

Полупроводящий слой по оболочке кабелей. Проблемы и решения

DOI:

УДК 621.315.21

Современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена играют ключевую роль в энергосистеме страны и повсеместно применяются как в сетях среднего напряжения 6–35 кВ, так и в сетях высокого напряжения 110–500 кВ. Одной из особенностей кабелей высокого напряжения является то, что их оболочка в некоторых случаях покрывается полупроводящим слоем, позволяющим упростить выявление ее повреждений. Оказалось, что при определенных обстоятельствах полупроводящий слой может принести кабелю не только пользу, но и существенно навредить. В силу значительной стоимости кабелей автор считает нужным поделиться с читателями информацией о подобных случаях, переданной владельцами линий, и предложить возможные пути исправления ситуации.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

Конструкция современных кабелей может включать разнообразные элементы, в зависимости от исполнения кабеля и предполагаемой области его применения. Однако, пожалуй, ни один кабель напряжением свыше 1 кВ не обойдется без токоведущей жилы, изоляции, проводящего экрана поверх изоляции, наружной герметизирующей оболочки. Хотя экран и оболочка кабеля, в отличие от жилы и изоляции, кажутся второстепенными элементами конструкции, на самом деле они выполняют важные функции: заземленный экран отвечает за выравнивание электрического поля в изоляции, а оболочка позволяет герметизировать кабель, то есть защитить его от проникновения влаги, опасной для основной изоляции и способной рано или поздно привести к ее пробое (короткому замыканию).

Состояние оболочки кабеля проверяют путем испытаний, в рамках которых между временно разземленным проводящим экраном и «землей» прикладывают напряжение, и если в этом контуре зафиксирован ток, то это трактуется как повреждение оболочки.

Проблема заключается в том, что существует ряд случаев, когда в испытательном контуре, даже если в него входит поврежденная оболочка кабеля, ток протекать не может. Например, к таким случаям относятся следующие: прокладка кабелей в сухом грунте, на воздухе по открытым конструкциям, в полимерных трубах.

Перечисленные варианты прокладки являются достаточно распространенными, и для обеспечения возможности объективных испытаний диэлектрической оболочки кабелей (ее толщина обычно 4–5 мм) она в заводских условиях покрывается снаружи тонким полупроводящим (ПП) слоем, толщиной не менее 0,1 мм. Указанный ПП-слой может напыляться на диэлектрическую оболочку кабеля, но чаще он экструдируется совместно с ней при производстве.

Ключевые слова:

кабельная линия, однофазный кабель, сшитый полиэтилен, наружная оболочка кабеля, полупроводящий слой по оболочке, испытания оболочки, повреждения оболочки

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ



Согласно технической политике ПАО «Россети» [1] кабели высокого и среднего напряжения следует покрывать ПП-слоем прежде всего при их прокладке в сооружениях. В отличие от [1], требования [2] касаются только кабелей высокого напряжения, и для этих кабелей предполагают использование ПП-слоя вне зависимости от условий прокладки.

Интересно, что согласно опыту эксплуатации, при определенных обстоятельствах, не отраженных в нормах, ПП-слой может спровоцировать повреждение кабеля. Речь идет о случаях, когда вдоль трассы кабельной линии (КЛ) имеется лишь ограниченное число мест, где ПП-слой контактирует с грунтом или заземленными конструкциями. Чтобы показать это, последовательно рассмотрим далее три различных ситуации:

- испытания оболочки кабелей;
- включение КЛ под напряжение;
- нормальный режим работы КЛ.

ИСПЫТАНИЯ ОБОЛОЧКИ

Испытания оболочки кабеля проводятся как в заводском цехе непосредственно после экструзии оболочки (испытания «на проход»), так и в дальнейшем на объекте после доставки и прокладки кабеля. Как правило, для кабелей 110–500 кВ оболочка проверяется путем приложения к разземленному экрану испытательного постоянного напряжения $U_{и}$ = 10 кВ на 1 минуту [3]. Напряжение прикладывается между экраном и «землей» (рисунок 1).

Если оболочка имеет ПП-слой, то напряжение $U_{и}$ можно прикладывать между экраном и этим слоем (а не «землей»), однако это сопряжено с определенными трудностями. Дело в том, что в местах установки кабельных муфт с оболочки снимается ее ПП-слой, и тем самым появляются разрывы ПП-слоя вдоль кабелей КЛ, а значит напряжение $U_{и}$ между экраном и ПП-слоем, приложенное в начале кабеля, не может быть передано на последующие участки кабеля, расположенные за соединительной муфтой. В случаях, где проектом предусмотрена засыпка соединительных муфт грунтом, разрывы ПП-слоя оказываются шунтированы грунтом, и помех испытаниям возникать уже не должно.

При монтаже кабельных муфт (соединительных и концевых) снятие с оболочки ее ПП-слоя необходимо для обеспечения зазора между проводящим экраном кабеля (обычно проволочным) и ПП-слоем оболочки. Если зазор между указанными элементами (экраном и ПП-слоем) недостаточный, то при испытаниях оболочки возможен пробой с экрана на ПП-слой и далее на «землю», что зашунтирует оболочку и помешает объективно оценить ее состояние. Таким образом, при монтаже каждой кабельной муфты (соединительной и концевой) необходимо снять с наружной оболочки кабеля ее ПП-слой на участке кабеля длиной несколько сантиметров, что указано в инструкциях по монтажу муфт.

Иногда разрыв ПП-слоя организуют не внутри корпуса муфты, а за его пределами. Это делается с целью обеспечения возможности визуальной инспекции муфты и проверки наличия разрыва ПП-слоя.

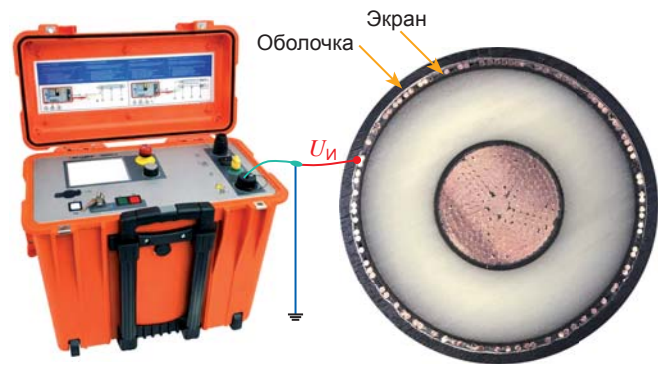


Рис. 1. Схема испытания оболочки кабеля

Пример такой концевой муфты показан на рисунке 2, где черный наружный ПП-слой счищен, а под ним видна основная оболочка, имеющая натуральный цвет (то есть оболочка белого цвета, без окраски).

В ряде случаев кабельные заводы могут изготавливать основную оболочку кабеля не натурального (белого) цвета, а красного, что также удобно для контроля факта снятия ПП-слоя. Если же основная оболочка кабеля и ПП-слой выполнены одного цвета (скажем черного), то зрительно (как на рисунке 2) проверить факт снятия ПП-слоя уже не получится.

Рассмотрим далее особенности проведения испытаний оболочки кабеля. Положим, что к разземленному экрану кабеля приложено испытательное напряжение $U_{и}$ (рисунок 3). Если оболочка кабеля повреждена, и кабель в данном месте имеет хороший контакт с прилегающим грунтом (или с какими-то заземленными конструкциями, по которым он проложен), то в таком случае под действием напряжения $U_{и}$ возникнет ток (рисунок 3а), факт появления



Рис. 2. Видимый разрыв ПП-слоя на оболочке кабеля

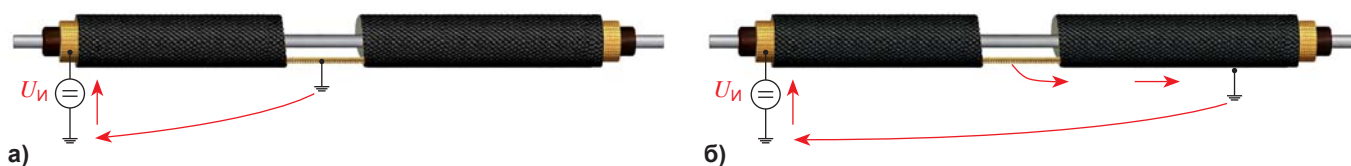


Рис. 3. Места выхода испытательного тока из кабеля в землю:

а) непосредственно в месте повреждения оболочки; б) в месте хорошего контакта ПП-слоя с землей

которого и означает, что оболочка кабеля повреждена, а значит потребуются:

- поиск конкретного места повреждения [4];
- ремонт оболочки;
- повторные испытания оболочки.

На практике возможны ситуации, когда в месте повреждения оболочки кабеля нет контакта с «землей» (грунтом или с заземленными конструкциями). Например, это может быть или в случае прокладки в сухом грунте, или на воздухе, или в полимерных трубах. Во всех перечисленных случаях ПП-слой способен повысить вероятность обнаружения фактов повреждения оболочки, однако все же крайне важно, чтобы такой ПП-слой имел контакт с «землей», пусть и не непосредственно в месте повреждения оболочки, а где-то в другом месте трассы (рисунок 3б). Если же ПП-слой имеет мало мест контакта с «землей» (или же вовсе не имеет), то его эффективность снижается (или же вовсе пропадает).

В ситуации, когда ПП-слой имеет мало мест контакта с «землей», возникает еще одна проблема — в этих местах концентрируется ток, стекающий

с поверхности кабеля в землю, создавая там угрозу локального точечного перегрева оболочки, ее оплавления и даже повреждения кабеля. Это может случиться, например, во время поиска места повреждения оболочки, ведь в зависимости от используемого метода/прибора для поиска ток может достигать десятков ампер (характер тока бывает импульсный, постоянный, переменный).

В частности, эта ситуация возникает при прокладке кабелей в полимерных трубах, которые обычно являются диэлектрическими и поэтому выпускают ток с ПП-слоя кабеля в грунт лишь по концам трубного участка — это не только создает риски для ПП-слоя и оболочки кабеля в местах концентрации испытательного тока, но и в целом бесполезно для локализации повреждения вдоль трубного участка (при поиске повреждения факт выхода тока в грунт по концам трубного участка не дает представления о том, где именно на трубном участке находится место повреждения оболочки). Таким образом, чем больше мест контакта ПП-слоя с грунтом будет на трубных участках, тем безопаснее для ПП-слоя (и оболочки кабеля), и тем проще и точнее можно найти исходное место повреждения.

ВКЛЮЧЕНИЕ КЛ

Проблемы, возникающие в местах плохого контакта ПП-слоя оболочки с «землей» (грунтом или заземленными конструкциями), проявляют себя не только при испытаниях и поиске повреждений, но и при коммутациях КЛ, и в процессе ее нормальной работы.

В качестве примера рассмотрим включение под напряжение открыто проложенной КЛ 220 кВ, в ходе которого на видео и фото (рисунок 4) запечатлены многочисленные дуговые разряды, возникающие в местах крепления кабелей к конструкциям. Данная КЛ проходит на одном из предприятий алюминиевой отрасли России и подключена к трансформатору 220 кВ переходными муфтами «СПЭ-масло». Разряды возникают по воздуху, между ПП-слоем оболочки и алюминиевыми хомутами, фиксирующими кабель на заземленных металлических конструкциях, и представляют собой перекрытия по воздуху силиконовых вставок между кабелем и хомутами (рисунок 5а), что сопровождается громкими хлопками.

Перекрытия вызваны кратковременными импульсами напряжения (несколько кВ), которые при коммутации наводятся на ПП-слое оболочки кабеля с жилы и экрана кабеля. Ситуация опасна тем, что указанные перекрытия происходят каждый раз в одних и тех же местах оболочки, постепенно ее разрушая.

Исключения перекрытий можно было добиться одним из двух способов:

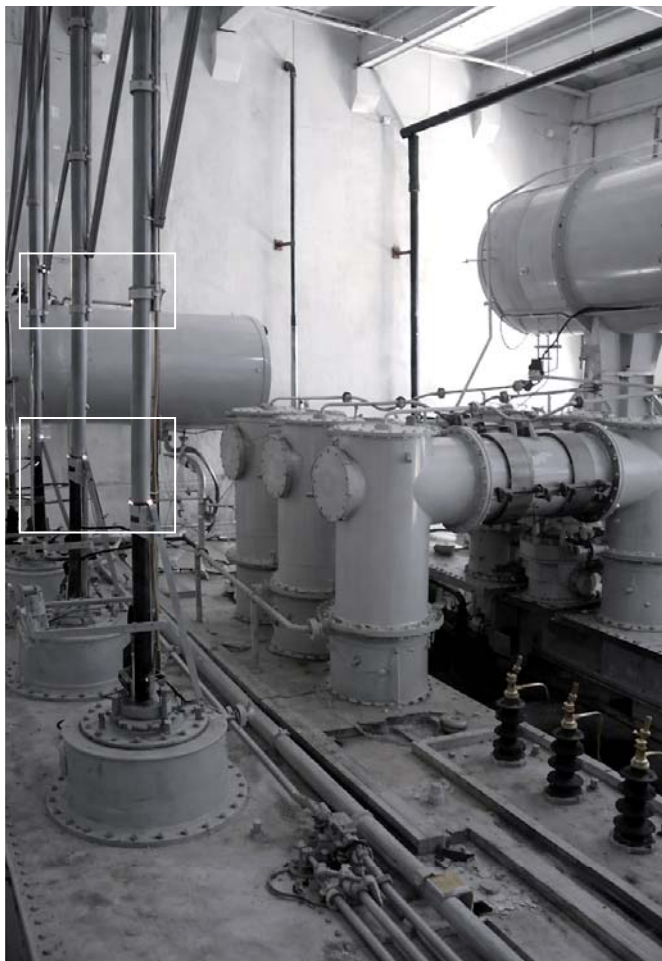


Рис. 4. Искрение при включении КЛ 220 кВ

- значительно увеличить число мест контакта ПП-слоя с «землей», то есть отказаться от силиконовых вставок, имеющих диэлектрические свойства;
- полностью исключить любые контакты ПП-слоя с «землей», то есть усилить изоляцию в местах крепления кабелей к конструкциям.

Так как отказаться от силиконовых вставок не представлялось возможным, то для решения проблемы выбрали второй способ — заменили алюминиевые хомуты на хомуты из полиамида (рисунок 5б), что обеспечило высокий уровень изоляции ПП-слоя от «земли» и полностью устранило проблему перекрытий в хомутах, исключив деградацию оболочки. Полное разземление ПП-слоя оказалось оптимальным решением, в том числе и потому, что в силу особенностей трассы КЛ отсутствовала возможность прикосновения персонала к поверхности кабеля как в момент коммутации КЛ, так и в процессе эксплуатации.

Импульсные перекрытия с ПП-слоя на «землю» могут возникать не только в случае прокладки кабелей по конструкциям, но также и при прокладке кабелей в сухом грунте или в полимерных трубах. Например, если значительная часть трассы КЛ размещена в диэлектрических полимерных трубах, то точечных перекрытий с ПП-слоя на «землю» можно ожидать по концам трубного участка. Однако, в отличие от открытой прокладки, вовремя заметить негативные процессы будет невозможно и вероятно уже не получится избежать серьезных повреждений — это и произошло в случае, описанном далее.



а) б)
Рис. 5. Хомуты для крепления кабеля: а) алюминиевый с силиконовой вставкой; б) полиамидный диэлектрический

НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ КЛ

Деградация оболочки кабеля, покрытой ПП-слоем, может произойти не только при испытаниях или коммутации кабелей, но также и в нормальном режиме работы. Покажем это, например, обратившись к случаю одной из КЛ 132 кВ, которая отвечает за выдачу мощности крупной солнечной электрической станции в национальную сеть Испании.

Три одножильных кабеля КЛ 132 кВ были проложены в грунте в трех отдельных полимерных гофрированных трубах. После завершения плановых испытаний оболочки кабелей персонал ошибочно не вернул схему соединения экранов кабелей к проектной. В результате, после включения КЛ под напряжение, кабели несколько дней находились под воздействием сетевого напряжения, не имея при этом заземления экранов.

ПОДПИСКА – 2026

на журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение»

СТОИМОСТЬ* подписки для юридических/физических лиц
на ПЕЧАТНУЮ версию

- 1 номер – 3234 / 1200 руб.
- 3 номера – 8316 / 3240 руб.
- 6 номеров – 13 860 / 5760 руб.

В стоимость включена доставка журнала Почтой России заказной бандеролью.

Подписаться на печатную версию можно через агентства:

- «Урал-Пресс» — 36859 (на полугодие), 36861 (на год)
- «Почта России» — П7579 (на полугодие)

С любого номера на любой период

- можно подписаться через редакцию:
- на сайте eepir.ru в разделе «Подписка»
 - запросом на почту podpiska@eepir.ru
 - по телефону +7 (495) 645-12-41

на ЭЛЕКТРОННУЮ версию

- 3 номера – 3000 / 1800 руб.
- 6 номеров – 6000 / 3600 руб.

Предоставляется доступ к личному кабинету для просмотра журнала на сайте издательства в течение выбранного периода подписки, а также изданий за предыдущий год, находящихся в закрытом доступе, без права их распространения, в том числе отдельных частей или материалов.



* Стоимость указана с учетом НДС



Рис. 6. Муфта, соединяющая две полимерные трубы

Как следствие, на экране каждого кабеля имелось повышенное напряжение 50 Гц, обусловленное емкостной связью между жилой кабеля и экраном. В свою очередь, под действием указанного напряжения, с экрана через оболочку кабеля в направлении грунта проходил емкостный ток. Поскольку кабель был проложен в диэлектрических трубах, то ток не имел возможности равномерно выходить с кабеля в грунт, используя для этого всю длину кабеля, а сосредоточился лишь в том месте, где ПП-слой контактировал с «землей».

Местом выхода тока с ПП-слоя в грунт оказалось соединение двух последовательно расположенных трубных участков при помощи муфты (рисунок 6). Такая муфта, во-первых, имеет сниженную электрическую прочность по сравнению с самой трубой, а во-вторых, не является герметичной, и способна пропускать в трубу некоторое количество воды, т. е. создавать «землю». Оба фактора и привели к выходу тока с ПП-слоя кабеля в грунт именно в данном месте трассы. Поскольку процесс протекания тока 50 Гц продолжался непрерывно на протяжении дней, то оболочка кабеля была повреждена (рисунок 7) и потребовала серьезного ремонта.

Интересно, что если бы оболочка кабеля вообще не имела бы ПП-слоя, то в таком случае факт отсутствия заземления экранов не привел бы к повреждению оболочки.

Если же рассматривать кабель с ПП-слоем, то исключения повреждения оболочки можно было бы добиться одним из двух следующих способов (опустим здесь очевидную необходимость проверять заземление экранов перед включением линии в работу):

- значительно увеличить число мест контакта ПП-слоя с «землей», то есть прокладывать кабель или непосредственно в грунте или в проводящих трубах;
- полностью исключить любые контакты ПП-слоя с «землей».

Второй случай при прокладке в грунте едва ли возможен. Что касается первого, то трубная про-



Рис. 7. Последствия точечного контакта ПП-слоя кабеля КЛ 132 кВ с землей на стыке труб

кладка незаменима на многих участках трассы КЛ, и поэтому для подобных участков (во избежание точечных повреждений наружной оболочки кабеля) необходимо прокладывать кабели не в диэлектрических трубах, а в проводящих — подобными трубами могут быть или металлические (из немагнитных материалов) или полимерные, имеющие проводящие свойства боковой стенки, в направлении от внутренней поверхности трубы в сторону ее внешней поверхности [5].

ВЫВОДЫ

Техническая политика предполагает, что кабели классов 110–500 кВ должны иметь полупроводящий слой по наружной оболочке, с целью повышения наблюдаемости за состоянием этой оболочки. Вместе с тем, как показывает опыт эксплуатации, ПП-слой при определенных условиях может представлять опасность для кабеля и персонала сетей.

В статье рассмотрен ряд примеров, показывающих, что если вдоль кабеля имеется лишь ограниченное число мест контакта ПП-слоя с «землей» (грунтом или заземленными конструкциями), то в этих местах возникают искровые и дуговые процессы, способные серьезно повредить наружную оболочку.

При прокладке кабелей в грунте проблема с ПП-слоем возникает только на трубных участках, и для ее решения достаточно, чтобы боковая стенка трубы могла проводить ток в направлении изнутри наружу. Использование диэлектрических труб не рекомендуется.

При прокладке кабелей на воздухе сложно найти какое-то универсальное решение проблемы, так как приходится выбирать между многократным повторным заземлением ПП-слоя или, напротив, его полной изоляцией от металлических конструкций, на которых располагается кабель. Первое затруднено в силу отсутствия на рынке соответствующих кабельных хомутов, а второе — в силу опасности для персонала, находящегося у кабеля. 📧

ЛИТЕРАТУРА /

1. Положение ПАО «Россети» о единой технической политике / «Technical Policy of PJSC ROSSETI» (approved by Protocol No. 673, dated 12/28/2024). URL: https://www.rosseti.ru/upload/docs/PETP_2024.pdf.
2. СТО 56947007-29.230.20.087-2011. Типовые технические требования к кабельным системам 110, 220, 330, 500 кВ. / STO 56947007-29.230.20.087-2011 «Technical requirements for 110, 220, 330, 500 kV cable systems». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200123517>.
3. IEC 60229-2007 «Electric cable – Tests on extruded over sheaths with a special protective function».
4. CIGRE TB 773 «Fault location on land and submarine links (AC&DC)», September 2019.
5. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Изд-во Политех-ПРЕСС, 2021. 688 с. / M.V. Dmitriev «High voltage cable lines». – St. Petersburg: PolytechPRESS Publishing House, 2021. – 688 p.