

Перспективный способ диагностирования аварийных режимов в кабельных изделиях с помощью рентгеновской дефектоскопии

Ю.П. Черничук, заместитель начальника Судебно экспертного центра федеральной противопожарной службы по городу Москве;

Н.Н. Потрахов, доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Известно, что кабельная продукция может иметь отношение к причинам возникновения пожаров, так как при определенных условиях в ней возникают аварийные режимы, тепловые проявления которых достигают пожароопасных величин [1,2]. Если в результате возникновения аварийного режима произошел пожар, то крайне важно точно знать — какой именно аварийный режим имеет прямое отношение к причине возникновения пожара. Если это короткое замыкание (далее КЗ), то, возможно, оно произошло из-за ошибок при проектировании или из-за наличия дефектов в кабельной продукции. Тогда ответственность за убытки по пожару будут нести или проектировщики, или изготовители кабельной продукции. Если же это токовая перегрузка (далее ТП), то, возможно, она возникла в результате подключения чрезмерного количества электропотребителей, или в результате дополнительных токов утечки в местах возникших дефектов кабельных изделий. Тогда ответственность за убытки будут нести либо потребители электроэнергии, либо электромонтажные организации. Понятно, что вариантов причин возникновения аварийных режимов и ответственности по убыткам от пожаров, возникающих по электротехническим причинам, достаточно много, но все они в конечном итоге зависят от вида аварийного режима.

В настоящее время для определения причастности тепловых проявлений электрического тока к источнику зажигания используется широкий спектр разработок ФГУ ВНИИПО МЧС России, ФГУ ЭКЦ МВД России, АГПС МЧС России. Все они сводятся к проведению исследования с помощью целого ряда инструментальных методов [3-5], и ключевым моментом в этой работе является решение диагностической задачи, заключающейся в определении природы термического повреждения и механизма возникновения аварийного режима. С этой целью используется визуальное исследование, металлография, рентгенография.

Практика Судебно-экспертного центра федеральной противопожарной службы по городу Москве (далее СЭЦ ФПС по г. Москве) по исследованию пожаров свидетельствует о том, что, если в процессе исследования ограничиться только теми признаками, которые изложены в рассмотренных выше методиках и методических рекомендациях, то можно допустить ошибку [6]. К примеру, оплавления жил, которые произошли в результате аварийного режима работы, по внешним признакам можно принять как оплавления вследствие теплового воздействия пожара и не проводить дальнейшие исследования инструментальными методами. И наоборот.

Проведенными одним из авторов экспериментами по нагружению жил проводов токами перегрузки было установлено, что оплавления, образующиеся в результате разрушения жил, по внешним признакам схожи с оплавлениями от КЗ. И вообще, учитывая непредсказуемость параметров и последствий того или иного аварийного режима в электросетях, нельзя достоверно диагностировать их лишь по визуальным признакам повреждений токопроводящих жил кабельной продукции. Ведь кабельное изделие представляет собой сложную конструкцию [7], каждый элемент которой по-своему реагирует на тот или иной аварийный режим и на нем остаются особые следы.

К примеру, изоляция жил обугливается изнутри по всей длине провода при ТП, а при КЗ — локально, в непосредственной близости к месту короткого замыкания. Принцип понятен, но для того чтобы это проверить, нужно разрушить (или частично разрушить) объект исследования, что в судебной и экспертной практике не приветствуется. Принято доверять данным, которые получают инструментальными методами без изменения исходного состояния и свойств объекта, когда обеспечивается возможность повторного исследования. Это явилось основанием для поиска путей совершенствова-

ния существующих методов диагностики аварийных режимов [8,10].

В настоящее время в СЭЦ ФПС по г. Москве для диагностирования короткого замыкания в электропроводах разработан и успешно применяется в экспертной практике метод дефектоскопии проникающим излучением. Это стало возможным благодаря появлению на рынке соответствующего нового криминалистического оборудования с микрофокусными рентгеновскими трубками.

Под дефектоскопией проникающим излучением понимают метод обнаружения рентгеновским и гамма-излучением внутренних дефектов в изделиях без их разрушения. Этот метод основан на различной поглощаемости излучения веществом.

Микрофокусная рентгенография — как вид рентгенографического метода диагностики является новой методикой исследования, которая с успехом применяется в медицине и, в частности, в стоматологии [11], однако ранее в практике пожарно-технических исследований не применялась. Преимущества этого вида исследований на специализированных аппаратах с микрофокусной трубкой очевидны. Особенно это важно для выявления мелких и малококонтрастных деталей изображения, что имеет первостепенное значение в экспертных исследованиях. Одним из первых отечественных микрофокусных аппаратов¹ являлся аппарат «Реис-25» на напряжение 25 кВ (рис. 1).

Аппарат стационарный с ручным регулированием параметров работы рентгеновской трубки и позволяет получать снимки как цифровые², так и фотометодом³.

Впервые для целей пожарно-технических исследований аппарат начал применяться в СЭЦ ФПС по г. Москве [9,12], начиная с 2007 года. Это стало возможным, прежде всего, благодаря значительному прогрессу отечественного микрофокусного рентгеноаппаратостроения. В настоящее время разработаны и освоены в серийном производстве оригинальные рентгеновские трубки на напряжение 50-150 кВ и выше. Основными отличительными особенностями конструкции этих трубок является использование прямокального катода V-образной формы и вынесенного анода трубки с мишенью прострельного или массивного типов. Указанные трубки позволяют на практике реализовать современные высокоинформативные малодозовые методики



Рис. 1. Рентгеновский аппарат «Реис-25»

оперативной и мобильной рентгенодиагностики в области пожарно-технической экспертизы. Разработаны и широко используются для питания описанных рентгеновских трубок высоковольтные источники с частотой преобразования напряжения 50-100 кГц и более. Современные принципы построения высоковольтных схем, включая ключевой режим работы преобразователя, широтноимпульсную или частотноимпульсную модуляции, многокаскадное умножение напряжения, позволили создать компактные конструкции микрофокусных источников рентгеновского излучения семейства ПРАДУС. Благодаря небольшим габаритам и весу, а также низкой экспозиционной дозе излучения, рентгенодиагностические аппараты, созданные на основе указанных источников излучения, могут быть использованы как в лабораторных условиях, так и в полевых — непосредственно на месте происшествия. Здесь следует отметить, что создание таких аппаратов — это Российский приоритет, так как в настоящее время в экспертной практике ни один из зарубежных аналогов не может сравниться по раз-

¹ Микрофокусный рентгеновский аппарат — аппарат, размер фокусного пятна рентгеновской трубки которого по ГОСТ 22091.9-86 составляет менее 0,1 мм (100 мкм).

² Цифровые рентгеновские снимки — снимки, полученные с помощью цифровых приемников изображения.

³ Рентгеновские снимки фотометодом — когда приемником изображения является фотопленка.

решающей способности с отечественными микрофокусными аппаратами семейства «ПАРДУС».

В СЭЦ ФПС по г. Москве успешно применяется портативный вариант этого семейства — аппарат «ПАРДУС-Р» (рис. 2). В этом аппарате нашли свое применение практически все современные достижения науки и техники, направленные на высокоэффективную диагностику [13,14].



Рис. 2. Внешний вид портативного рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р»

Существенным шагом, значение которого в развитии рентгенодиагностической аппаратуры трудно переоценить, явилось широкое внедрение микропроцессорной техники. С помощью высокопроизводительных контроллеров и эффективных языков программирования были реализованы достаточно сложные алгоритмы управления режимами работы рентгеновской трубки.

Важную роль в совершенствовании рентгенодиагностической аппаратуры сыграло внедрение цифровых методов визуализации рентгеновских изображений. Традиционная пленочная технология в ряде случаев не позволяет воспользоваться всем ресурсом диагностической информации, заключенной в так называемом первичном рентгеновском изображении, полученном с помощью микрофокусного источника излучения. Это обусловлено достаточно высоким процентом брака микрофокусных снимков вследствие недо- или переэкспонирования. Еще один недостаток пленочной технологии — применение химических реактивов обработки пленки и связанные с этим определенные неудобства, потребность лабораторных условий и значительного промежутка времени. Современные цифровые приемники рентгеновского изображения позволяют в большинстве случаев практически полностью скорректировать последствия неправильного выбора экспозиции съемки. При этом относительно низкая, в сравнении с пленкой, разрешающая способность

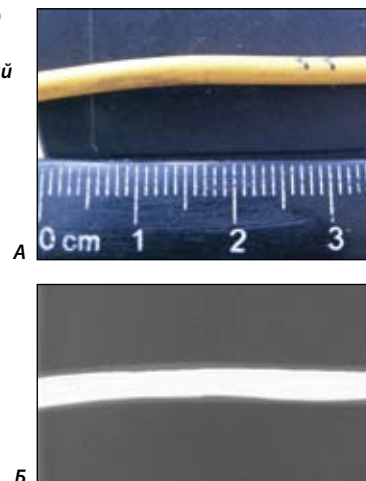
таких приемников практически не сказывается на качестве снимков, благодаря возможности получения резких увеличенных изображений способами микрофокусной рентгенографии.

Применительно к исследованию следов КЗ в электропроводах особый интерес вызывают объекты, могущие иметь включения железа, меди («дефекты» вещества объекта), которые являются кристаллическими веществами и в зависимости от индивидуальных особенностей кристаллической решетки в разной степени влияют на процесс рассеяния и поглощения рентгеновского излучения. В соответствии с периодической системой элементов Д.И. Менделеева порядковые номера этих металлов 26 и 29 соответственно. Следовательно, при прочих равных условиях интенсивность поглощения рентгеновского излучения при прохождении объектов, состоящих из этих металлов, будет разная — минимальная у состоящих из железа и максимальная у состоящих из меди.

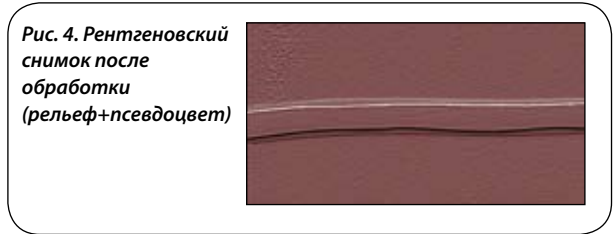
Для изготовления изоляции проводов чаще всего используют поливинилхлоридный пластикат, а для изготовления различного рода корпусных деталей — полистирол [7,15], которые являются аморфными веществами [16]. Отсутствие у этих материалов кристаллической решетки делает их практически прозрачными для рентгеновского излучения и степень их ослабления, в основном, зависит от линейного коэффициента поглощения вещества и, следовательно, определяется толщиной объекта.

Таким образом, при съемке объекта исследования (рис. 3, А), который состоит из меди и поливинилхлорида (например, участка электропровода), на снимке очертания включений этих материалов в исследуемом объекте будут четко видны (рис. 3, Б).

Рис. 3. Внешний вид участка провода А и его рентгеновский снимок Б



На рентгеновском снимке (условия съемки $U = 60$ кВ, $I = 100$ мкА, $t = 0,50$ с) рис. 3 Б видны очертания жилы и ее изоляции, но не достаточно очевидно. Применение программных возможностей обработки рентгеновских изображений позволяют значительно улучшить информативность изображения для исследовательских целей (рис. 4 — тот же снимок после обработки).



В рамках пожарно-технической экспертизы применение микрофокусной рентгенографии позволяет решать вопросы, связанные с определением природы оплавлений на токопроводящих жилах проводов.

Результаты экспериментов с изолированными жилами позволили предположить, что часть частичек раскаленного металла (рис. 5), образующихся в процессе КЗ (рис. 6), внедряются в обугленную часть изоляционного слоя.



При этом следует отметить, что при тепловом воздействии пожара и ТП разрушение жил не сопровождается взрывообразным разбрызгиванием частичек металла, как это происходит при КЗ. Следовательно, наличие в обугленной изоляции мелких частичек меди можно использовать как надежный диагностический признак, характеризующий процесс КЗ. Для проверки возникшего предположения были проведены эксперименты с применением микрофокусного рентгеновского аппарата РЕИС — 25 (рис. 7).

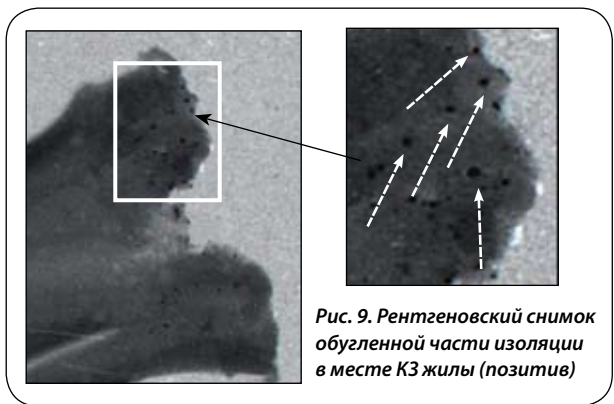
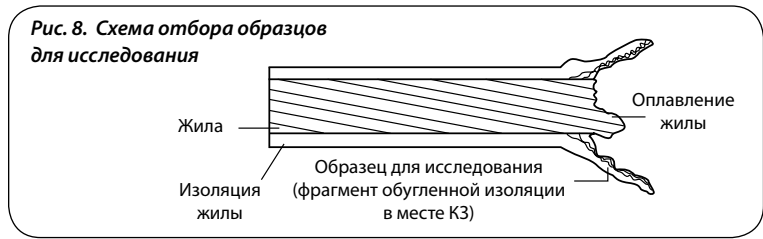
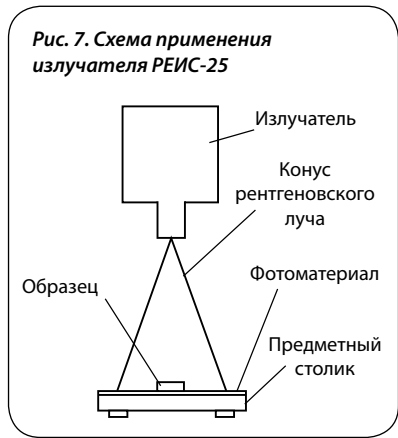


В качестве образцов использовались фрагменты изоляции проводов с термическими повреждениями, вызванными термическим действием тепловых эффектов КЗ. Образцы отбирались в соответствии с рис. 8.

В качестве контрольного образца использовался фрагмент изоляции без термических повреждений.

В результате экспериментов получен ряд снимков (рис. 9 и 10).

На рис. 9 видно множество мелких вкраплений медных частичек различных размеров и, примерно, округлой формы, которые группируют-



ся практически по всей зоне термического повреждения изоляции жилы. В контрольном образце жилы таких вкраплений не обнаружено (рис. 10). С места пожара был изъят участок электропровода с оплавлениями на жилах. Изоляция жил в месте их разрушения сохранилась (рис. 11).

Рис. 10. Рентгеновский снимок контрольного образца изоляции (позитив)



Рис. 11. Внешний вид образца электропровода

По внешним признакам (по признакам, изложенным в методических рекомендациях [1-5]) предполагалось, что оплавления жил произошли в результате КЗ. Исследование проводилось с помощью рентгенодиагностического комплекса в составе аппарата «Пардус-Р» и устройства визуализации «Рентгеновидеограф» с целью обнаружения вкраплений меди в сохранившейся обугленной изоляции провода. Условия съемки: $U=60$ кВ, $I=100$ мкА, $t=0,50$ с. В результате был получен рентгеновский снимок рис. 12 (с вариантами программной обработки). Анализом рентгеновского снимка наличия вкраплений меди обнаружено не было. Для более детального исследования в рассматриваемом случае также были применены программные возможности обработки изображения, однако вкрапления меди, являющиеся признаком взрывообразного разрушения жилы при КЗ, так и не были обнаружены.

Следовательно, оплавления жил не являются следствием КЗ.

Выше было отмечено, что внешняя форма оплавления жилы не всегда является определяющей при установлении его природы. И это в очередной раз подтверждается практикой исследования пожаров.

Так, в одном из частных домов произошел пожар. В процессе исследования очага пожара в нем было обнаружено множество участков электропроводов с различными термическими повреждениями. Среди них были обнаружены проводники, у которых в месте разрушения жил сохранилась изоляция. Осо-

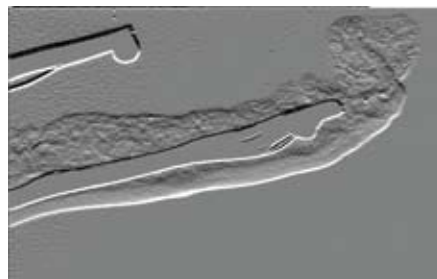
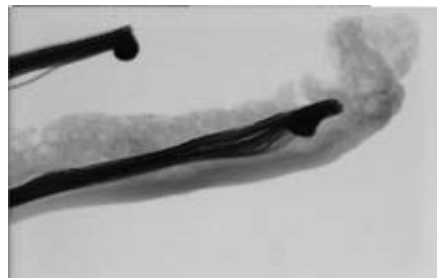


Рис. 12. Рентгеновские снимки (без обработки и с программной обработкой)

бый интерес в рамках данного исследования вызвал один участок электропровода, у которого в месте разрушения жилы изоляция была локально обуглена, а жила имела оплавление, которое по внешним признакам нельзя было признать как следствие КЗ. В связи с этим, после визуального осмотра было принято решение применить метод дефектоскопии. При этом также применялся рентгенодиагностический комплекс на основе аппарата «ПАРДУС-Р». Условия съемки: $U=60$ кВ, $I=100$ мкА, $t=0,50$ с. В результате получен рентгеновский снимок (рис. 13).

Рис. 13. Рентгеновский снимок изоляции жилы в месте ее оплавления



Как видно на снимке в обугленной изоляции имеются многочисленные вкрапления мелких частиц меди, которые однозначно характеризуют процесс разрушения жилы в результате КЗ. Следовательно, разрушение токопроводящей жилы на данном участке электропровода произошло именно от КЗ.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что метод микрофокусной рентгенографии с применением рентгеновского аппарата «ПАРДУС-Р» можно успешно использовать для диагностики природы оплавлений на жилах кабельных изделий как надежный и информативный неразрушающий экспресс-метод.

Литература

1. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах. М.: Энергоиздат, 1984.
2. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М.: ООО «Кабель», 2009. 328 с.
3. Смелков Г.И., Александров А.А., Пехотиков В.А. Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электрических устройствах. М.: Стройиздат, 1980.
4. Митричев Л.С., Колмаков А.И., Степанов Б.В., Россинская Е.Р., Вртанесьян Э.В., Зернов С.И. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия. М.: ВНИИ МВД СССР, 1986.
5. Воронов С.П., Булочников Н.М., Черничук Ю.И., Москвич С.В. Исследование медных проводников с целью установления признаков очага пожара // Сборник научных трудов ВНИИПО. М.: ВНИИПО. С. 227—228.
6. Зернов С.И., Черничук Ю.П. Проблемы применения и совершенствования методик исследования следов короткого замыкания при установлении причин пожаров автомобилей. Актуальные вопросы судебных экспертиз: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск: ГОУ ВПО «Восточно-Сибирский институт МВД России», 2007.
7. Белорусов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. М.: Энергоиздат, 1987, 420 с.
8. Зернов С.И., Черничук Ю.П., Лазаренко А.В. Возможности совершенствования методик инструментальных исследований при установлении причин пожаров в легковых автомобилях. Исторические и современные аспекты решения проблем горения, тушения и обеспечения безопасности людей при пожарах: Материалы XX международной научно-практической конференции, посвященной 70-ти летию создания института. Секция 1. М.: ВНИИПО, 2007.
9. Черничук Ю.П., Сидохин Е.Ф. Определение природы оплавлений на жилах электропроводов электросистемы автомобиля с помощью рентгеновского излучателя РЕИС-25. Пожарная безопасность, 2008, №1.
10. Черничук Ю.П., Москвич С.В., Языкова А.В. Необходимость и возможности совершенствования методик инструментальных исследований при установлении причин пожаров // Право и научно-технический прогресс: материалы научно-практической конференции. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. С.119—121.
11. Потрахов Н.Н. Микрофокусная рентгенография в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 181 с.
12. Черничук Ю.П., Языкова А.В. Применение метода рентгеноскопии для определения природы оплавлений на медных жилах электропроводов // Право и научно-технический прогресс: материалы научно-практической конференции. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. С. 122—126.
13. Патент РФ на изобретение № 2284148. Способ получения рентгеновских снимков при рентгенологических исследованиях. 27.09.2006.
14. Патент РФ на изобретение № 2278440. Моноблок источника рентгеновского излучения. 20.06.2006.
15. Энциклопедия полимеров. В 3-х т. М.: Советская энциклопедия. С. 516, 576, 612, 1072-1977.
16. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы. Свойства и применение. Справочник. Л.: Химия, 1982. 317 с.

Рецензия

на статью «Перспективный способ диагностирования аварийных режимов в кабельных изделиях с помощью рентгеновской дефектоскопии» Ю.П. Черничука, Н.Н. Потрахова

Тема рецензируемой статьи актуальна: внедрение разрабатываемых приборов и методики анализа пожаров, возникающих по различным причинам, в значительной степени сократит сроки беспредметных дискуссий, возникающих часто между производителями кабельной продукции низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения, проектирующих и эксплуатирующих организаций.

Пробой твердой изоляции кабелей в микро-, милли- и секундном диапазонах имеет различную физическую природу, и его анализ в значительной степени поможет техническим специалистам.

Халилов Ф.Х., главный научный сотрудник СПбГПУ, действительный член Академии электротехнических наук РФ, доктор технических наук, профессор.