

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ С ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В.Н. Вариводов

ORCID: 0009-0003-1400-2322 e-mail: vvarivodov@gmail.com

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Д.И. Ковалев

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm1@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Д.В. Голубев

ORCID: 0000-0002-4258-8741 e-mail: golubevdl@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

С.А. Елфимов

ORCID: 0009-0001-5226-904X e-mail: sa.elfimov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

А.Э. Сергеева

ORCID: 0009-0006-5344-1928 e-mail: SergeevaAE@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Работа посвящена исследованию развития высоковольтных технологий применительно к кабельным муфтам с полимерной изоляцией. Представлен аналитический обзор применения различных конструктивных и технологических решений по повышению электрической прочности концевых и соединительных кабельных муфт. Рассмотрены распределения напряженностей электрического поля в концевых муфтах и возможности их регулирования. Продемонстрированы оптимальные в настоящее время изоляционные материалы для применения в муфтах для кабелей с полимерной изоляцией. Выделены основные направления совершенствования изоляции кабельных муфт.

Ключевые слова: изоляционные материалы, кабельная муфта, полимерная изоляция, распределение электрического поля, электрическая прочность.

Для цитирования: Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В., Елфимов

С.А., Сергеева А.Э. Современное состояние развития кабельных муфт с полимерной изоляцией // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 98-116. EDN QGCCLD

CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF POLYMER-INSULATED CABLE JOINTS

V.N. Varivodov

ORCID: 0009-0003-1400-2322 e-mail: vvarivodov@gmail.com

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

D. I. Kovalev

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm@mpei.ru

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

D.V. Golubev

ORCID: 0000-0002-4258-8741 e-mail: golubevdl@mpei.ru

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

S.A. Elfimov

ORCID: 0009-0001-5226-904X e-mail: sa.elfimov@yandex.ru

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

A.E. Sergeeva

ORCID: 0009-0006-5344-1928 e-mail: SergeevaAE@mpei.ru

National Research University «MPEI»

Moscow, Russia

Abstract. The paper is devoted to the study of the development of high-voltage technologies applied to polymer-insulated cable joints. An analytical review of the application of various design and technological solutions for increasing the electrical strength of cable end and connecting joints is presented. The distributions of electric field strengths in end joints and the possibilities of their regulation are considered. The optimal insulating materials for use in joints for polymer-insulated cables are demonstrated. The main directions for improving the insulation of cable joints are highlighted.

Keywords: insulating materials, cable joint, polymer insulation, electric field distribution, electrical strength.

For citation: V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, D.V. Golubev, S.A. Elfimov and A.E. Sergeeva, "Current state of development of polymer-insulated cable joints", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 98-116, 2025. EDN QGCCLD

I. Введение

Устойчивое электроснабжение с наименьшими потерями является актуальной задачей для энергетической отрасли. Важным элементом в цепочке передачи электроэнергии являются высоковольтные кабельные муфты, служащие для соединения концов силового кабеля между собой, а также кабельной линии к воздушной линии электропередачи (ЛЭП), трансформатору или комплектно-распределительному устройству (КРУ).

Опыт показывает, что кабельные муфты являются наиболее слабым звеном в системе кабельных линий [1], что требует особенно пристального внимания к их совершенствованию. Современные тенденции в развитии технологий высоковольтной изоляции открывают новые горизонты в обеспечении надежности, безопасности, эффективности этих устройств и, как следствие, электрических сетей в целом.

Внедрение инновационных материалов и технологий, позволяет не только повысить эксплуатационные характеристики высоковольтных устройств, но и способствует снижению их экологического воздействия на окружающую среду.

II. Анализ применяемых технических решений для улучшения конструкции кабельных муфт

Традиционным направлением оптимизации кабельных муфт является применение термоусаживающихся изоляционных и полупроводящих трубок. Термоусадка изоляционных трубок позволяет обжать внутренние элементы муфт и минимизировать возможность появления газовых прослоек [2].

Муфты для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция) с термоусаживающимися трубками производятся в двух основных разновидностях – термической и холодной усадки.

Современная технология холодной усадки позволяет установить трубку на муфту путем простого извлечения спиралевидного корда. Такие трубки усаживаются на кабелях 6-35 кВ, создавая остаточное радиальное прижимное давление на весь срок службы.

Муфты с холодной усадкой трубок не требуют источника тепла для монтажа. Трубки достаточно надеть на место стыка двух кабелей и плотно затянуть крепежный механизм. Для большей эффективности внутреннюю часть муфты заливают специальным гелем, препятствующим проникновению влаги и воздуха.

Производство термоусаживаемой арматуры основано на технологии «сшивки» полимеров с пластической памятью формы [3]. По сравнению с

обычными полимерами такие образцы обладают улучшенными механическими свойствами, химической и термической стойкостью. Сшитый полимер перестает быть термопластиком. Новоприобретенная «сшитая» структура полимера позволяет нагревать его выше температуры плавления, при этом он не теряет своей формы, не плавится и приобретает каучуко-подобную консистенцию. В таком состоянии можно подвергать изменению его геометрию. После охлаждения полимер сохраняет новые размеры и приданную ему форму. При повторном нагреве, обладая «эффектом памяти формы», полимер возвращается к первичным размерам и форме. В этом и заключается процесс термоусадки.

Термоусаживающиеся изоляционные и полупроводящие трубки активно применяются в кабельных муфтах при номинальных напряжениях 6-35 кВ. Однако, при проектировании муфт для больших классов напряжения вышеописанных технологий будет недостаточно. В таких случаях широкое распространение получили стресс-конусы.

Стресс-конус – это специальная изоляционная вставка между соединяемыми смежными слоями изоляции отдельных частей кабеля или кабеля с другим оборудованием, где для повышения электрической прочности места соединения используется коническая форма торцов этой вставки, а плотное прилегание вставки к смежным слоям изоляции обеспечивается плотным их сжатием [18, 29]. Эта конструкция исключает возможность появления газовых включений на границе раздела отдельных слоев изоляции. Как правило, внутри таких стресс-конусов заливаются электроды (экраны), регулирующие электрическое поле.

Принципиальная конструкция стресс-конуса [7] и распределение электрического поля в нем [4] при воздействии напряжения приведена на рис. 1 и 2. Изменяя форму и расположение залитых в стресс-конусе электродов можно оптимизировать распределение электрического поля в кабельных муфтах.

Концевые кабельные муфты на напряжение 35-110 кВ и выше, как правило, имеют в качестве основной изоляционной конструкции стресс-конуса жесткий литой эпоксидный конический изолятор, который иногда заполнен маслом или высокопрочным газом, например – элегазом [16]. Принципиальная конструкция таких устройств подобна модели, представленной на рис. 1. Однако часто используются сухие муфты – без заполнения жидкостью или газом [19, 24].

В качестве примера использования данной технологии можно рассмотреть концевую муфту типа *PHVS-245*. Приведенная на рис. 3 [5, 6] муфта предназначена для работы в распределительных устройствах с элегазовой изоляцией, компактных РУ и трансформаторах на напряжение до 245 кВ, а также в разных изолирующих средах.

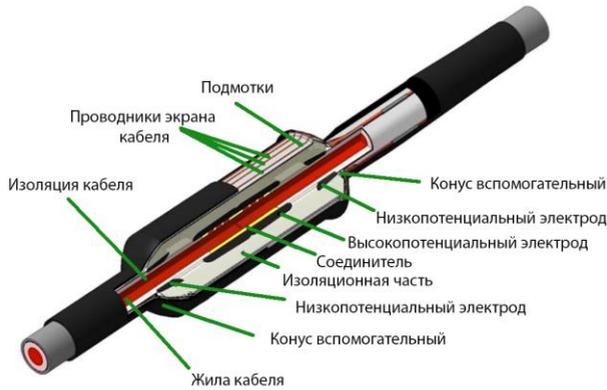


Рис. 1. Соединительная муфта 110 кВ

Fig. 1. Connection coupling for 110 kV

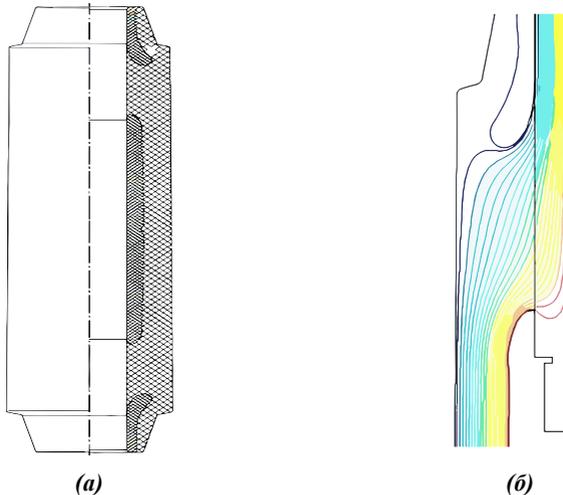


Рис. 2. Конструкция стресс-конуса (а); распределение электрического поля при воздействии напряжения (б)

Fig. 2. Stress cone design (a); electric field distribution under voltage (b)

Данная муфта является муфтой «сухого» исполнения без каких-либо жидких наполнителей. Герметичный эпоксидный корпус предназначен для работы в элегазовых и других изолирующих средах. Внутренняя силиконовая коническая вставка – стресс-конус – служит также для выравнивания напряженности электрического поля и исключения разрядов вдоль поверхности эпоксидного изолятора.



Рис. 3. Концевая муфта штекерная муфта PHVS-245 сухого исполнения для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Fig. 3. End coupling plug-in coupling PHVS-245 dry version for cables with cross-linked polyethylene insulation

При сжатии с помощью болтов жесткого изолятора с металлическим корпусом внутренняя его коническая поверхность плотно насаживается на коническую поверхность упругой вставки – стресс-конуса, что устраняет возможность появления нежелательных газовых включений в этой области, способных вызвать частичные разряды. Для повышения надежности эти поверхности перед монтажом покрываются силиконовой смазкой. В результате исключаются электрические разряды по этим поверхностям.

Кабельные контакты – штекеры в данных муфтах представляет собой высококачественный разъем, который обеспечивает надежную и безопасную передачу тока от токоведущей жилы кабеля на сборные шины. Дополнительно на стык металлического фланца с кабелем монтируется термоусаживаемая трубка. [10]

Общими конструктивными элементами концевых кабельных муфт на напряжение 35 кВ и выше являются [15, 27, 28, 31]:

– внешний жесткий полый конический изолятор из эпоксидного компаунда;

- силиконовый стресс-конус;
- штекерный разъем;
- залитые полупроводящие упругие экраны в стресс-конусах;
- залитые экраны в эпоксидном компаунде;
- подпружиненные болтовые крепления изоляторов;
- металлический корпус;
- токопроводящие элементы;
- крепление кабеля и корпуса муфты.

Для данных классов напряжения соединительные муфты могут иметь более существенные различия в конструкции, связанные с тем, что выпускаемые модели изготавливаются как с одинарными стресс-конусами, так и с двойными.

В табл. 1 представлены характеристики изоляционных материалов, используемых в зарубежных кабельных муфтах со стресс-конусом [8].

Таблица 1.
Материалы, используемые в зарубежных кабельных муфтах со стресс-конусом

Table 1.
Materials used in foreign cable couplings with stress cone

Сокращение в литературе	Материал (используемый в данной работе)	Сокращение (используемое в данной работе)	<i>DIN ISO 1629</i> Март 1992	<i>DIN EN ISO 1043 Часть 1</i> январь 2000
<i>SiR, SIR, MVQ, VMQa</i>	Силиконовый каучук	<i>SiR</i>	<i>MVQ, VMQ</i>	<i>SI</i>
<i>RTV, RTV-2</i>	Двухкомпонентный силиконовый каучук, вулканизирующийся при комнатной температуре	<i>RTV</i>		
<i>LR, LSR, XLR</i>	Жидкий каучук, жидкий силиконовый каучук, сверхжидкий каучук	<i>LR</i>		
<i>HTV, HCR</i>	Высокотемпературный вулканизирующийся каучук, каучук высокой консистенции	<i>HTV</i>		
<i>EPR</i>	Этилен-пропиленовый каучук	<i>EPR</i>	<i>EPMb</i>	<i>E/P</i>
<i>EPM, EPM, P</i>	Этилен-пропиленовый сополимер (' <i>EPM</i> ', ' <i>P</i> ' означает пероксидно-вулканизированный <i>EPM</i>)	<i>EPM</i>	<i>EPM</i>	<i>E/P</i>
<i>EPDM, EPDM, S, EPDM, P</i>	Этилен-пропилен-диеновый терполимер (' <i>EPDM</i> ', ' <i>S</i> ' означает вулканизацию серой; ' <i>EPDM</i> ', ' <i>P</i> ' см. выше)	<i>EPDM</i>	<i>EPDM</i>	
<i>EP</i>	Эпоксидная смола	<i>Epochy</i>	-	<i>EP</i>
<i>HDPE, LDPE</i>	Полиэтилен высокой плотности, полиэтилен низкой плотности	<i>PE</i>	-	<i>PE, PE-LD, PE-HD</i>
<i>XLPE</i>	Сшитый полиэтилен	<i>XLPE</i>	-	<i>PE-X</i>
-	Смазка, силиконовое масло, паста	<i>Lubricant</i>	-	-

При выборе изоляции кабельных муфт важны не только их конструкция и технология изготовления, характеристики используемых материалов,

но и методы ее расчета – прежде всего, электрической прочности и температурного режима.

При расчете изоляции муфты необходимо учитывать две возможные ситуации:

– по элементам цепи протекает номинальный ток и нагревает их, этот случай соответствует высокой нагрузке;

– прикладывается только напряжение, этот случай соответствует нулевой нагрузке.

Учет двух режимов – с током и без него – необходим, поскольку они создают принципиально разные физические условия в изоляции. При протекании тока возникает нагрев, изменяющий тепловое состояние и диэлектрические свойства материалов, а также вызывающий термомеханические напряжения. При отсутствии тока, но наличии напряжения, тепловой вклад отсутствует, и распределение электрического поля определяется исключительно геометрией и свойствами материалов [20, 23]. Для достоверного расчета электрической прочности изоляции необходимо учитывать оба предельных состояния, так как они задают разные граничные условия и могут по-разному влиять на риск пробоя.

Одним из основных направлений повышения надежности кабельных муфт является оптимизация их конструкции с учетом распределения электрического и теплового полей [22, 30]. Муфты представляют собой наиболее уязвимые элементы в составе кабельных линий, поскольку в зоне их размещения, как правило, наблюдаются повышенные локальные напряженности электрического поля по сравнению с однородной структурой кабеля. Кроме того, конструктивная сложность и наличие межфазных и межматериальных границ повышают вероятность возникновения дефектов, в частности, газовых включений и отслоений, способных привести к частичным разрядам. Для повышения надежности муфт необходимо принимать меры, направленные на снижение локальных пиков напряженности электрического поля [25, 26]. Повышение точности моделирования достигается за счет актуализации исходных данных, уточнения электрических характеристик материалов, корректного описания граничных условий, а также повышения пространственного разрешения в расчетах с использованием адаптивной сетки в зонах повышенного градиента поля.

Важным аспектом повышения надежности является также исключение возникновения отслоений на границах между диэлектриками различной природы в процессе эксплуатации. Возникающие при циклических изменениях температуры внутренние термомеханические напряжения могут привести к образованию воздушных зазоров, являющихся источниками частичных разрядов. Для предотвращения подобных эффектов требуется обеспечить максимальное выравнивание температурного поля, особенно вблизи

критических границ раздела материалов. Это, в свою очередь, требует оптимизации тепловых расчетов, предполагающей учет реальных теплопроводностей, теплоемкостей и коэффициентов теплового расширения используемых материалов, а также моделирования условий охлаждения в различных климатических режимах, включая низкотемпературные.

Результаты численного моделирования [32] позволяют обосновать конкретные конструктивные меры по снижению напряженности поля и термомеханических напряжений, тем самым обеспечивая повышение электрической прочности и надежности кабельных муфт. Холодный климат предъявляет повышенные требования к конструкции кабельных муфт, так как при низких температурах возможно изменение внутреннего давления, снижение эластичности полимерных компонентов и образование микрозоров на границах материалов. Для снижения негативного влияния таких факторов конструкции следует оптимизировать с учетом коэффициентов теплового расширения и использовать компенсирующие элементы, обеспечивающие стабильное контактное давление в широком температурном диапазоне.

Для обеспечения надежности изоляции в кабельных муфтах крайне важно предотвратить образование микродефектов, таких как воздушные зазоры, возникающие на границах раздела различных материалов. Одним из ключевых направлений является оптимизация конструктивных элементов, обеспечивающих стабильный контакт между компонентами муфты при температурных колебаниях и механических нагрузках [11]. В частности, важную роль играют упругие элементы, такие как пружинные кольца, компенсирующие изменения линейных размеров материалов с различными коэффициентами теплового расширения. Эффективное применение таких решений позволяет минимизировать риск разгерметизации и частичных разрядов при эксплуатации в широком температурном диапазоне, включая экстремально низкие температуры.

Для повышения надежности кабельных муфт, особенно в условиях эксплуатации при переменных и низких температурах, важно исключить возможность образования микрозоров на границе раздела между различными диэлектриками [14]. Воздушные прослойки, возникающие в результате недостаточного прижимного усилия или различий в тепловом расширении материалов, становятся очагами частичных разрядов, что снижает электрическую прочность изоляционной системы.

Одним из наиболее эффективных решений является применение упругих компенсирующих элементов, таких как пружинные кольца, обеспечивающих стабильное контактное давление по всей поверхности сопряжения стресс-конуса и основного корпуса муфты. Эти элементы автоматически компенсируют термическое расширение и сжатие материалов при колебаниях температуры в диапазоне от -40 до $+40$ °С, сохраняя герметичность интерфейса и предотвращая появление газовых зазоров.

Дополнительно важным условием является подбор материалов с согласованными коэффициентами теплового расширения. Например, использование силиконовой резины и эпоксидных компаундов с минимальной разницей этих коэффициентов позволяет уменьшить механическое напряжение на границе контакта при охлаждении [21]. Еще одним конструктивным приемом является нанесение специальной диэлектрической силиконовой смазки на поверхность сопряжения. [13] Это снижает вероятность локального отслоения, повышает степень прилегания материалов и препятствует проникновению влаги и воздуха внутрь конструкции. Пример применения пружинного кольца продемонстрирован на рис. 4 [9].

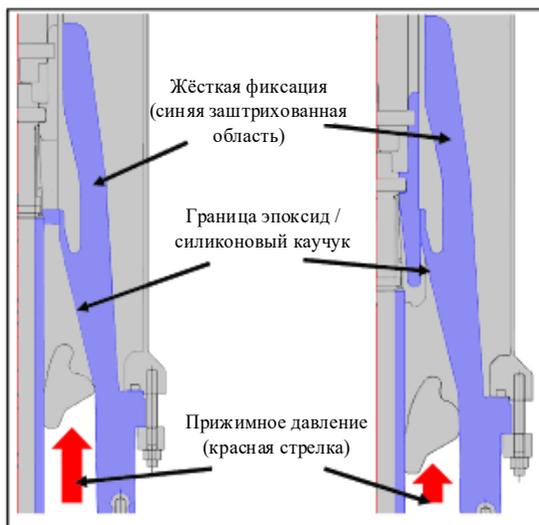


Рис. 4. Применение пружинного кольца для компенсации температурных колебаний

Fig. 4. Application of a spring ring to compensate for temperature fluctuations

В дополнение к применению пружинных прижимных элементов и согласованию коэффициентов теплового расширения, эффективное проектирование кабельных муфт должно учитывать распределение электрического поля в зоне сопряжения различных материалов.

Анализ распределения электрического поля в области сопряжения различных компонентов кабельной муфты показывает, что наибольшая напряженность формируется в зоне корня стресс-конуса и в области окончания высоковольтной экранирующей трубки. Эти зоны являются потенциально уязвимыми при нарушении геометрии прилегания или ухудшении

контактного давления между материалами. Результаты численного моделирования подтверждают, что именно в этих участках могут возникать условия для локального перенапряжения и развития поверхностных разрядов (рис. 5) [12].

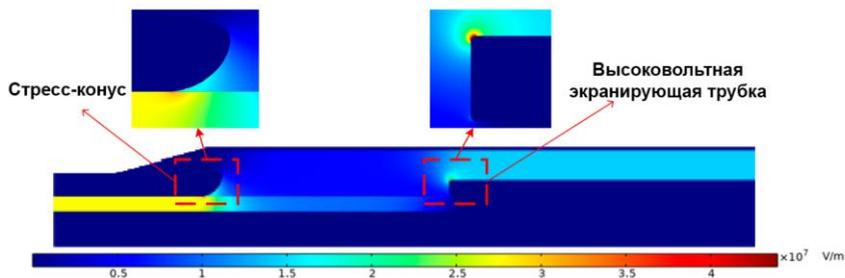


Рис. 5. Распределение электрического поля в характерных зонах конструкции кабельной муфты

Fig. 5. Electric field distribution in critical areas of the cable joint structure

Особенно чувствительной к условиям сопряжения является граница между изоляцией жилы из сшитого полиэтилена (*XLPE*) и силиконовой оболочкой стресс-конуса. При понижении давления в этом интерфейсе вследствие старения или усадки материала может формироваться узкая воздушная прослойка, в которой происходит развитие частичных разрядов. Такие разряды способны нарушить целостность изоляции и привести к пробое. На рис. 6 схематически показан возможный путь распространения поверхностного разряда вдоль границы материалов [17].

Во избежание подобных явлений конструкция должна предусматривать устойчивое прижимное усилие по всей длине сопряжения. Этого можно достичь за счет использования упругих элементов, обеспечивающих компенсацию тепловых и механических деформаций. Кроме того, требуется строгое соблюдение допусков на обработку сопрягаемых поверхностей. Типовые производственные дефекты, такие как неровности, воздушные включения или следы влаги, могут стать центрами ионизации и вызвать рост электрического поля до критических значений. Примеры таких дефектов приведены на рис. 7.

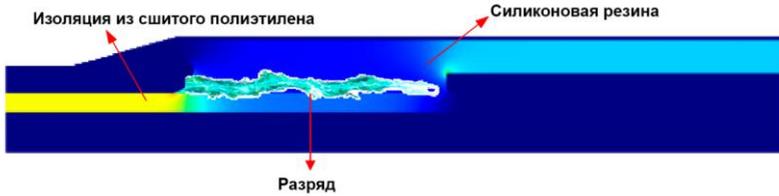


Рис. 6. Схема возможного пути поверхностного разряда вдоль границы сред

Fig. 6. Schematic diagram of a possible surface discharge path along the XLPE-SiR interface

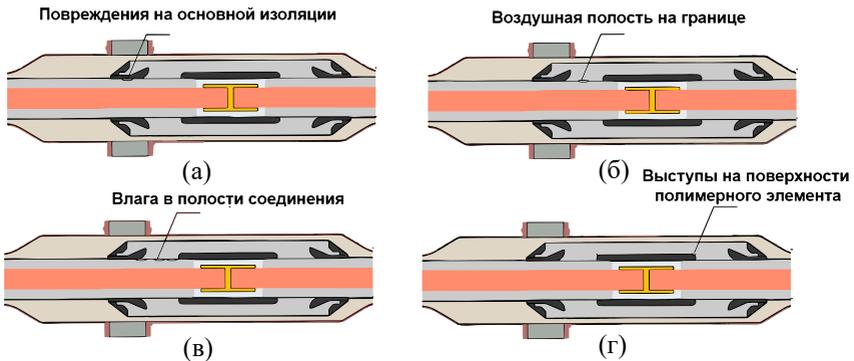


Рис. 7. Характерные дефекты конструкции муфты:

повреждение на основной изоляции (а); воздушная полость на границе (б); влага в полости соединения (в); выступы на поверхности полимерного элемента (г)

Fig. 7. Typical defects in cable joint construction:

scratch on main insulation (a); air gap at the interface (b); moisture ingress in the joint cavity (в); burrs on the surface of the polymer element (г)

Применение вышеперечисленных мер, в том числе, выбор материалов с согласованными термомеханическими характеристиками, введение упругих компенсаторов, обеспечение герметичности и отсутствие острых геометрических переходов – позволяют значительно повысить надежность изоляционной системы кабельной муфты и снизить вероятность отказа при длительной эксплуатации.

Помимо геометрических и конструктивных факторов, надежность изоляционной системы кабельной муфты в значительной степени определяется химическим составом используемых материалов. В изоляции на основе сшитого полиэтилена (XLPE), получаемой в результате термической обработки с добавлением пероксидов, после процесса сшивания остаются побочные продукты реакции – в том числе метан, ацетофенон и кумиловый

спирт. Эти соединения обладают высокой полярностью и, находясь в объеме полимера, особенно вблизи границ раздела, могут снижать электрическую прочность, увеличивать диэлектрические потери и исказить распределение поля. Кроме того, остаточные газы способны мигрировать вдоль кабеля и накапливаться в зонах соединений. Это создает внутреннее давление под оболочкой муфты, что нарушает стабильность контактного усилия, способствует образованию микропазоров и повышает риск возникновения частичных разрядов.

Для исключения подобных явлений применяется процесс дегазации – выдержка кабеля при контролируемой температуре, как правило, в диапазоне 60-70 °С. В результате происходит удаление летучих и твердых побочных продуктов из структуры *XLPE*. Эффективность дегазации зависит от толщины изоляции, начального уровня загрязнения и условий выдержки.

На рис. 8 показана расчетная динамика снижения концентрации побочных продуктов в процессе дегазации в кабеле среднего напряжения. Видно, что даже при нормальной комнатной температуре в 20-25 °С этот процесс занимает десятки суток, что подчеркивает необходимость применения термической обработки на производстве. Без дегазации невозможно обеспечить стабильные электрические характеристики изоляции, особенно в зонах соединений и муфт, где присутствуют концентраторы поля и полимерные интерфейсы.

Также стоит отметить важный фактор – влажность воздуха в камере дегазации. При относительной влажности выше 40 % молекулы воды быстро сорбируются на поверхности и в аморфных областях *XLPE*; их коэффициент диффузии ($10^{-9} \dots 10^{-8}$ см²/с при 25-90 °С) сопоставим с диффузией метана, поэтому поглощенная влага частично «засаливает» свободный объем, уменьшая градиент концентрации побочных продуктов и тем самым удлиняя время их удаления примерно на 15-20 % для кабеля со стенкой 18 мм (оценка по модели Фика). Одновременно вода сама увеличивает tgδ, что подтверждено для паро- и газо-отвержденного *XLPE*. Поэтому дегазацию проводят в сухом, хорошо вентилируемом воздухе ($RH \leq 15\%$) или под азотом, чтобы исключить влагопоглощение на этапе термообработки [33].

Таким образом, дегазация – это не только технологический, но и критически важный этап обеспечения надежности кабельной изоляции. Ее реализация позволяет устранить скрытые риски, не выявляемые на ранних этапах контроля качества, и существенно продлевает срок службы кабельных муфт.

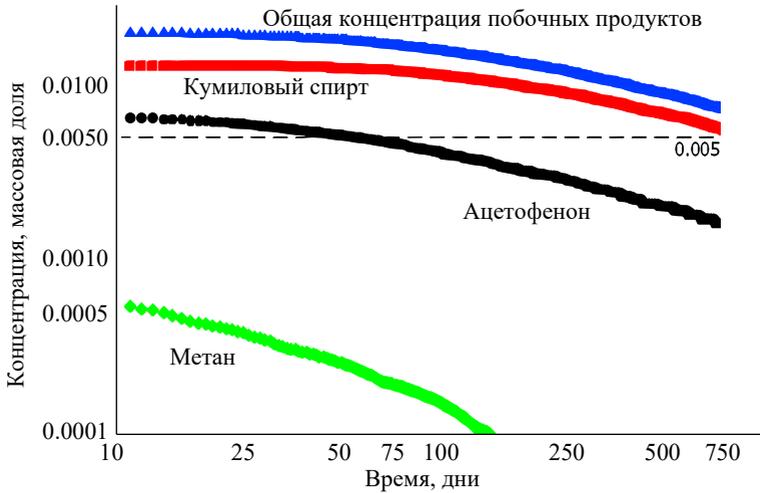


Рис. 8. Расчетное снижение концентрации побочных продуктов сшивания в XLPE-изоляции кабеля среднего напряжения в процессе дегазации

Fig. 8. Calculated reduction of crosslinking byproduct concentration in XLPE insulation of a medium-voltage cable during the degassing process

III. Заключение

В результате анализа установлено, что надежность кабельных муфт с полимерной изоляцией определяется не только электрическими параметрами, но и конструктивной адаптацией к температурным и механическим воздействиям. Критическим фактором является предотвращение образования микрозоров и межфазных дефектов, способных привести к частичным разрядам.

Одним из наиболее эффективных решений является применение упругих элементов (например, пружинных колец), компенсирующих термическое расширение материалов и обеспечивающих стабильное контактное давление на границах раздела, особенно в зонах сопряжения силиконовой и эпоксидной изоляции. Дополнительную защиту обеспечивает нанесение диэлектрических смазок и применение материалов с согласованными коэффициентами теплового расширения.

Важным направлением обеспечения надежности является дегазация XLPE-изоляции, позволяющая устранить остаточные побочные продукты сшивания, способные исказить электрическое поле и провоцировать поверхностные разряды в зоне муфт. Дегазация при температуре 60-70 °С значительно снижает содержание метана, ацетофенона и других компонентов, устраняя внутренние источники ионизации.

Учет температурных зависимостей электрических и тепловых характеристик материалов позволяет выявить зоны повышенного электрического и термомеханического напряжения и адаптировать конструкцию муфт на этапе проектирования. Предварительные расчеты на этапе проектирования могут показать необходимость повышения разрешения в критических зонах и уточнения граничных условий численного моделирования.

Комплексная реализация перечисленных решений позволяет значительно повысить электрическую прочность и долговечность кабельных муфт, особенно при эксплуатации в холодном климате и под переменной нагрузкой. Применяемые меры обеспечивают устойчивость изоляционной системы к старению, термоциклированию и внешним воздействиям, приближая ресурс муфт к ресурсу силового кабеля.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004).

© Вариводов В.Н., 2025

© Ковалев Д.И., 2025

© Голубев Д.В., 2025

© Елфимов С.А., 2025

© Сергеева А.Э., 2025

Поступила в редакцию 27.05.2025

Принята к публикации 09.06.2025

Received 27.05.2025

Accepted 09.06.2025

Библиографический список

- [1] Williams F.D. Cable accessory failure analysis. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010. – 85 p.
- [2] Кабельные термоусаживаемые муфты. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tech-electro.ru> (дата обращения: 21.03.2025).
- [3] Изготовление кабельной арматуры 110-330 кВ. [Электронный ресурс]. URL: <http://fenix88.com/products/doc/presentation-kma-sma-2015.pdf> (дата обращения: 21.03.2025).
- [4] Соединительные муфты 110 кВ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.arkasil.com/product/cableaccessories/joints110> (дата обращения: 21.03.2025).
- [5] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В. Полимеры в технике высоких напряжений. М.: МЭИ, 2022. – 345 с.
- [6] Штекерные концевые муфты для кабеля с СПЭ изоляцией на напряжение 12-52 кВ: каталог. Sudkabel, 2020. – 32 с.

- [7] Высоковольтная кабельная арматура: каталог. TE Connectivity (Raychem), 2012. – 85 с.
- [8] Accessories for HV and EHV Extruded Cables. Paris: CIGRE Study Committee B1, 2020ю – 120 p.
- [9] Кабельные системы. Кабельные арматуры для электрических сетей: каталог. Pfisterer, 2011. – 92 с.
- [10] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Крупенин Н.В., Хренов С.И. Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 1(40). С. 98-104.
- [11] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Крупенин Н.В., Хренов С.И., Мирзабекян Г.З. Состояние и перспективы развития комплектных распределительных устройств на напряжение 6-35 кВ // Электротехника. 2017. № 8. С. 33-38.
- [12] Toigo C., Cong-Thanh Vu, Aymeric A. Electro-thermal simulation methodology for HVDC cable GIS termination // proc. 10th International conference on Insulated Power cables. Versailles. 2019.
- [13] EN 50181:2010. Plug-in type bushings above 1 kV up to 52 kV from 250 A to 2,5 kA for equipment other than liquid filled transformers.
- [14] IEC 60137:2017. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V. 7th ed.
- [15] IEC 60840:2020. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV). 5th ed.
- [16] IEC 62271-209:2019. Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV. 2nd ed.
- [17] IEC 62895:2017. High voltage direct current (HVDC) power transmission - Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications.
- [18] IEC 60815-4:2016. Selection and dimensioning of high-voltage insulators in-tended for use in polluted conditions – Part 4: Insulators for d.c. systems. 1st ed.
- [19] TB 605:2015. Feasibility of a common, dry type plug-in interface for GIS and power cables above 52 kV. WG B1/B3.33.
- [20] Mazzanti G., Marzinotto M. Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. - 320 p.
- [21] Kim C.K., Sood V.K., Jang G.S., Lim S.J., Lee S.-J. HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. – 415 p.
- [22] Chen G., Hao M., Xu Z., Vaughan A., Cao J., Wang H. Review of high voltage direct current cables // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2015. Vol. 1. No. 2. P. 9-21. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2015.00015
- [23] Khalil M.S., Gastli A. Dependence of DC insulation resistivity of polyethylene on temperature and electric field // proc. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 1997. Vol. 1. P. 296-299.
- [24] Streit P., Gallego K., Gahungu F. Dry terminations for high voltage cable systems // 8th Inter-national Conference on Insulated Power Cables, June 19-23, 2011, Versailles, France.
- [25] Ye H., Clemens M., Schulte-Fischedick J., Seifert J. Investigation of electrical field grading of bushings with microvaristor filled epoxy resin components // IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2014. P. 153-156.

- [26] Zierhut S., Klein T., Wendt E., Zühlke L. Influence of expansion on electric field distribution of stress cones for high voltage cable accessories // 9th International Conference on Insulated Power Cables, June 21-25, 2015, Versailles, France.
- [27] Klein T. Impact of rate of expansion on electric field stress in stress cones & joint bodies // INMR World Congress. Munich, 2015. – 12 p.
- [28] Quaggia D. Development of Joints & Terminations for HVDC Extruded Cables // INMR World Conference. Munich, 2015. – 15 p.
- [29] Galloway S.J. Cable and accessory installation // IEE Two Day Colloquium on Super tension. London, 1995. P. 17/1-17/5.
- [30] Hering M., Speck J., Gobmann S. Field transition in gas insulated HVDC systems // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24. No. 3. P. 1608-1616. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006534
- [31] Высоковольтная кабельная арматура [Электронный ресурс]. URL: <https://www.prokabel.pro/public/Kabelnaia%20armatura%20do%20110%20kV.pdf> (дата обращения: 21.03.2025).
- [32] Köksal C, Dokur E., Ersoy A. Stress cone effect analysis and optimum design of extra high-voltage cable joint using neural networks // Mathematical Problems in Engineering. 2022. 6452538. DOI: 10.1155/2022/6452538
- [33] Chan J. The moisture absorption of XLPE cable insulation under simulated service conditions // IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1978.

References

- [1] F.D. Williams, *Cable accessory failure analysis*. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [2] Kabel'nye termousazhivaemye mufty [Heat-shrinkable cable sleeves]. [Online]. Available at: <https://www.tech-electro.ru> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [3] Izgotovlenie kabel'noi armatury 110-330 kV [Manufacturing of 110-330 kV cable accessories]. [Online]. Available at: <http://fenix88.com/products/doc/presentation-kmasma-2015.pdf> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [4] Soedinitel'nye mufty 110 kV [110 kV connecting sleeves]. [Online]. Available at: <http://www.arkasil.com/product/cableaccessories/joints110> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [5] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev and D.V. Golubev, *Polimery v tekhnike vysokikh napryazhenii [Polymers in high voltage engineering]*. Moscow: MPEI, 2022 (in Russian).
- [6] *Shtekernye kontsevye mufty dlya kablya s SPE izolyatsiei na napryazhenie 12-52 kV: katalog [Plug-in end sleeves for XLPE-insulated cables 12-52 kV: catalog]*, Sudkabel, 2020 (in Russian).
- [7] Accessories for HV and EHV Extruded Cables. Paris: CIGRE Study Committee B1, 2020.
- [8] *Vysokovol'tnaya kabel'naya armatura: katalog [High-voltage cable accessories: catalog]*, TE Connectivity (Raychem), 2012 (in Russian).
- [9] *Kabel'nye sistemy. Kabel'nye armatury dlya elektricheskikh setei: katalog [Cable systems. Cable accessories for electrical networks: catalog]*, Pfisterer, 2011 (in Russian).

-
- [10] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, N.V. Krupenin and S.I. Hrenov, "Development of high and extra-high voltage switchgear", *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 1(40), pp. 98-104, 2017.
- [11] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, N.V. Krupenin, S.I. Khrenov and G.Z. Mirzabekyan, "The current state and possibilities for development of switchgears for a voltage of 6–35 kV", *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, no. 8, pp. 503-508, 2017.
- [12] C. Toigo, Vu. Cong-Thanh and A. Aymeric, "Electro-thermal simulation methodology for HVDC cable GIS termination", in proc. *10th International conference on Insulated Power cables*, Versailles, 2019.
- [13] Plug-in type bushings above 1 kV up to 52 kV from 250 A to 2,5 kA for equipment other than liquid filled transformers, EN 50181:2010.
- [14] Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V, IEC 60137:2017, 7th ed.
- [15] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV), IEC 60840:2020, 5th ed.
- [16] Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV, IEC 62271-209:2019, 2nd ed.
- [17] High voltage direct current (HVDC) power transmission – Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications, IEC 62895:2017.
- [18] Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 4: Insulators for d.c. systems, IEC 60815-4:2016, 1st ed.
- [19] Feasibility of a common, dry type plug-in interface for GIS and power cables above 52 kV, TB 605:2015, WG B1/B3.33.
- [20] G. Mazzanti and M. Marzinotto, *Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission: Advances in Research and Development*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [21] C.K. Kim, V.K. Sood, G.S. Jang, S.J. Lim and S.-J. Lee, *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [22] G. Chen, M. Hao, Z. Xu, A. Vaughan, J. Cao and H. Wang, "Review of high voltage direct current cables", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 9-21, June 2015. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2015.00015
- [23] M.S. Khalil and A. Gastli, "Dependence of DC insulation resistivity of polyethylene on temperature and electric field", in proc. *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 1, pp. 296-299, 1997.
- [24] P. Streit, K. Gallego and F. Gahungu, "Dry terminations for high voltage cable systems", in proc. *8th International Conference on Insulated Power Cables*, June 19-23, 2011, Versailles, France.
- [25] H. Ye, M. Clemens, J. Schulte-Fischedick and J. Seifert, "Investigation of electrical field grading of bushings with microvaristor filled epoxy resin components", in proc. *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, pp. 153-156, 2014.
- [26] S. Zierhut, T. Klein, E. Wendt and L. Zühlke, "Influence of expansion on electric field distribution of stress cones for high voltage cable accessories", in proc. *9th International Conference on Insulated Power Cables*, June 21-25, 2015, Versailles, France.
- [27] T. Klein, "Impact of rate of expansion on electric field stress in stress cones & joint bodies", in proc. *INMR World Congress*, Munich, 2015.

- [28] D. Quaggia, "Development of joints & terminations for HVDC extruded cables", in proc. *INMR World Conference*, Munich, 2015.
- [29] S.J. Galloway, "Cable and accessory installation", in proc. *IEEE Two Day Colloquium on Super tension*, London, pp. 17/1-17/5, 1995.
- [30] M. Hering, J. Speck and S. Gobmann, "Field transition in gas insulated HVDC systems", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 3, pp. 1608-1616, June 2017. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006534
- [31] Vysokovol'naya kabel'naya armatura [High-voltage cable accessories]. [Online]. Available at: <https://www.prokabel.pro/public/Kabelnaia%20armatura%20do%20110%20kV.pdf> [Accessed: Mar. 21, 2025] (in Russian).
- [32] C. Köksal, E. Dokur and A. Ersoy, "Stress cone effect analysis and optimum design of extra high-voltage cable joint using neural networks", *Mathematical Problems in Engineering*, 6452538, May 2022. DOI: 10.1155/2022/6452538
- [33] J. Chan, "The moisture absorption of XLPE cable insulation under simulated service conditions", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1978.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Николаевич Вариводов, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Vladimir N. Varivodov, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

Дмитрий Игоревич Ковалев, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Dmitry I. Kovalev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

Дмитрий Владиславович Голубев, научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Dmitry V. Golubev, research fellow of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

Сергей Александрович Елфимов, научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Sergey A. Elfimov, research fellow of the National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation.

Анна Эдуардовна Сергеева, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

Anna E. Sergeeva, research engineer of the National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation.