

ПРИЧИНЫ ПРОБОЯ КОНЦЕВЫХ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ МУФТ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

CAUSES OF FAILURE OF TERMINATIONS AND JOINTS OF MEDIUM VOLTAGE CABLES

S.S. Vetlugaev, *Cand. Sc. (Engineering), Senior Research Scientist, JSC VNIIEK;*
P.V. Fursov, *Cand. Sc. (Engineering), Leading Research Scientist, JSC VNIIEK;*
V.L. Ovsienko, *Cand. Sc. (Engineering), Deputy Division Manager, JSC VNIIEK; Corresponding Member of the Academy of Electrotechnical Sciences of the RF;*
L.E. Makarov, *Cand. Sc. (Engineering), Leading Research Scientist, JSC VNIIEK*

С.С. Ветлугаев, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «ВНИИЭП»;*
П.В. Фурсов, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИЭП»;*
В.Л. Овсиенко, *канд. техн. наук, заместитель заведующего отделением ОАО «ВНИИЭП», член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ;*
Л.Е. Макаров, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ВНИИЭП»*

Аннотация. В статье рассмотрены основные причины выхода из строя концевых и соединительных муфт кабелей среднего напряжения.

Ключевые слова: муфта, регулирование поля, электрический пробой, частичные разряды, ошибки монтажа, среднее напряжение, концевая муфта, соединительная муфта

Abstract. The main causes of failure of terminations and joints for medium voltage cables are considered.

Key words: coupling, electric field regulation, electric breakdown, partial discharges, installation errors, medium voltage, termination, joint.

При проектировании и сооружении кабельных линий не всегда уделяется должное внимание выбору конструкций и особенностям монтажа соединительных и концевых муфт кабелей. Несмотря на то, что муфты кабелей среднего напряжения составляют незначительную долю от стоимости кабельной линии (до 10%), они являются ключевым элементом, обеспечивающим надёжную работу оборудования. Ликвидация последствий выхода из строя линии по причине ненадёжных муфт может значительно превышать их стоимость. Причины пробоя муфт, смонтированных на кабелях среднего напряжения, вызывают наибольший интерес у организаций, эксплуатирующих кабельные линии (КЛ), поскольку такие муфты применяются во всех отраслях промышленности РФ.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследования причин выхода из строя концевых и соединительных муфт среднего класса напряжения, которые за последние 7–10 лет были исследованы в лабораториях ОАО «ВНИИЭП» в рамках договоров с эксплуатирующими организациями из разных регионов РФ.

Ознакомление с конструкциями муфт и особенностями их монтажа проясняет возникновение возможных повреждений муфт в эксплуатации.

Особенности конструкций муфт. До 90% муфт кабелей среднего напряжения, устанавливаемых на кабелях с бумажной пропитанной и пластмассовой изоляцией, монтируются по технологии термической усадки, когда отдельные элементы этих муфт под воз-

*Материал поступил в редакцию 7.04.2023
 Автор, ответственный за переписку: Макаров Л.Е.
 E-mail: l.makarov@vniiekp.ru*

действием нагрева (газовой горелкой или техническим феном) изменяют поперечные размеры в два и более раза.

Отдельно следует сказать о регулировании напряжённости электрического поля в монтируемых муфтах. Известно, что в месте среза полимерного экрана по изоляции кабеля наблюдается повышенная плотность силовых линий электрического поля (рис. 1). При этом напряжённость электрического поля в месте среза экрана имеет значительное превышение над напряжённостью на остальной части разделки изоляции. Этого уровня напряжённости поля достаточно для ионизации воздуха на поверхности изоляции кабеля и для развития поверхностных разрядов.

Кроме того, даже малейший надрез или любые воздушные включения в этой области приводят к возникновению частичных разрядов, которые значительно сокращают срок службы кабеля и могут привести к электрическому пробую.

Для снижения напряжённости поля у среза экрана по изоляции на поверхность изоляции кабеля наносится слой специального полимерного материала. Для этой цели применяют два типа композитных материалов [1].

В материале первого типа очень точно подбирается удельное объёмное электрическое сопротивление. Применение такого материала позволяет снизить напряжённость у среза экрана до уровня, который обеспечивает надёжную длительную работу муфты (рис. 2). Полимерные материалы по этой технологии смешиваются с мелкодисперсной газовой сажей в строго определённой пропорции для того, чтобы получить удельное объёмное сопротивление заданного уровня (обычно 10^9 – 10^{12} Ом·см).

Это позволяет ограничить напряжённость на срезе экрана по изоляции и более равномерно распределить её по длине муфты. Результирующее поле зависит от проводимости материала и ёмкости изоляции кабеля.

В материале второго типа распределение напряжённости электрического поля обеспечивается слоем материала с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Электрическое сопротивление этого материала зависит от напряжённости электрического поля (рис. 3).

Данная технология основана на применении композитного материала с введением в него оксида цинка (ZnO) – материала с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Слой оксида цинка работает как варистор и меняет свою проводимость в зависимости от приложенного напряжения. Использование нелинейного материала позволяет снизить напряжённость поля на меньшей длине, чем при применении материала первого типа и, следовательно, получить муфту меньшей длины.

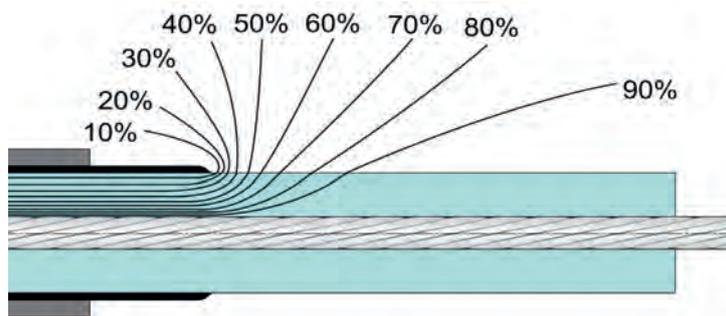


Рис. 1. Силовые линии электрического поля у среза экрана по изоляции

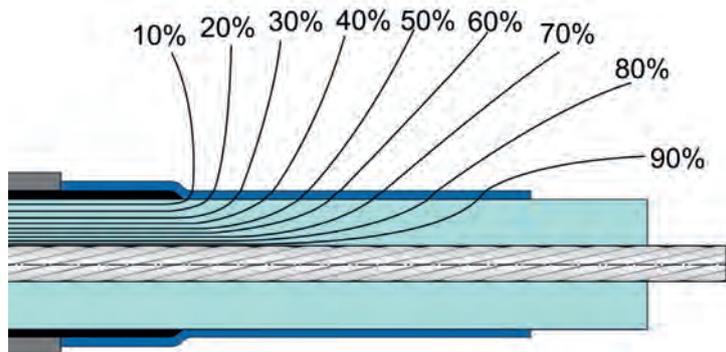


Рис. 2. Распределение поля у края экрана в случае применения материала с заданной проводимостью

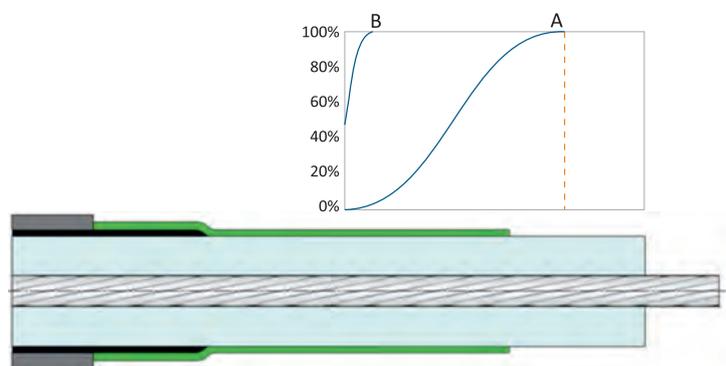


Рис. 3. Распределение напряжённости поля у среза экрана при нанесении на поверхность изоляции кабеля нелинейного материала (А) и в случае его отсутствия (В)

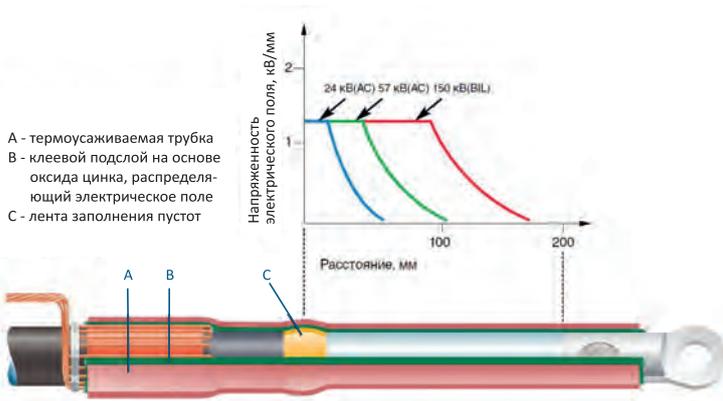


Рис. 4. Муфта с композитной трубкой и лентой для заполнения пустот

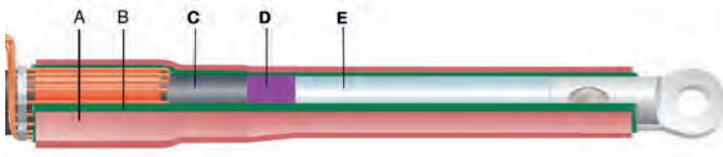


Рис. 5. Муфта с композитной трубкой и покрытием части поверхности изоляции кабеля электропроводящей краской: А – термостойкая трубка; В – клеевой подслои термостойкой трубки на основе оксида цинка, распределяющий электрическое поле; С – полимерный экран по изоляции кабеля; D – слой электропроводящей краски; E – изоляция кабеля

Повышение напряжения в этом случае не приводит к опасному увеличению напряжённости, а лишь увеличивает длину рабочего участка, на котором распределяется напряжённость поля (рис. 4).

В большинстве случаев слой, регулирующий распределение напряжённости поля, наносится в виде термоусаживаемой трубки, при этом возникает опасность того, что рядом с краем экрана по изоляции, под термоусаживаемой трубкой останется воздух, в котором неизбежно будут возникать частичные разряды, приводящие к пробое.

Для решения данной проблемы применяются два способа:

- нанесение на край экрана материала заполняющего пустоты, с повышенной диэлектрической проницаемостью (позиция С на рис. 4);
- нанесение на изоляцию, у края экрана, слоя электропроводящей краски на длине 20–50 мм (рис. 5), при этом при переходе от слоя электропроводящей краски к поверхности изоляции исключается образование ступеньки.

В настоящее время фирмой Raychem в основном выпускаются муфты, приведённые на рис. 4 и 5,

которые нашли широкое распространение в энергосистемах РФ. Данные муфты отличаются простотой монтажа и надёжностью при правильно проведённом монтаже.

Основным требованием при монтаже муфт данного типа является достаточный для расплавления клеевого подслоя нагрев композитной трубки при её усадке. При этом клеевой подслои должен склеиться с поверхностью изоляции кабеля по всей длине. При недостаточном нагреве трубки между клеевым подслоем и поверхностью изоляции кабеля образуется воздушный зазор, в котором возникают частичные разряды, приводящие к пробое (рис. 6).

Кроме того, недостаточный прогрев термоусаживаемых трубок при их усадке может привести к негерметичности муфт и попаданию воды внутрь муфты, что также ведёт к появлению поверхностных разрядов по изоляции кабеля и пробое муфты (рис. 7).

Недостаточный нагрев трубки является наиболее часто встречающейся ошибкой монтажного персонала при монтаже муфт данного типа. Это особенно актуально при монтаже муфт в условиях холодного климата.



Рис. 6. Следы частичных разрядов на поверхности изоляции кабеля (потемнение изоляции показано стрелкой)

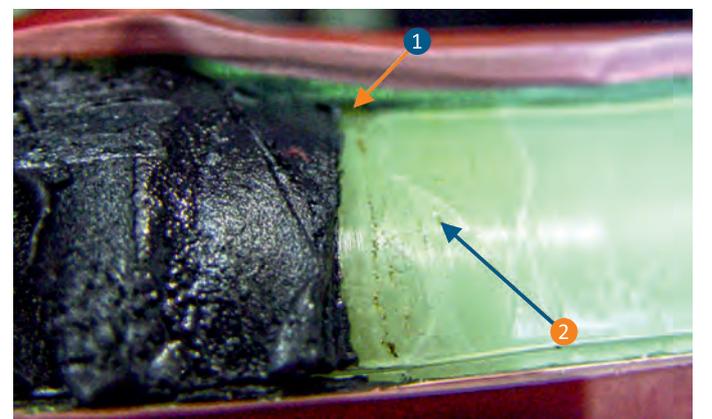


Рис. 7. Пустота у края чёрной ленты заполнения пустот 1 и капли жидкости 2 на поверхности изоляции кабеля в концевой муфте



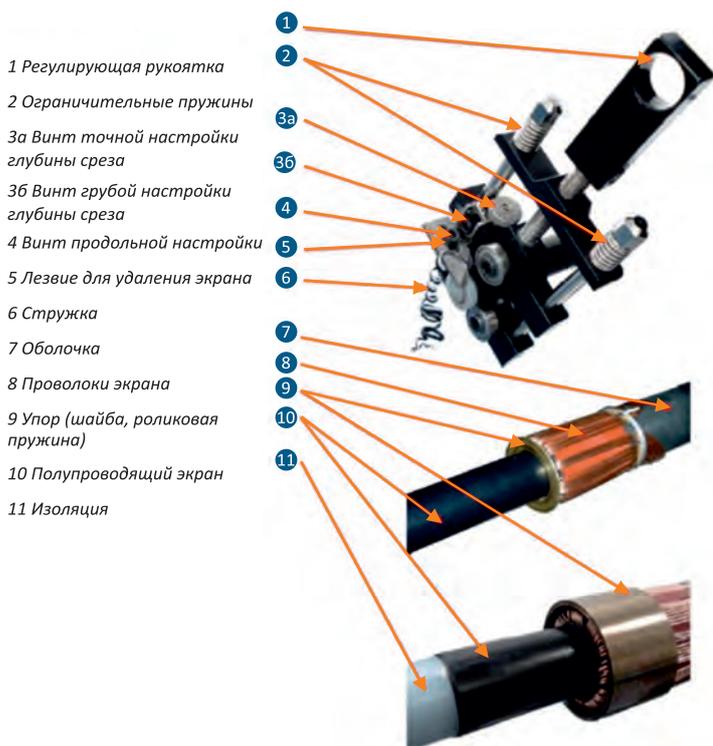
Рис. 8. Остатки материала экрана на поверхности изоляции

Больше всего повреждений (до 90 %) связано с ошибками монтажа и нарушениями монтажных инструкций. Имелись случаи, когда в монтаже муфт принимал участие неквалифицированный и неаттестованный для монтажа муфт персонал, который не проходил обучения в специализированных центрах фирмы-производителя муфт. В результате операции по монтажу выполнялись с грубыми нарушениями инструкций.

Большое количество повреждений связаны с неполным удалением полимерного экрана кабеля (рис. 8) или подрезом изоляции кабеля (рис. 10), а также с ошибками при нанесении или наложении материала, регулирующего напряжённость электрического поля. В большинстве случаев слой, регулирую-

Инструмент ИТ 1000-17 для удаления экструдируемого полупроводящего экрана

1. Применение
Инструмент для удаления экструдируемого полупроводящего экрана кабелей с пластмассовой изоляцией круглого сечения например АПВВГ, ПвПГ др.



- 1 Регулирующая рукоятка
- 2 Ограничительные пружины
- 3а Винт точной настройки глубины среза
- 3б Винт грубой настройки глубины среза
- 4 Винт продольной настройки
- 5 Лезвие для удаления экрана
- 6 Стружка
- 7 Оболочка
- 8 Проволоки экрана
- 9 Упор (шайба, роликовая пружина)
- 10 Полупроводящий экран
- 11 Изоляция

Рис. 9. Нож для снятия экрана по изоляции кабеля с набором стопорных шайб

щий распределение напряжённости поля, наносится в виде термоусаживаемой трубки, при этом возникает опасность того, что рядом с краем экрана, под термоусаживаемой трубкой останется слой воздуха, в котором неизбежно будут возникать частичные разряды, приводящие к пробую.

Возникновение газовой полости у края экструдируемого экрана может быть связано как с неполной усадкой термоусаживаемой трубки выравнивания поля, так и с некачественной намоткой ленты заполнения пустот и регулирования поля, а именно с отсутствием плавного конуса у края намотки, или с неровностью намотки ленты.

Разборка повреждённых муфт показала, что монтажный персонал не имеет навыков в снятии электропроводящего полимерного экрана по изоляции кабеля. Эта важная операция выполняется с помощью циркулярного ножа для снятия экрана. Конструкция ножа представлена на рис. 9.

Режущий элемент устройства – лезвие, должен устанавливаться таким образом, чтобы полностью снимать электропроводящий экран по изоляции кабеля, при минимальном уменьшении толщины изоляции кабеля. В случае неправильной установки лезвия на поверхности изоляции кабеля могут оставаться участки с остатками экрана по изоляции кабеля. Для снятия экрана по изоляции кабеля должны использоваться упорная шайба или роликовая пружина, в которые циркулярный нож упирается на завершающем этапе снятия экрана. При этом нож должен сделать 1–2 оборота без продольного перемещения. Таким образом, достигается плавный переход от экрана по изоляции к изоляции кабеля. В случае отсутствия упорной шайбы может образоваться подрез изоляции кабеля, как показано на рис. 10, с образованием воздушного зазора, частичные разряды в котором в дальнейшем приведут к пробую муфты.

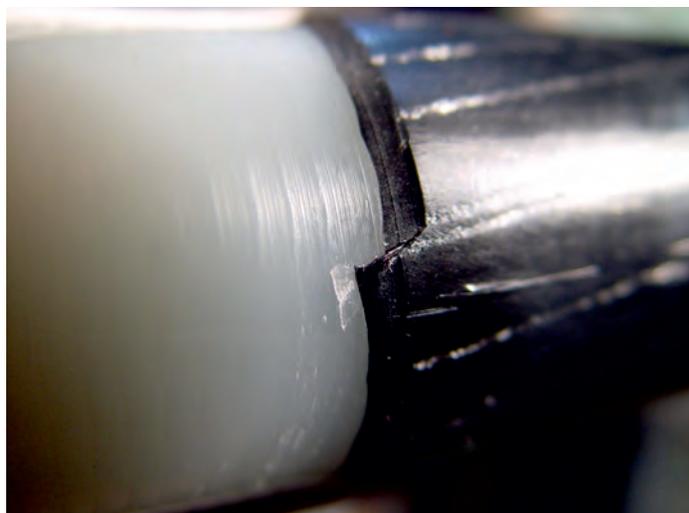


Рис. 10. Подрез изоляции кабеля



Рис. 11. Следы разрядов на поверхности кабеля соответствуют краю наложения манжеты из герметика В-3 (показаны стрелкой)

При анализе причин пробоя соединительных муфт на напряжение 20 и 35 кВ установлено, что не во всех конструкциях муфт в состав комплектов муфт входят ленты для заполнения пустот и междуфазные распорки. Отсутствие лент следует отнести к ошибкам конструкции муфт.

В некоторых случаях на концевых муфтах напряжением 20 кВ было установлено наличие лент, регулирующих электрическое поле, низкого качества, исключаящее их нанесение в виде тонкого слоя. Из-за наложения толстой намотки лент или их несоответствия вышеперечисленным требованиям зона возникновения частичных разрядов может переноситься на край намотки лент, как показано на рис. 11. Срок службы концевых муфт в этих случаях снижается до 1–3 лет.

Применение термоусаживаемых композитных толстостенных трубок с клеевым подслоем в концевой муфте требует полноценного нагрева трубки для её усадки. При этом клеевой подслоем должен обеспечить адгезию по всей длине с поверхностью изоляции кабеля. При недостаточном нагреве трубки, регулирующей напряжённость электрического поля, между клеевым подслоем и поверхностью изоляции кабеля образуется воздушный зазор (рис. 6), в котором возникают частичные разряды, приводящие к пробоям.

В [2] отмечено, что основное количество повреждений происходит в первые 10 лет эксплуатации кабельных линий (начальные отказы), в основном в течение двух-трёх лет после постановки кабельных линий под нагрузку, что свидетельствует о недостатках монтажа. В последующие 15–20 лет эксплуатации отказы, как правило, не происходят, а затем в связи с деградацией (старением) изоляции, в том числе из-за воздействия частичных разрядов, происходит дальнейшее увеличение количества отказов. В результате отказы арматуры можно описать графиком, показанным на рис. 12.

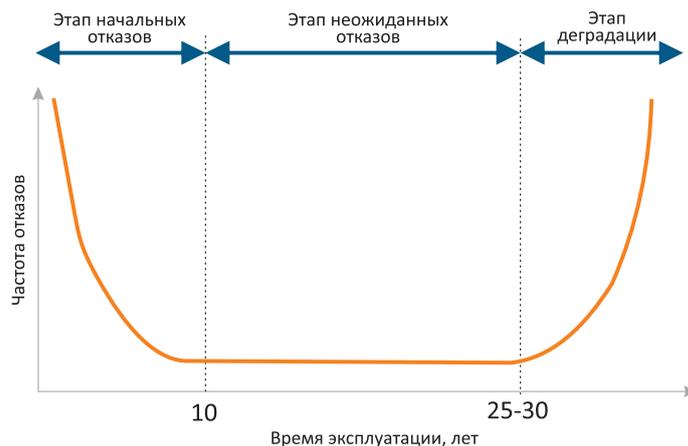


Рис. 12. Распределение отказов кабельной арматуры по времени эксплуатации

ВЫВОДЫ

Для повышения надёжности работы муфт кабельных линий среднего класса напряжения необходимо иметь квалифицированный, аттестованный монтажный персонал. Такой персонал должен пройти подготовку в сервисном центре фирмы-производителя муфт, а также проходить периодическую переаттестацию. Первый монтаж новой конструкции муфт на кабельных линиях среднего напряжения должен осуществляться при участии представителя персонала фирмы-производителя.

Конструкция каждой муфты, представленной на отечественном рынке, должна быть предварительно испытана в соответствии с требованиями нормативной документации. При этом необходимо уделить особое внимание измерению частичных разрядов в муфтах, как показателю длительной работы муфт. При уровне частичных разрядов, превышающем 10 пКл, конструкция муфты должна быть дополнительно доработана и испытана на соответствие уровню частичных разрядов.

Список источников

1. **A. Eigner, S. Semino.** 50 years of electrical-stress control in cable accessories // IEEE. 2019, September/October. Vol. 29, No 5. P. 47–55.
2. **S. Tsuchiya and all.** «Assessment and technical trends in high reliability XLPE cable accessories for transmission lines in Japan // CIGRE 2010, Paper B1-203. – 7 p.

List of References

1. **A. Eigner, S. Semino.** 50 years of electrical-stress control in cable accessories // IEEE. 2019, September/October. Vol. 29, No 5. P. 47–55.
2. **S. Tsuchiya and all.** Assessment and technical trends in high reliability XLPE cable accessories for transmission lines in Japan // CIGRE 2010, Paper B1-203. – 7 p.