

Работоспособность распределительных устройств и соответственно надежность электроснабжения потребителей во многом зависят от качества работы контактных групп. Зачастую персонал энергокомпаний, отвечающих за техническое состояние распределительных устройств, выпускает это из виду.

Наши авторы – специалисты компаний, специализирующихся на диагностике электрооборудования и экспертизе промбезопасности, напоминают коллегам о некоторых особенностях функционирования электрических контактов, что поможет на практике обеспечить стабильную работу энергоустановок.

УСИЛИЕ НАЖАТИЯ КОНТАКТОВ РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ 10–750 кВ и КРУ 6–10 кВ

Факторы надежности и методы контроля

Важнейшее условие эффективного функционирования энергокомплекса РФ – надежная работа эксплуатируемых высоковольтных распределительных устройств (РУ), что определяется как их техническими характеристиками, так и организацией эксплуатации.

Технические требования к высоковольтным РУ [1, 2, 3, 4] и опыт их эксплуатации показывают, что при обеспечении их функционирования особое внимание следует уделять вопросам технического состояния контактных групп.

Данные эксплуатации и обследований высоковольтных распределительных устройств, в частности высоковольтных разъединителей 10–750 кВ различных типов (РЛНЗ, РЛДЗ, РДЗ, РНД, РГ и пр.) и ячеек КРУ 6–10 кВ, свидетельствуют, что одна из основных причин повреждаемости – недостаточная надежность контактов и их разрегулирование в процессе эксплуатации.

При этом может происходить ослабление усилий нажатия ламелей контактов, что в свою очередь приводит к перегреву и усиленному износу контактов, вплоть до их выгорания, выхода из строя и возгорания (рис. 1). Так, по информации ФГБУ «ВНИИ противопожарной обороны» МЧС РФ, 50% возгораний электрооборудования обусловлено отказами электрических контактов.

Типичные виды дефектов контактов РУ:

- искрение, оплавление и обгорание, возможно сваривание (падение напряжение резко возрастает);
- сваривание без искрения, оплавление;
- холодное сваривание без оплавления.

К наиболее существенным факторам, влияющим на надежность эксплуатации контактов высоковольтных разъединителей 10–750 кВ и ячеек КРУ 6–10 кВ, следует отнести: режимы протекания тока, распределение токов по ламелям, перекос и смещение ламелей, переходное сопротивление между ламелями и силу нажатия контактов.

РЕЖИМЫ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА

На надежность эксплуатации контактов влияют режимы протекания тока: номинальный, короткое замыкание, размыкание контактов.

При протекании электрического тока через контакты по ним может проходить ток короткого замыкания или длительное время номинальный ток.

При длительном номинальном токе на переходном сопротивлении контакта выделяется мощность, которая вызывает нагрев контактов [5, 6]. Поэтому контакт характеризуется двумя точками (рис. 2): точкой размягчения (рекристаллизации) с параметрами U_{k1} (падение напряжения) и θ_{k1} (температура) и точкой плавления с параметрами U_{k2} и θ_{k2} (табл. 1).

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе $I_{\text{ном}}$ падение напряжения на переходном сопротивлении R_p было меньше допустимого:

$$I_{\text{ном}} \cdot R_p < U_{k,\text{доп}} = (0,5 - 0,8) U_{k1}. \quad (1)$$

При КЗ через контакты проходят токи, в 10–20 раз превышающие номинальные значения. Из-за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки практически мгновенно повышается и может достигнуть температуры плавления. Это может привести к свариванию контактов.

При размыкании контактов сила нажатия уменьшается, переходное сопротивление возрастает и растет температура точек касания [5, 6]. В момент разъединения контактов температура достигает температуры плавления и между контактами возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик взрывается и в зависимости от параметров отключаемой цепи возникает либо дуговой разряд, либо тлеющий.

При возникновении дугового разряда температура контактных пятен дуги достигает точки плавления материалов. Высокая температура контактов приводит к их интенсивному окислению, распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок. Всё это влечет за собой износ контактов. Направление эрозии и форма износа контактных поверхностей зависят от вида разряда и величины тока. Если величины тока и напряжения не превышают некоторых пороговых значений I_p и U_p , то тлеющий разряд не переходит в дуговой (табл. 2).

Основные средства борьбы с эрозией поверхности контактов:

- сокращение длительности горения дуги за счет применения дугогасительных устройств;
- устранение вибрации.

ВЛИЯНИЕ ЛАМЕЛЕЙ

Распределение тока. По ламелям могут проходить существенно различные по величине токи (до 1,5 раза) вследствие отличающихся переходных сопротивлений, заметного влияния близкорасположенного обратного токопровода, а при больших токах может сказываться скин-эффект – вытеснение тока в крайние ламели [7].

Перекос и смещение. Случаи невхождения ножа в ламели надо считать аварийными, поэтому следует говорить о максимальном смещении и перекосе, которые еще не препятствуют осуществлению контакта, однако могут сильно влиять на поведение контакта. Очевидно, что такие отклонения недопустимы, они должны устраняться при регулировке контактов и находиться в пределах допуска, обозначенного в руководстве по эксплуатации электроаппарата.

Переходное сопротивление. Сопротивление между контактирующими ламелями контакта – его важнейшая характеристика. Чем оно больше, тем больше тепловой энергии выделяется в контакте и, следовательно, тем выше его температура. Соприкосновение контактов происходит не по всей кажущейся поверхности контактирования, а лишь в нескольких ее местах, так как на поверхности контактов всегда имеются микроско-

Тимур Каюмов,
начальник службы
энергоэффективности (СЭЭФ)
Денис Федотов,
ведущий инженер СЭЭФ
Алексей Никанов,
ведущий инженер СЭЭФ
ООО ИЦ «ЭнергоРазвитие»,
г. Казань

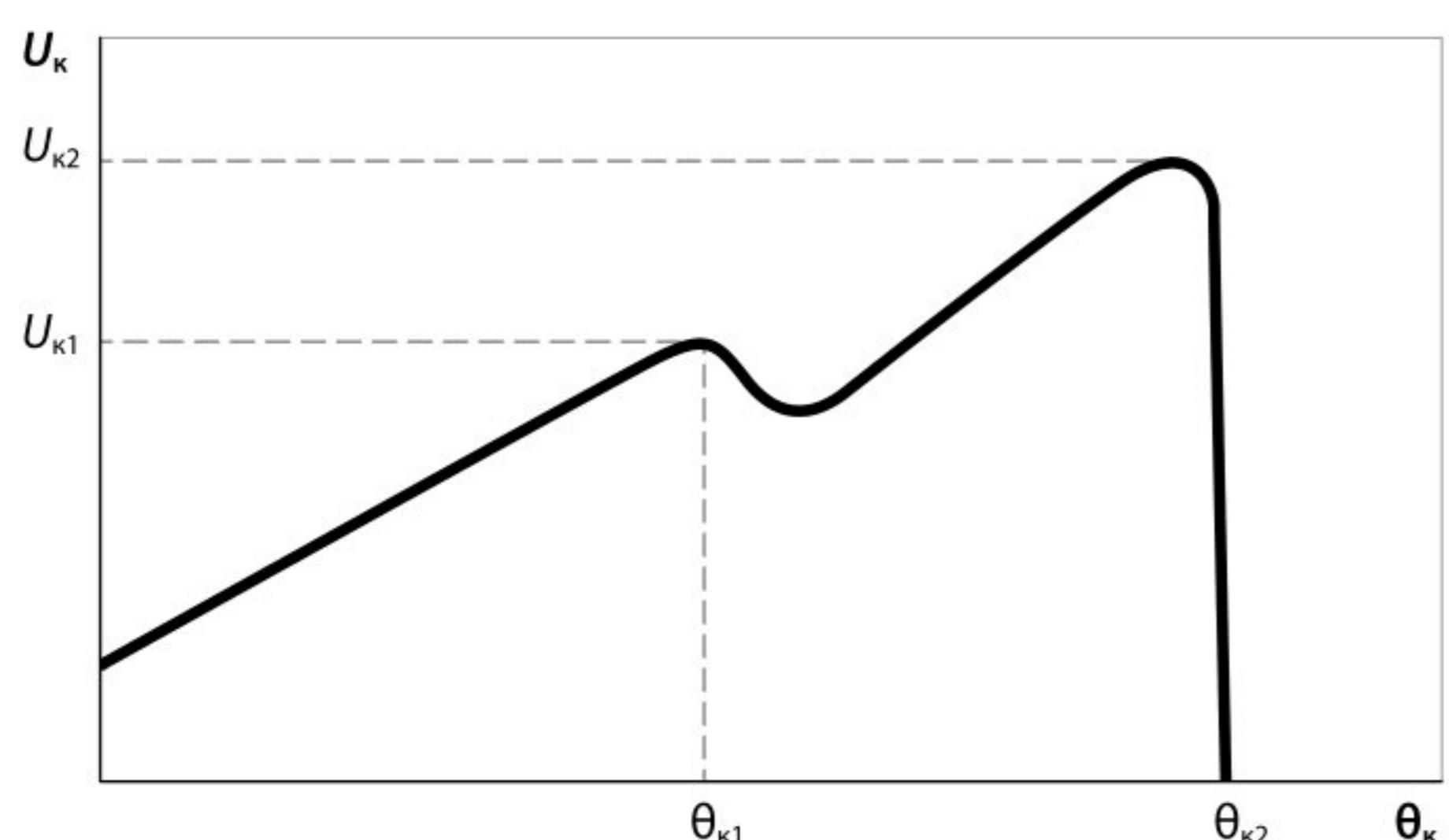
Возгорание в контактном соединении высоковольтного разъединителя по причине повышенного переходного сопротивления

Рис. 1 •



Зависимость падения напряжения от температуры

Рис. 2 •



Параметры точек рекристаллизации и плавления контактов из различных материалов Таблица 1 •

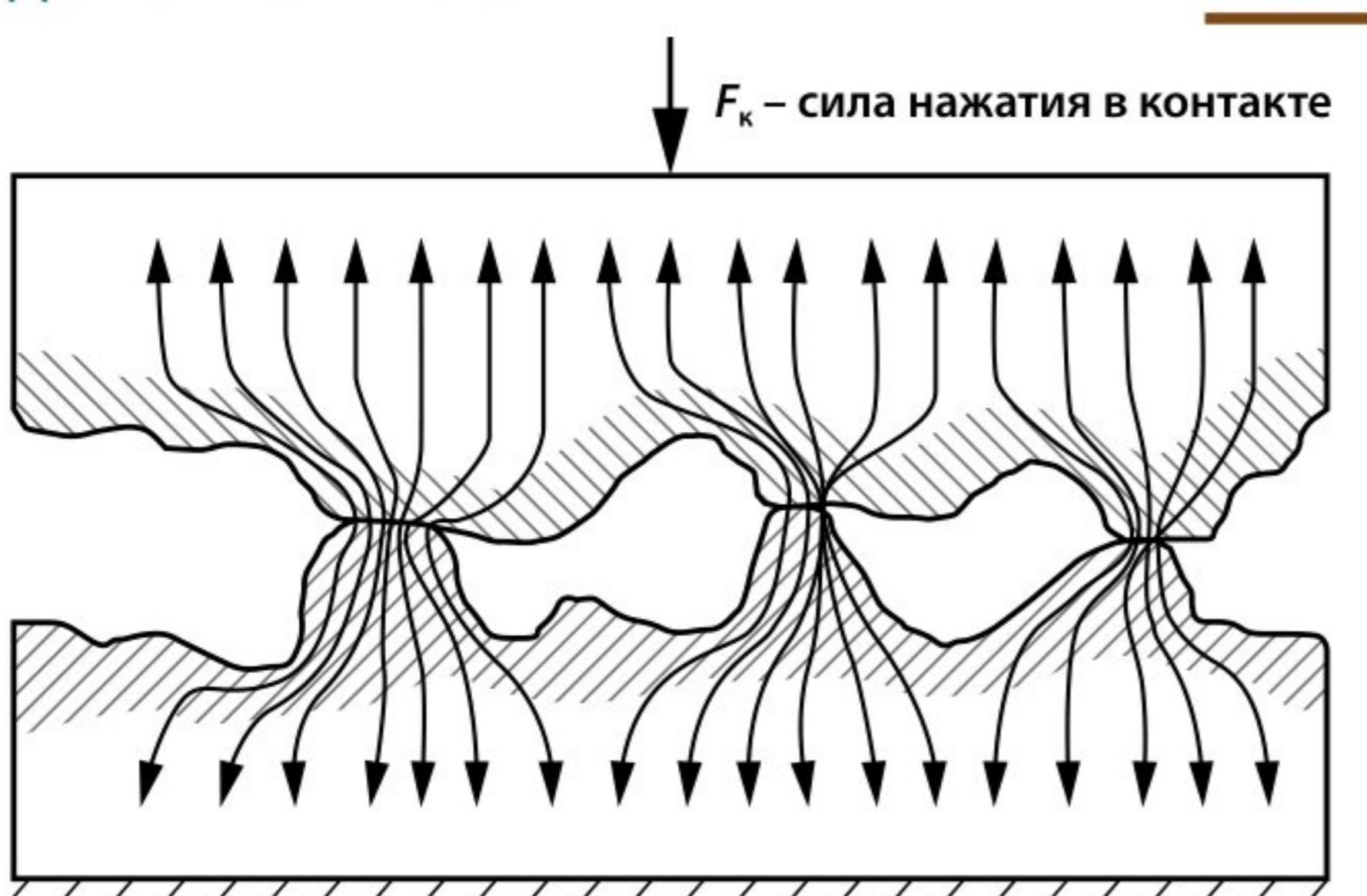
Материал	U_{k1} , В	θ_{k1} , °С	U_{k2} , В	θ_{k2} , °С
Медь	0,12	190	0,43	1083
Серебро	0,09	150	0,35	960
Алюминий	0,10	150	0,30	658
Вольфрам	0,40	1000	1,00	3370

Пограничные значения I_n и U_n различных материалов контактов Таблица 2 •

Материал	I_n , А	U_n , В
Серебро	0,4	12
Медь	0,43	12,3
Вольфрам	0,9	17

Эффект стягивания токов

Рис. 3 •



КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ

ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ И ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ПКСН-1

Прибор производства МНПП «Сигма-/О/» для контроля силы нажатия ламелей контактов врубного типа 6–750 кВ разъединителей наружной и внутренней установки серий РЛНЗ, РД(3), РГ, РНД(3), ЗРО, РВ(3) и пр., а также ячеек КРУ 6–10 кВ.



В комплекте: блок измерения, контрольный щуп на основе тензорезисторного датчика, соединительный кабель, комплект сменных частей.

Блок измерения обрабатывает сигнал, поступающий с контрольного щупа. Цифровой индикатор отображает значение усилия нормального контактного нажатия.

Диапазон контроля усилия нажатия и регулировки контактов – до 1000 Н с дискретностью 0,1 Н.

Прибор устойчив к влиянию электромагнитных полей и может использоваться в условиях ОРУ.

ПКСН-1 прост в эксплуатации, надежен, обеспечивает достоверный контроль и точное регулирование усилия нажатия в ламелях контактов.



Измерение толщины подвижной ламели контакта с помощью штангенциркуля



Отсчет усилия нажатия с помощью блока индикации

► пические выступы и впадины (микронеровности) [8]. Сужение сечения приводит к увеличению плотности тока в них, росту потерь и падению напряжения. Поэтому сопротивление контакта электрическому току превышает сопротивление сплошного проводника (рис. 3).

Переходное сопротивление очень чувствительно к окислению поверхности ввиду того, что окислы многих металлов являются плохими проводниками. Контакты также могут подвергаться воздействию агрессивной атмосферы промышленных предприятий, что может привести к быстрому росту переходных сопротивлений. Переходное сопротивление может возрасти в сотни и тысячи раз. Его величина уменьшается при увеличении измерительного тока, поэтому наиболее достоверные измерения будут при токах, близких к рабочим токам оборудования.

На основании опытных данных величина переходного сопротивления определяется как [9]:

$$R_{\text{п}} = \frac{k_{\text{nx}}}{(0,102^{F_k})^n}, \quad (2)$$

где k_{nx} – коэффициент, обуславливаемый материалом, формой контакта, состоянием поверхности;
 F_k – сила, с которой сжимаются контакты;
 n – показатель степени, показывающий число точек соприкосновения ($n = 0,5$ – для точечного; $n = 0,5–0,7$ – для линейного; $n = 0,7–1$ – для плоскостного (поверхностного) контактов).

Допустимые значения переходных сопротивлений приведены в руководстве по эксплуатации (РЭ) на электроаппарат и подлежат проверке в процессе эксплуатации.

СИЛА НАЖАТИЯ КОНТАКТОВ

Контактное сопротивление защищенного контакта связано, как указывалось выше, с силой нажатия соотношением (2).

Размеры контактной поверхности, а следовательно, и электрическая проводимость пропорциональны величине механического усилия сжатия, приложенного к контактам. Характер изменения проводимости при малых, средних и больших контактных усилиях различается, но во всех случаях сдавливание контактов ведет сначала к упругой, а затем – к пластической деформации [8, 9].

Для металлических контактов из разных материалов возрастание электрической проводимости при увеличении контактного усилия происходит по-разному: возможно резкое увеличение проводимости, замедление или прекращение увеличения.

В общем случае зависимость проводимости от сжатия имеет следующий характер: сначала разомкнутое состояние контактов, затем небольшое нажатие на них, вызывающее только упругие деформации и появление электрической проводимости за счет туннельного эффекта, и, наконец, значительные нажатия, приводящие к пластическим деформациям, сопровождающимся разрушением оксидных пленок и образованием большого числа областей проводимости. При дальнейшем увеличении сдавливающих усилий плавно или скачкообразно возрастает число областей проводимости.

Характер деформации поверхностей контактов, количество и скорость образования областей проводимости в каждом конкретном случае зависят от геометрической формы контактов, выбранных для их изготовления материалов, степени полировки поверхностей, т. е. от конструкции электроаппарата.

Таким образом, контактное нажатие в контактах РУ – это фактор, который в условиях эксплуатации наиболее сильно влияет на поведение контактов высоковольтных разъединителей 10–750 кВ различного типа и ячеек КРУ 6–10 кВ, в частности на переходное сопротивление и искрообразование. С ростом контактного нажатия растет надежность работы и длительность срока службы контактов в режиме нагревания номинальным током, а также при протекании токов короткого замыкания.

В процессе эксплуатации происходит ослабление усилий нажатия ламелей контактов, что приводит к перегреву и усиленному износу контактов вплоть до их выгорания и выхода из строя. Значительное ослабление контактного нажатия может привести к искрообразованию даже при токах меньше номинального при отсутствии смещения и перекосов ламелей.

КОНТРОЛЬ УСИЛИЯ НАЖАТИЯ

При техническом обслуживании и ремонте высоковольтных разъединителей 10–750 кВ различного типа и ячеек КРУ 6–10 кВ необходимо производить регулировку усилия нажатия в ламелях контактов, чтобы предотвратить ослабление контактного нажатия [4].

Для этих целей до недавнего времени широко использовался динамометр с набором шаблонов, размеры которых должны были соответствовать толщине подвижных ламелей контактных групп. Нажатие контактов контролировалось измерением усилия вытягивания шаблона из неподвижных ламелей контактов и последующим расчетом усилия нажатия через коэффициент трения.

Способ контроля и регулировки с помощью динамометра и набора шаблонов имеет существенные недостатки:

- наличие погрешности расчета усилия нажатия вследствие изменения коэффициента трения в ламелях контактов. Последнее зависит от большого числа причин, учесть которые для практического использования не представляется возможным. Особенно это характерно при эксплуатации в жестких условиях внешней среды;
- истирание шаблона и его покрытий при проведении операций контроля, ведущее к изменению силы трения;
- невозможность точного отсчета показаний динамометра при вытягивании шаблона из неподвижных ламелей контактов, когда движение шаблона происходит рывками и пр.

Эти недостатки не позволяют достоверно контролировать силу нажатия в ламелях контактов. Поэтому на основании анализа существующих методов и технических средств рекомендуется к применению метод контроля усилия нажатия непосредственно в ламелях контактов, например с помощью прибора ПКСН-1 производства МНПП «Сигма-/О/».

Прибор обеспечивает контроль усилия нажатия в отдельной паре ламелей контактов врубного типа (контакт электрической цепи, образующийся введением плоской контакт-детали между двумя контакт-деталями пружинящего типа) на отключенных разъединителях 10–750 кВ и в ячейках КРУ 6–10 кВ.

Использование такого прибора, например для регулировки контактов, позволяет снизить аварийность в работе разъединителей благодаря двум факторам:

- исключается повреждение контактов из-за перегрева при недостаточном усилии нажатия;
- снижается повреждаемость опорно-стержневых изоляторов, связанная с увеличением механической нагрузки при включении и отключении разъединителя (нагрузка растет из-за повышения усилия нажатия и, соответственно, усилия при коммутационных переключениях разъединителем).

Тепловизионный контроль разъемных контактных соединений после ремонта электрооборудования позволяет убедиться в качестве регулирования контактов разъединителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52726-2007. Разъединители и заземлители переменного тока на напряжение свыше 1 кВ и приводы к ним. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007.
2. ГОСТ 14693-90. Устройства комплектные распределительные негерметизированные в металлической оболочке на напряжение до 10 кВ. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1990.
3. ГОСТ Р 55190-2012. Устройства комплектные распределительные в металлической оболочке (КРУ) на номинальное напряжение до 35 кВ. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2012.
4. Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть. Ч. 2. М.: СПО ОРГРЭС, 2002. 5-е изд., перераб. и доп. 160 с.
5. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 464 с.
6. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
7. Дзекцер Н. Н., Висленев Ю. С. Многоамперные контактные соединения. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
8. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
9. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2008. 559 с. ■