

УДК 621.3-1/-8

В.И. Гуменюк, А.М. Гренчук

О ВОЗМОЖНОСТИ МАССОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ПОЖАРООПАСНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

V.I. Gumenyuk, A.M. Grenchuk

ABOUT THE POSSIBILITY OF MASS USAGE OF TOOLS INTENDED FOR THE DIAGNOSTICS OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT FIRE STATE

Рассмотрены вопросы обеспечения пожарной безопасности электрооборудования в части предупреждения аварийных ситуаций, связанных с ростом переходного сопротивления контактных соединений. Предложены средства диагностики перегрева болтовых контактных соединений для их массового использования в электроустановках.

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ; ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ; ЗАЩИТА; ПЕРЕХОДНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

The problems of ensuring fire safety of electrical equipment to prevent accidents that are caused by growth of electric contacts intermediate resistances are analyzed. Tools for diagnostics of electrical contact connections overheating, which are suitable for mass usage in electrical equipment, are proposed.

FIRE SAFETY; DIAGNOSTICS; ELECTRICAL CONTACT CONNECTIONS; PROTECTION; INTERMEDIATE RESISTANCE.

Электрические контактные соединения (КС) — неотъемлемая часть электроэнергетических систем. В связи с увеличением энергонасыщенности технических объектов и повышением уровня их автоматизации особую актуальность приобретают вопросы, связанные с обеспечением пожарной безопасности, в частности диагностика и мониторинг состояния КС для выявления предпожарных ситуаций. Цель нашей работы — повышение пожарной безопасности электроустановок благодаря уменьшению трудоемкости обслуживания болтовых КС за счет разработки и массового внедрения средств визуальной диагностики.

Согласно [1] основными аварийными режимами в электросетях, приводящими к пожару, являются: короткое замыкание; перегрузка; увеличение переходного сопротивления контактных соединений; перенапряжение; работа электрооборудования в непредусмотренных конструкцией условиях.

Борьба с пожароопасным действием перегрузок, перенапряжений и токов коротких замыканий в настоящее время ведется посредством устройств защитного отключения. Однако при помощи этих устройств невозможно определить локальный перегрев элементов электроустановок, вызванный нарушением работы КС, — такого рода изменения не сопровождаются увеличением токов свыше штатных режимов работы электрооборудования. Поэтому далее будут рассмотрены проблемы, связанные с аварийным состоянием КС.

Особенность контактирования двух тел в том, что поверхность материала никогда не является идеально плоской, и если соприкасающиеся элементы абсолютно жесткие, то касание происходит не более чем в трех точках. В реальных КС из-за действия давления в контактной зоне всегда возникает пластическая или упругая деформация контактирующих элементов. Наличие деформаций обуславливает преобразова-



ние начальных точек соприкосновения в небольшие контактные поверхности и появление новых контактных пятен. Сумма соприкасающихся поверхностей составляет контактную поверхность, воспринимающую усилие, причем ее площадь всегда меньше кажущейся площади соприкосновения.

Таким образом, возникновение контакта твердых тел сводится к образованию на их поверхности проводящих участков, в результате чего в зоне контакта появляется так называемое сопротивление стягивания, вызывающее перегрев (механизмы проводимости при этом могут иметь различную природу [2, 3]). Фактическая площадь касания с точки зрения электропроводности может включать:

участки соприкосновения металлических поверхностей (образуются в результате механического разрушения окисных пленок на контактирующих поверхностях);

участки квазиметаллического контакта, покрытые тонкими адгезионными и пассивирующими пленками;

участки, покрытые органическими пленками и пленками потускнения.

Сопротивление пленок потускнения, появляющихся на соприкасающихся поверхностях в процессе эксплуатации, может превышать сопротивление стягивания в 10^7 раз. Таким образом, пленки потускнения, если они не разрушены в результате электрического пробоя, практически изолируют электрические контакты. Адгезионные и пассивирующие пленки благодаря хорошим химическим связям могут выдерживать большие механические нагрузки. Однако малая толщина таких пленок делает их проницаемыми для электрического тока в силу туннельного эффекта.

Начальная стадия развития дефекта КС может протекать, не приводя долгое время к видимым изменениям, так как свойства кластеров контактных пятен и их общее сопротивление меняются незначительно. Отрицательное влияние могут оказывать ток нагрузки, режим работы электроустановки, воздействие химических реагентов, ветровых нагрузок, начальное усилие затяжки болтов, наличие стабилизации давления контактов. Однако, если контактное сопротивление меняется, приводя к существенному локальному перегреву, то наблюдается ускоренное

ухудшение контакта из-за синергетического эффекта, проявляющегося в результате совокупного действия тепловых, химических и механических процессов. Резкое увеличение переходного сопротивления сопровождается интенсивным тепловыделением, характеризующим аварийное состояние КС.

В результате роста переходного сопротивления, а следовательно, и нагрева слой контактной смазки, препятствующий образованию пленок потускнения, испаряется. Такого рода процессы приводят к уменьшению числа и площади пятен контакта, вместе с чем происходит дальнейшее увеличение плотности тока в них. Температура последнего пятна контакта достигает температуры плавления материалов КС, и между контактирующими поверхностями образуется перешеек из жидкого металла, температура которого, повышаясь, доходит до кипения, что приводит к ионизации пространства вокруг контактного соединения. Таким образом, создаются благоприятные условия для возникновения электрической дуги и многофазного замыкания в распределительном устройстве. Электрическая дуга, перемещающаяся под действием магнитных сил, может легко стать причиной возгорания электроустановки.

По условиям эксплуатации электрическая схема электроустановки во многих случаях должна иметь возможность отделения элементов друг от друга. Вместе с тем электрические контакты — это слабое звено в любых системах распределения энергии, управления промышленными процессами и машинами. По статистическим данным [2] аварийность в электрических сетях из-за нарушения работы КС составляет 10 % общего числа аварий.

Поэтому уделяется все большее внимание обеспечению надежности и мониторингу КС, для надежной работы которых необходима определенная система для своевременного выявления неисправности и их устранения, предусматривающая приемочный и периодический контроль, уход и ремонт, выполняемые в сроки, установленные инструкциями и правилами технической эксплуатации электрооборудования. Квалифицированное проведение технического обслуживания и ремонта обеспечивает безопасную эксплуатацию КС, предотвращая аварийные ситуации и отказы электроустановок [4].

Техническая диагностика и мониторинг ставят целью прогнозировать работоспособность устройств и их компонент так, чтобы ремонт и обслуживание осуществлялись до наступления аварийных ситуаций [5].

Поскольку в любых технических устройствах со временем в результате накопления повреждений происходит ухудшение рабочих характеристик, возникает необходимость неразрушающего контроля этих процессов. Мониторинг предусматривает непрерывную либо периодическую регистрацию характеристик отдельных компонент или системы в целом. Для этих целей используются одна или несколько характеристик, дающих информацию о состоянии объекта. При этом для характеристик, исполняющих функцию предупреждения, должны быть известны критические значения, предшествующие аварийным состояниям объекта мониторинга.

Эксплуатационные испытания контактных соединений сводятся в основном к параметрическому контролю их состояния, в результате которого определяется их соответствие ПУЭ [6] или ГОСТ 10434 [7].

В зависимости от условий контроль ведется путем измерения омического сопротивления контакта либо температуры. Эти измерения в большинстве случаев проводятся в рамках системы осмотров и планово-предупредительного ремонта электрооборудования [8].

С помощью измерения сопротивления или падения напряжения при протекании рабочего тока выявляются возникающие в контакте дефекты. Контроль температуры нагрева контактов позволяет выявить дефекты на более поздней стадии развития, когда опасность аварии с контактным соединением значительно нарастает.

Температурный мониторинг электрических контактов включает контактные и бесконтактные методы. Однако для большей части болтовых КС в настоящее время применяется органолептический метод контроля, при котором визуально выявляется почернение контактов и обгорание изоляции. Такие внешние признаки характерны для поздней стадии развития дефектов, когда вероятность возникновения аварийной ситуации резко возрастает.

Во время регламентных работ для восстановления усилия контактного нажатия используется ручная подтяжка болтовых КС, не предъявляющая специальных требований к квалификации

обслуживающего персонала. Ее трудоемкость применительно к одному КС невысока, однако, учитывая большое количество таких соединений, она может занимать до 30 % трудоемкости регламентных работ по обслуживанию электрооборудования. При этом необходимость восстановления усилия затяжки резьбы возникает лишь для незначительного количества КС, свойства которых ухудшились во время эксплуатации. Таким образом, подтяжка всех КС представляется неэффективной, и электротехнический персонал, как правило, пренебрегает этой операцией, что может привести к аварийным ситуациям.

В процессе работы мы проанализировали имеющиеся на сегодняшний день методы и средства диагностики КС. В таблице систематизированы сравнительные характеристики средств диагностики болтовых КС с точки зрения возможности их массового использования электроустановках.

Внедрение технико-технологических инноваций, модифицирующих процесс диагностики предожарного состояния болтовых КС, может быть сопряжено со значительными трудностями. Наличие большого количества эксплуатируемых устройств разных производителей предъявляет повышенные требования к знанию обслуживающим персоналом технических сторон применяемых средств. Это необходимо, чтобы исключить сбои в работе и, если нужно, провести срочный ремонт узлов в условиях непрерывного производственного процесса.

Несмотря на многообразие существующих средств диагностики (см. таблицу), они не нашли применения в подавляющем большинстве электроустановок. Базируясь на анализе конструкций электрооборудования и особенностей диагностирования больших переходных сопротивлений КС, можно сформулировать следующие критерии для средств диагностики, подходящие для широкого применения:

использование средств диагностики болтовых КС не должно предусматривать изменения конструкций монтажных узлов электрооборудования и подключаемых к ним токоведущих наконечников жил кабелей;

возможность массового производства должна быть обеспечена простотой конструкции и изготовления, невысокой стоимостью (порядка стоимости КС) и удобством эксплуатации изделия;

Сравнительные характеристики средств диагностики болтовых контактных соединений

Средства диагностики болтовых контактных соединений	Достоинства	Недостатки
Термоуказатели с легкоплавким припоем	Наглядность диагностики, низкая стоимость	Являются индикаторами однократного действия, при срабатывании загрязняют полость электрооборудования
Контактные датчики температуры (термопары, термометры)	Точность температурных измерений	Сложность при обработке получаемой с датчиков информации
Бесконтактные датчики температуры (инфракрасные термометры, пирометры, инфракрасные сканеры изображений и опволоконные термометры)	Обладают быстродействием и могут быть установлены в труднодоступных или опасных для человека местах	Сложность обслуживания; предъявляют повышенные требования к квалификации электротехнического персонала
Индикаторы из сплавов с памятью формы (СПФ-индикаторы)	Наглядность диагностики, невысокая стоимость	Влияние механической обработки СПФ-материалов на температуру срабатывания индикатора
Температурные наклейки, термоиндикаторные краски и карандаши	Простота применения, невысокая стоимость	Низкая стойкость при воздействии агрессивной окружающей среды (например, морского тумана); нанесение и удаление красок требует проведения дополнительных малярных работ в полости электрооборудования
Датчики контактной нагрузки	Устройство контроля силы затяжки болта, выполненное в виде тензодатчика из фольги и установленное в отверстии внутри болта, является элементом болтового соединения	Изменение силы затяжки болтов контролируется с центрального пульта, что требует специальной сети проводов, усложняя устройство электроустановки
Ультразвуковые детекторы	Фиксируют нарушение контакта по акустическому излучению на ранних стадиях деградации	Сложность устройства; относительно высокая стоимость

критичными являются требования к размерам средств диагностики — они не должны существенно превышать габариты КС;

для обеспечения функционирования средств диагностики крайне нежелательно применение проводов и кабелей питания, так как введение дополнительных проводников в зону, подверженную дуговым разрядам, может негативно сказываться на пожарной безопасности электроустановок.

В качестве решения, удовлетворяющего перечисленным требованиям, можно предложить использовать биметаллические термоиндикаторы перегрева болтовых КС многократного действия [9, 10]. Индикаторы содержат чувствительный элемент из терробиметалла, деформирующийся в процессе нагревания. В результате температурной деформации чувствительного элемента индикатор фиксируется в аварийном положении, что при визуальном

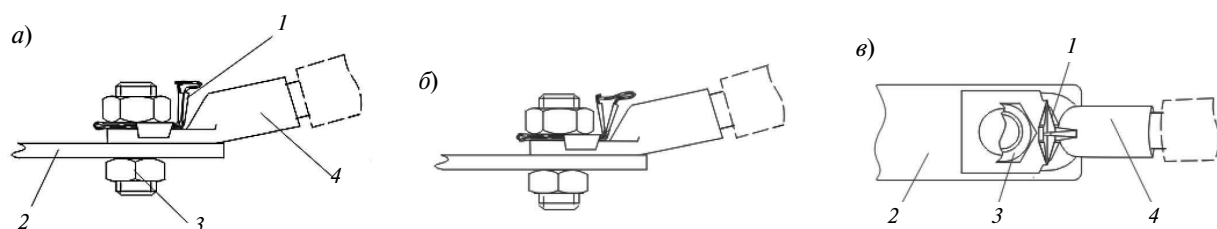


Рис. 1. Схема установки термоиндикатора в виде шайбы КС:

а — рабочее положение; б — аварийное положение; в — то же, вид сверху;

1 — чувствительный элемент индикатора; 2 — токоведущая шина; 3 — болтовое соединение; 4 — кабельный наконечник

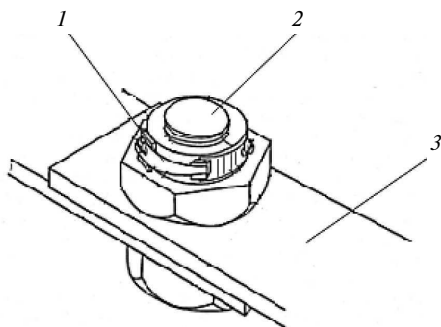


Рис. 2. Схема установки термоиндикатора в виде гайки или контргайки:
1 — чувствительный элемент индикатора;
2 — резьбовое соединение; 3 — токоведущие шины

осмотре указывает на аварийное состояние болтового КС. После соответствующего обслуживания КС (восстановление усилия контактного нажатия) чувствительный элемент принудительно возвращается в рабочее положение с целью дальнейшего использования термоиндикатора. При этом индикатор является элементом болтового соединения и устанавливается вместо шайбы (рис. 1) либо вместо гайки или контргайки КС (рис. 2).

Электрический ток через термоиндикаторы не проходит, поэтому их отрицательное влияние на электрические параметры КС отсутствует. Термобиметалл, используемый для термоиндикаторов, по химическому составу аналогичен нержавеющей стали, по электрохимическим параметрам — материалам деталей резьбового соединения. Его коррозионная устойчивость не хуже, чем у деталей КС.

Таким образом, в результате разработки средств визуальной диагностики перегрева болтовых КС решена задача обеспечения эффективности диагностирования без существенного усложнения элементов электроустановок.

Использование таких индикаторов призвано во время регламентного обслуживания электроустановок обеспечить электротехнический персонал информацией о пожароопасном состоянии болтовых КС.

Положительный эффект от использования средств диагностики обеспечит снижение суммарных затрат на мероприятия по пожаробезопасности электрооборудования, в том числе работающего в условиях воздействия вибрационных и ударных нагрузок, а также в условиях агрессивной внешней среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование пожаров, связанных с аварийным режимом работы электрооборудования: Метод. рекомендации. Красноярск: Изд-во СЭУ ФПС ИПЛ по Красноярскому краю, 2013. 22 с.
2. Бойченко В.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин. Л.: Энергия, 1978. 144 с.
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр.лит, 1961. 464 с.
4. Иванченко О.И. О болтовом соединении шин // Электрические станции. 1961. №8. С. 58.
5. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный : Интеллект, 2008.— 558 с.
6. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
7. ГОСТ 10434—82. Соединения контактные элект-

рические. Классификация. Общие технические требования. 01.01.1983.

8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭП). М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

9. Патент № 2491687 РФ. МПК H01R 4/00. Устройство для диагностики ослабления затяжки резьбового контактного соединения с токоведущим наконечником / А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. Приоритет от 11.10.2011. Бюл. изобр. 2013. № 24. 27.08.2013.

10. Патент № 2493640 РФ. МПК H01R 4/30. Устройство для диагностики ослабления затяжки гайки резьбового контактного соединения токоведущих шин / А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. Приоритет от 11.10.2011. Бюл. № 26, 20.09.2013

REFERENCES

1. Issledovaniye pozharov, svyazannykh s avariynym rezhimom raboty elektrooborudovaniya: Metod. rekomendatsiya. Krasnoyarsk: Izd-vo SEU FPS IPL po Krasnoyarskomu krayu, 2013. 22 s. (rus.)

2. Boychenko V.I., Dzektser N.N. Kontaktnyye soyedineniya tokovedushchikh shin L.: Energiya, 1978. 144 s. (rus.)

3. **Kholm R.** Elektricheskiye kontakty. M.: Izd-vo inostr.lit, 1961. 464 s. (rus.)
4. **Ivanchenko O.I.** O boltovom soyedinenii shin. *Elektricheskiye stantsii*. 1961. №8. S. 58. (rus.)
5. **Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M.** Elektricheskiye kontakty. Dolgoprudnyy : Intellect, 2008. 558 s. (rus.)
6. Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE). 7-ye izd. M.: Izd-vo NTs ENAS, 2004.
7. **GOST 10434–82.** Soyedineniya kontaktnyye elektricheskiye. Klassifikatsiya. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. 01.01.1983 g.
8. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley (PTTEP). M.: Izd-vo NTs ENAS, 2004.
9. **Patent № 2491687 RF. MPK H01R 4/00.** Ustroystvo dlya diagnostiki oslableniya zatyazhki rezbovogo kontaktnogo soyedineniya s tokovedushchim nakonechnikom./ A.I. Gorshkov, A.M. Grenchuk [i dr.]. Prior. 11.10.2011. Byul. № 24, 27.08.2013.
10. **Patent № 2493640 RF. MPK H01R 4/30.** Ustroystvo dlya diagnostiki oslableniya zatyazhki gayki rezbovogo kontaktnogo soyedineniya tokovedushchikh shin./ A.I. Gorshkov, A.M. Grenchuk [i dr.]. Prior. 11.10.2011. Byul. № 26, 20.09.2013.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНИЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

ГРЕНЧУК Андрей Михайлович — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: grenchuk@yandex.ru

AUTHORS

GUMENYUK Vasily I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

GRECHUK Andrey M. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: grenchuk@yandex.ru