



## ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

### Способ снижения электрического сопротивления разборных контактных соединений в силовых электрических цепях

Мухаметов Р. Р., инж., Перельштейн Г. Н., канд. техн. наук,  
Сарапулов Ф. Н., доктор техн. наук

**ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина”, Екатеринбург**

Описан способ уменьшения электрического сопротивления разборных контактных соединений (РКС) в силовых электрических цепях. Представлена конструкция РКС, токопередающие поверхности контакт-деталей которого прижаты друг к другу крепежными деталями, выполненными из цветного металла, и имеют защитное металлопокрытие на основе галлиевых сплавов. Поверхности крепежных деталей и крепежные поверхности контакт-деталей, соприкасающиеся друг с другом, также имеют защитное металлопокрытие.

**Ключевые слова:** разборное контактное соединение, защитное металлопокрытие, переходное электрическое сопротивление, контакт-деталь.

Разборное контактное соединение [1] относится к классу неподвижных электрических контактов, в которых замыкание и размыкание контакт-деталей может происходить без его разрушения. Электрическое сопротивление РКС можно представить в следующем виде:

$$R_{\text{РКС}} = R_{\text{к-д}} + R_{\text{пер}},$$

где  $R_{\text{к-д}}$  — собственное сопротивление контакт-деталей;  $R_{\text{пер}}$  — переходное сопротивление на участке, где соприкасаются прижатые друг к другу токопередающие поверхности.

Если рабочие поверхности РКС соединить без предварительной зачистки и обработки, то  $R_{\text{РКС}}$  в десятки раз превысит сопротивление участка токопровода такой же длины, причем  $R_{\text{пер}} \gg R_{\text{к-д}}$ , т. е. можно утверждать, что  $R_{\text{РКС}} \approx R_{\text{пер}}$ . Это объясняется наличием на рабочих поверхностях контакт-деталей оксидных пленок, которые образуются на поверхности всех металлов и часто представляют собой диэлектрик. Большое значение  $R_{\text{РКС}}$  является причиной значительных потерь электроэнергии, недопустимого перегрева РКС, а его тенденция к росту в процессе эксплуатации приводит к нестабильности электрических параметров электрооборудования и необходимости частых отключений для его ремонта и ревизии, т. е. к увеличению трудоемкости и эксплуатационных расходов.

Таким образом, эффективность эксплуатации электрических сетей и электротехническо-

го оборудования во многом зависит от надежности и экономичности многочисленных РКС, соединяющих отдельные участки электрической цепи. Поэтому разработка различных технических мероприятий, направленных на снижение  $R_{\text{РКС}}$ , всегда была и остается весьма актуальной задачей. В рамках программы энергосбережения решение этой задачи — один из эффективных путей снижения потерь электроэнергии и повышения КПД работы электротехнического оборудования.

Исследования в этой области проводятся главным образом в двух направлениях: оптимизации существующих и разработки новых конструкций РКС; поиска новых способов подготовки и обработки рабочих поверхностей контакт-деталей. Учитывая огромное количество РКС в электрических сетях, наиболее перспективны исследования, направленные на модернизацию уже используемых на действующих объектах электроэнергетики РКС без существенного изменения их конструкции.

Показателем экономичности и надежности работы РКС является стабильность  $R_{\text{РКС}}$  на уровне, соответствующем уровню при первоначальной сборке, в течение всего срока эксплуатации.

В настоящее время известно несколько способов снижения  $R_{\text{пер}}$  РКС. На практике наиболее часто используют способ нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей защитных металлопокрытий (сплавов: олово — свинец, олово — цинк, олово — медь, а

также металлов: серебра, кадмия, никеля). Их оксидные пленки имеют большую электропроводность, чем у меди и алюминия, из которых изготавливают эти контакт-детали. Критерии выбора материалов металлопокрытий и технология их нанесения подробно изложены в [2, 3]. Однако такая технология связана либо с нагревом контакт-деталей до температуры 350 – 400 °С, либо с применением специального оборудования (гальванического, электроискрового, плазменного напыления), что во многих случаях, особенно в условиях эксплуатации на действующем электрооборудовании, исключает возможность их использования. Недостатком этого способа является применение его главным образом в условиях стационарного производства на заводах — изготовителях электротехнического оборудования. Поэтому сотни тысяч РКС на ЛЭП, в контактной сети электрифицированного железнодорожного и городского транспорта, на подстанциях и в распределительных устройствах эксплуатируются без каких-либо металлопокрытий.

Известен также способ снижения электрического сопротивления РКС путем нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей защитного металлопокрытия в виде поверхностно-активных легкоплавких сплавов на основе галлия [4, 5]. Технология нанесения этого металлопокрытия позволяет применять его как в условиях монтажа, ремонта и эксплуатационного обслуживания на действующих объектах электроэнергетики, так и в условиях стационарного производства электротехнического оборудования на предприятиях.

Для снижения и стабилизации  $R_{\text{РКС}}$  широко используется также предельно простой способ уменьшения  $R_{\text{РКС}}$  путем нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей токопроводящих смазок типов “Суперконт”, “Электроконт” и многих других, разработанных в России и за рубежом [6]. Однако следует отметить, что токопроводящие смазки — недолговечные покрытия, так как имеют в своем составе жидкую фракцию, которая в процессе эксплуатации высыхает или вымораживается, после чего смазка теряет защитные свойства. Кроме того, с ростом нагрева РКС смазка пригорает к рабочим поверхностям контакт-деталей, что затрудняет при ревизии ремонт РКС.

Общим недостатком всех РКС является то, что их крепежные детали (болты, шайбы, гайки), которые обеспечивают необходимое нажатие рабочих поверхностей контакт-деталей друг к другу и имеют с ними механический контакт, практически не участвуют в процессе передачи тока. Это объясняется следующим:

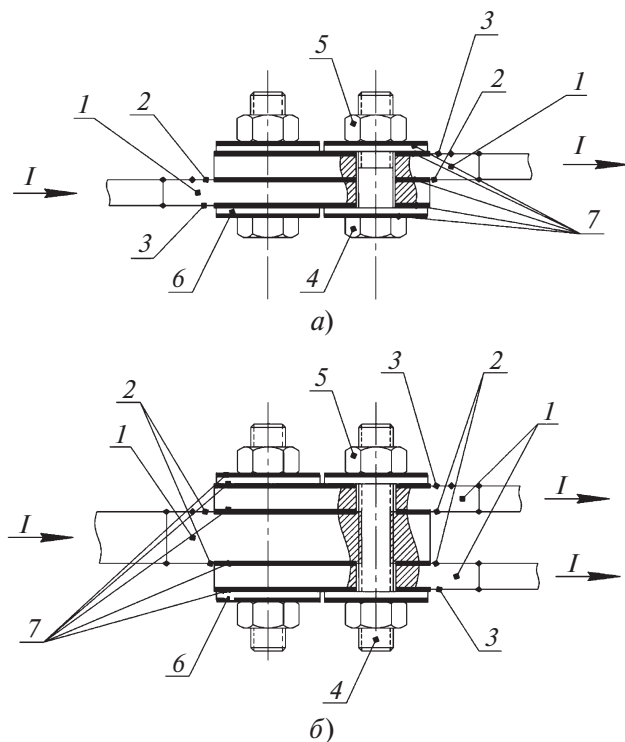
крепежные детали в РКС сделаны из стали, удельное сопротивление которой в 7 – 9 раз больше, чем меди и алюминия;

поверхности соприкосновения крепежных деталей и контакт-деталей покрыты оксидными пленками, а это значит, что между ними практически нет электрического контакта.

В данной статье предлагается снижать  $R_{\text{РКС}}$ , используя крепеж в качестве дополнительного пути для прохождения электрического тока между контакт-деталью. Эта задача решается благодаря тому, что в разборном контактном соединении на токопередающие поверхности наносят защитное металлопокрытие на основе галлиевых сплавов, а крепежные детали выполняют из цветного металла, и на их поверхности также наносят защитное металлопокрытие. В РКС с медными контакт-деталью крепежные детали изготавливают из медного сплава (латунь, бронза), а в РКС с алюминиевыми контакт-деталью — из алюминиевого сплава (дюраль). На их поверхности защитное металлопокрытие наносят по технологии, разработанной в УрФУ [7].

На рисунке, *а* и *б* показаны принципиальные схемы РКС двух типов (с болтовым крепежом и шпильками соответственно), широко применяемых в силовых электрических цепях. Из рисунка видно, что использование цветного крепежа — болта/шпильки 4, гайки 5, шайбы 6 и нанесение на поверхности его деталей (соприкасающихся с крепежными поверхностями 3 контакт-деталей) защитного металлопокрытия 7, которое создает хороший электрический контакт между ними, обеспечивает возможность протекания тока не только через рабочие поверхности 2 контакт-деталей, но и через детали крепежа. Это позволяет уменьшить общее электрическое сопротивление РКС, а следовательно, и потери электроэнергии в нем. В РКС на рисунке, *б* отверстия в одной полярности контакт-деталей 1, в которые вворачиваются крепежные шпильки, выполнены резьбовыми. При такой конструкции улучшается электрический контакт шпильки с этой контакт-деталью, кроме того, восстанавливается объем металла в отверстиях контакт-деталей, а значит, увеличивается ее сечение и снижается собственное электрическое сопротивление. В конечном итоге это способствует уменьшению полного электрического сопротивления РКС.

Эффективность работы РКС, как и любого другого электротехнического устройства, оценивается по двум показателям — экономичности и надежности. Интегральным показателем экономичности является коэффициент полезного действия РКС. Его значение полностью зависит от уровня потерь электроэнергии в



соединении, которые определяются из выражения

$$\Delta W_{\text{эл}} = R_{\text{РКС}} I^2 t,$$

где  $\Delta W_{\text{эл}}$  — потери электроэнергии, Дж;  $I$  — ток в электрической цепи, А;  $t$  — длительность протекания тока, с.

Таким образом, при прочих равных условиях потери электроэнергии, а следовательно, и КПД РКС зависят от значения  $R_{\text{РКС}}$ , Ом. Лабораторные исследования показали, что переходное электрическое сопротивление предложенной конструкции РКС на 50 – 70 % меньше, чем у РКС со стальным крепежом. Дополнительное преимущество применения цветного крепежа вместо стального — отсутствие в РКС магнитных (гистерезисных) потерь энергии на переменном токе.

Как уже отмечалось, показателем надежности РКС является сохранение стабильности его электрического сопротивления на уровне, соответствующем уровню при первоначальной сборке, в течение всего срока эксплуатации. При этом важнейшее условие — обеспечение постоянного контактного нажатия при работе в различных температурных режимах [1, 8, 9]. Указанное можно реализовать, например, применяя крепеж из материалов, имеющих коэффициент линейного теплового расширения, близкий к коэффициентам материалов (меди, алюминия и сплавов на их основе), из которых изготавливаются контакт-детали. Следовательно, применение в РКС крепежа из высо-

копрочного алюминиевого сплава (для соединения алюминиевых контакт-деталей) или из высокопрочной бронзы и латуни (для соединения медных контакт-деталей) вместо стального позволяет повысить стабильность контактного нажатия в различных температурных режимах.

Таким образом, снижение общего электрического сопротивления и повышение стабильности контактного нажатия РКС позволяет повысить их экономичность и надежность. Следует отметить, что любая модернизация электротехнического устройства, в результате которой повышается его КПД, считается оправданной, даже если она приводит к некоторому повышению себестоимости изделия. Расчеты показывают, что дополнительные расходы, связанные с заменой стального крепежа на цветной и увеличением токопередающей поверхности контакт-деталей с защитным металлопокрытием, окупаются через 6 – 12 мес. эксплуатации РКС под нагрузкой только за счет экономии электроэнергии, не считая снижения стоимости и трудоемкости эксплуатационного обслуживания. Наибольший эффект от применения предложенных РКС можно получить в силовых цепях (питания электролизеров, печей в цветной металлургии) на токи от нескольких десятков до 300 кА и более, в которых РКС содержит большое количество крепежных деталей.

### Список литературы

1. ГОСТ 14312–79. Контакты электрические. Термины и определения.
2. Мышкин Н. К., Браунович М., Кончиц В. В. Электрические контакты. — Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2008.
3. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд. — М.: Машиностроение, 2003.
4. Перельштейн Г. Н., Меренков Ю. Ф. Разборное контактное соединительное устройство (Свидетельство на полезную модель № 8530 от 16.11.1998 г.).
5. Пат. 2301847 РФ. Способ нанесения металлического покрытия на токопередающие поверхности разборных контактных соединений / Г. Н. Перельштейн, А. В. Печеркин, С. Г. Хронусов. — Оpubл. в бюл., 2007, № 18.
6. Дзекпер Н. Н., Авраменко Г. Ю. Энергетическая безопасность и повышение надежности электрических контактов. — СПб.: ООО “ИЭЦ-Контакт”, 2011.
7. Перельштейн Г. Н., Сарапулов Ф. Н. Способ повышения надежности и экономичности работы контактных соединений электротехнического оборудования. — Электротехнический рынок, 2007, № 12.
8. ГОСТ 10434–82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.
9. ГОСТ 17441–84. Соединения контактные электрические. Приемка и методы испытаний.