решения уравнения скалярного потенциала электрического поля постоянного тока. В [5, 6] такие решения приведены для сферической и эллиптической моделей элементарного объема контактирования, а в [7–9] – для плоских контактов. Наряду с отмеченным для расчета сопротивления используются приближенные формулы [3, 5], а также статистические методы его оценки [7].

Существующие методы расчета электромагнитных характеристик, как показывает их анализ, основаны на расчете распределения электрического поля постоянного тока для простейших систем и не учитывают основных особенностей современных контактов (многослойность), работающих на переменном токе. Практически отсутствуют методы анализа поля в контактных деталях с нелинейными магнитными характеристиками.

Определять электрические характеристики контактных узлов позволяют методы расчета электромагнитных полей в многослойных анизотропных средах [10–14]. В отмеченных работах приведены формулы расчета напряженностей электрического E и магнитного H полей, а также плотности тока σ , полученные на основе решения уравнений Максвелла. Ниже рассматривается исследование отдельных интегральных характеристик электромагнитного поля плоских контактных соединений (симметричных и рубящего типа) с хромоникелевыми защитными покрытиями (рис. 1).

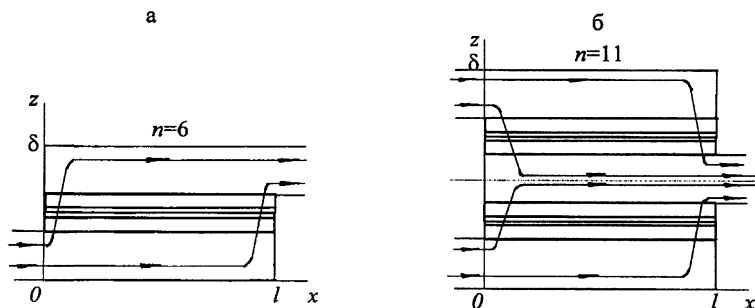


Рис. 1. а – плоские симметричные контакты; б – контакты рубящего типа

Электродинамические усилия в контакт-деталях. Состояние контактных узлов во всех случаях должно обеспечивать высокую проводимость, т. е. наименьшее возможное переходное сопротивление. Последнее обеспечивается созданием соответствующего контактного давления. Однако при протекании через соединение токов, особенно сквозных токов коротких замыканий, в нем возникают электродинамические силы, стремящиеся в отдельных случаях оторвать контактирующие проводники друг от друга. Оценку величины этих сил можно проводить на основе разработанной в [14] обобщенной двухмерной модели расчета характеристик электромагнитного поля контакта. Удельная плотность электромагнитных сил (среднее значение за период) в каждой точке многослойного контакта определяется векторным произведением вектора плотности тока и комплексно-сопряженного вектора магнитной индукции, т. е. в каждой точке i -го слоя она будет

$$\vec{f}_i(x, z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\left[\vec{\sigma}_{im}(x, z) \times \vec{B}_{im}^*(x, z) \right] \right) = \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \sigma_{imx} & 0 & \sigma_{imz} \\ 0 & B_{imy}^* & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} f_{ix}(x, z) \vec{i} + f_{iz}(x, z) \vec{k},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$;

n – общее число слоев в многослойной структуре контактного соединения;

$\vec{\sigma}_{im}(x, z)$ и $\vec{B}_{im}^*(x, z)$ – величины комплексной амплитуды вектора плотности тока и комплексно-сопряженного вектора магнитной индукции;

$$f_{ix}(x, z) = -\frac{1}{2}\mu_{yi} \operatorname{Re}\left\{\dot{\sigma}_{imz}(x, z)\dot{H}_{imy}^*(x, z)\right\} \quad (2)$$

$$f_{iz}(x, z) = \frac{1}{2}\mu_{yi} \operatorname{Re}\left\{\dot{\sigma}_{imx}(x, z)\dot{H}_{imy}^*(x, z)\right\}$$

μ_{yi} – магнитная проницаемость i -го слоя;

$\dot{H}_{imy}(x, z)$ – комплексная амплитуда вектора напряженности магнитного поля.

Расчет величин $\dot{\sigma}_{imz}(x, z)$, $\dot{\sigma}_{imx}(x, z)$, $\dot{H}_{imy}(x, z)$ и других для многослойного контакта подробно рассмотрен в [14].

Результирующие электромагнитные силы, действующие на каждый i -й слой контакта, определяются интегрированием их плотности в пределах сечения слоя, т. е.:

$$F_{ix} = -\frac{h}{2}\mu_{yi} \operatorname{Re}\left\{\int_0^{\delta_i} \int_0^l \dot{\sigma}_{imz}(x, z)\dot{H}_{imy}^*(x, z)dx dz\right\} \quad (3)$$

$$F_{iz} = \frac{h}{2}\mu_{yi} \operatorname{Re}\left\{\int_0^{\delta_i} \int_0^l \dot{\sigma}_{imx}(x, z)\dot{H}_{imy}^*(x, z)dx dz\right\}$$

где h – ширина контактного соединения;

δ_i – толщина i -го слоя контактного соединения;

l – длина контактного соединения.

Интегрирование (3) по пространственным координатам при известных напряженности магнитного поля и плотности тока в каждой точке контакта осуществляется численно. Зависимости сил от длины контактного узла приведены на рис. 2. Для рассматриваемых соединений (рис. 1) на проводники действует вертикальная сила F_z , обеспечивающая дополнительное контактное давление. Это сжимающее усилие возрастает практически по линейному закону по мере увеличения длины контакта. Результирующее значение F_z практически не зависит от толщины защитных покрытий. Наряду с силой F_z на проводники действуют горизонтальные силы F_x . Для симметричного контакта (рис. 2а, б) эти силы стремятся переместить проводники относительно один другого, а для рубящих контактов (рис. 2в, г) они действуют на все слои в одном направлении и стремятся сместить проводники и контактный узел в целом. Величина горизонтальных усилий практически не зависит от длины узла.

Величины сил, действующие на элементы контакта, существенно зависят от электромагнитных свойств проводников. Так как индукция в стали при одинаковой величине токов в 500...1000 и более раз больше, чем в алюминии, то и силы в стальных проводниках (рис. 2б, г) значительно больше. При этом распределение удельных сил по ширине железных полос (размер h) определяется распределением электромагнитного поля вдоль этого размера и расчет последних проведен с учетом линеаризации задачи

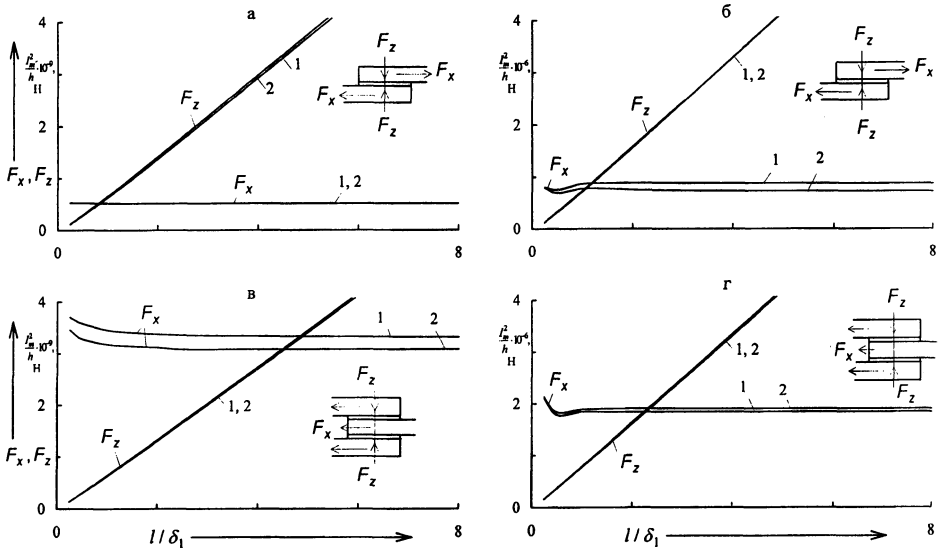


Рис. 2. Зависимости F_x и F_z составляющих усилий от длины контакта алюминиевых (а, в) и железных (б, г) проводников при различных толщинах хромоникелевых покрытий: а, в – толщина полос $\delta_1 = 10$ мм, защитных покрытий – 1,0 мм (кривая 1), 0,5 мм (кривая 2), переходного слоя – 0,001 мм; б, г – 8, 0,8, 0,4, 0,001 мм

и разделения полос по ширине на участки с соответствующими плотностями токов, как рекомендовано в [13].

Мощность потерь и сопротивление контактов. Активное сопротивление контактного соединения определяется величиной мощности потерь, выделяемой в объеме контакта. Плотность активной мощности электрического поля (джоулевы потери) в каждой точке i -го слоя контактного узла с учетом анизотропии свойств слоев выражается скалярным произведением векторов комплексной амплитуды плотности тока и комплексно-сопряженной амплитуды напряженности электрического поля, т. е.

$$p_i(x, z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\vec{\sigma}_{im}^*(x, z) \times \vec{E}_{im}^*(x, z) \right) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(\dot{\sigma}_{imx}(x, z) \dot{E}_{imx}^*(x, z) + \dot{\sigma}_{imz}(x, z) \dot{E}_{imz}^*(x, z) \right) = \frac{1}{2} \left(\sigma_{imx}^2(x, z) / \gamma_{xi} + \sigma_{imz}^2(x, z) / \gamma_{zi} \right) \quad (4)$$

где γ_{xi} и γ_{zi} – электрические проводимости слоев в направлении соответствующих координат;

$\vec{E}_{im}^*(x, z)$, $\dot{E}_{imx}^*(x, z)$ и $\dot{E}_{imz}^*(x, z)$ – комплексно-сопряженные амплитуды вектора электрического поля и его проекций.

Выражение (4) позволяет определять величину мощности потерь в каждой точке контактного узла, а, проинтегрировав его по сечению слоя и в целом по объему, можно найти соответственно мощности потерь в слоях и во всем контакте. Тогда активное сопротивление контакта рассчитывается через величину суммарных потерь по выражению

$$R_k = P_k / I^2, \quad (5)$$

где $P_k = h \sum_{i=1}^n \int_0^{\delta_i} \int_0^l p_i(x, z) dx dz$ – величина суммарной мощности потерь в объеме контактного соединения;

I – действующее значение тока, протекающего через контактное соединение.

Качество контактного соединения, как отмечалось ранее, оценивается величиной R_k по отношению к сопротивлению целого проводника длиной l , равной длине контактного соединения. Сопротивление такого проводника R_n будет рассчитываться при условии, что по нему протекает переменный ток с плотностью $\dot{\sigma}_{mx}^0(z)$, определяемый по методике [15, 16] и вызывающий величину мощности потерь в проводнике:

$$P_n = hl \int_0^{\delta} p(z) dz = \frac{hl}{2\gamma_x} \int_0^{\delta} (\sigma_{mx}^0(z))^2 dz, \quad (6)$$

где γ_x – электрическая проводимость проводника;

δ – толщина проводника.

Увеличение мощности потерь P_k по отношению к P_n , обусловленное перетеканием тока из одного проводника в другой, наличием защитных покрытий, переходного слоя, анизотропией электромагнитных свойств слоев и др., вызывает отличие сопротивлений R_k и R_n . Увеличение сопротивления контакта по отношению к R_n можно оценить по выражению

$$\Delta R_k = R_k - R_n = (P_k - P_n) / I^2. \quad (7)$$

Отмеченное иллюстрирует рис. 3. На нем для рассматриваемых контактных соединений представлены зависимости сопротивлений от длины при различной толщине защитного покрытия. Расчеты для железных проводников проводились с учетом распределения электромагнитного поля по линеаризованной модели. Результаты, полученные при исследовании контактных соединений, показывают, что сопротивления алюминиевых контактов в значительной степени обусловлены наличием защитных покрытий, поскольку проводимость последних намного меньше проводимости токоведущих полос. В этом случае потери в защитных покрытиях, вызванные перетеканием тока, заметно превышают потери в алюминиевых полосах. Уменьшение толщины покрытий приводит к снижению общих потерь в них и, следовательно, к уменьшению сопротивления контакта (кривые рис. 3а, в). Причем, чем меньше длина контакта, тем более значительно снижается его сопротивление при уменьшении толщины защитных покрытий. Сопротивления стальных контактных соединений незначительно отличаются между собой при различных толщинах защитных покрытий. В данном случае доминируют потери в токоведущих полосах и увеличение сопротивления контакта вызвано в первую очередь перетеканием в них тока. Отличие сопротивлений контакта при различных

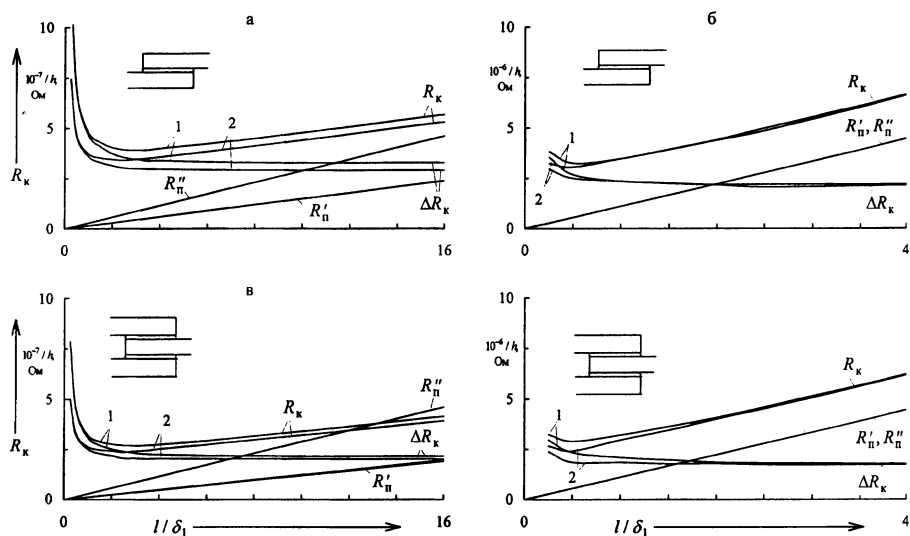


Рис. 3. Зависимости сопротивлений контактных узлов R_k , проводников с толщинами контакта R'_n и полосы R''_n и превышения сопротивления ΔR_k от длины контакта алюминиевых (а, в) и железных (б, г) проводников при различных толщинах хромоникелевых покрытий: а, в – толщина полос $\delta_1 = 10$ мм; защитных покрытий – 1,0 мм (кривая 1), 0,5 мм (кривая 2), переходного слоя – 0,001 мм; б, г – 8, 0,8, 0,4, 0,001 мм

толщинах защитных покрытий заметно проявляется только при малых длинах соединений (в этом случае потери в покрытиях становятся преобладающими). Каждому узлу определенной длины (равной примерно 2...4 толщинам токоведущих полос для алюминиевых контактов и порядка четырех глубин проникновения плоской волны для железных контактов) соответствует минимальная величина сопротивления, т. е. в таком узле выделяется минимум потерь энергии. Из рис. 3 также следует, что наибольшая величина приращения сопротивления ΔR_k присуща коротким соединениям, т. е. линейным контактам.

ВЫВОД

Для симметричных плоских разъемных контактов и контактов рубящего типа из алюминиевых и стальных проводников с хромоникелевыми покрытиями установлены величины и характер действующих на проводники электромагнитных сил, а также значение активного сопротивления при различных толщинах защитных покрытий и длинах контактного узла. Результаты проведенных исследований позволяют осуществлять рациональный выбор конструкции контактного узла (его длины и толщины защитных покрытий) на стадии проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бредихин А. М., Хомяков М. В. Электрические контактные соединения. – М.: Энергия, 1980.
2. Хомяков М. В. Испытания и контроль контактных соединений электрооборудования: Из опыта Мосэнерго. – М.; Л.: Энергия, 1964.

3. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / Н. М. Адоньев, В. В. Афанасьев, В. В. Борисов и др.; Под ред. В. В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Реутт Е. К., Саксонов И. М. Электрические контакты. Электрическая теория и практика эксплуатации. – М.: Воениздат, 1971.
5. Хольм Р. Электрические контакты / Пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. литер., 1961.
6. Омельченко В. Т. Теория процессов на контактах. – Харьков: Вища школа, 1979.
7. Дзекцер Н. Н., Висленев Ю. С. Многоамперные контактные соединения. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Юркевич В. М. Основы электрической теории контактных соединений // Электротехника. – 1999. – № 2. – С. 50–56.
9. Зингерман А. С. Сопротивление тела контакта // Электричество. – 1939. – № 6. – С. 67–69.
10. 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.
11. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А., Яковлев Г. В. Токораспределение в плоском контактно соединении разнородных проводников // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 5. – С. 13–26.
12. Электромагнитные процессы в слоистых проводниках и структурах контактных соединений / А. Н. Герасимович, Д. А. Герасимович, Г. В. Яковлев и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2. – С. 11–25.
13. Электромагнитные процессы в стальных полосовых проводниках / Герасимович А. Н., Герасимович Д. А., Яковлев Г. В. и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 3. – С. 23–37.
14. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А., Яковлев Г. В. Обобщенная модель электромагнитных процессов в плоских многослойных контактных соединениях // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 3. – С. 37–47.
15. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А. Решение краевой задачи токораспределения в шинопроводе прямоугольного профиля итерационным методом // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 3–4. – С. 3–8.
16. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А. Электромагнитное поле токопровода прямоугольного профиля // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 5–6. – С. 18–23.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 20.03.2001