

Поиск повреждений кабельных линий 6-500 кВ

УДК 621.315.21

В предыдущем номере журнала была опубликована статья, где рассматривались трудности, которые возникают при испытаниях кабельных линий, проложенных в полимерных трубах. Новая статья призвана развить тему и затрагивает поиск конкретных мест повреждения кабелей. Следует отметить, что вопросы поиска повреждений кабелей и связанные с ними проблемы являются столь важными, что в сентябре 2019 года международный совет СИГРЭ посвятил им целую техническую брошюру № 773, насчитывающую 152 страницы.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

ВВЕДЕНИЕ

В мире известно большое число разнообразных конструкций кабелей высокого напряжения. По роду тока существуют кабели для передачи мощности переменным током и кабели для передачи мощности постоянным током. По числу токоведущих жил кабели переменного тока различают на трехфазные кабели и трехфазные группы однофазных кабелей. По типу изоляции широко известны кабели с твердой изоляцией (сшитый полиэтилен, этиленпропиленовая резина) и кабели с бумажно-масляной изоляцией (пропитка маслом, масло низкого давления, масло высокого давления).

На трассе кабеля могут встречаться участки, проложенные теми или иными из перечисленных ниже способов:

- над землей по различным конструкциям;
- в земле (в открытом грунте или в трубах);
- по дну водоемов (в донном грунте или в трубах).

Причины возникновения повреждений кабельных линий очень разнообразны:

- дефект производства;
- небрежный монтаж;
- некачественный ремонт;
- неудачная конструкция кабеля или муфты;
- ошибки проектирования трассы;
- механическое повреждение;
- другие факторы.

Повреждения кабелей могут быть одноместными и многоместными. Каждое из повреждений кабеля может иметь низкое или высокое переходное сопротивление, и поэтому они называются, соответственно, низкоомными или высокоомными (более 100 Ом). Также возможны неустойчивые повреждения, носящие дуговой характер или же носящие «заплывающий» характер (когда кабель способен к самозалечиванию на какой-то промежуток времени, после чего повреждение вновь проявляет себя).

Повреждения могут быть продольными (обрыв жилы, экрана, всего кабеля) и поперечными (нарушение главной изоляции кабеля или его внешней оболочки). Для поперечных возможны как повреждения между фазами, так и повреждения на землю. С точки зрения места возникновения повреждения бывают:

Ключевые слова:
кабельная линия,
кабель в трубе, сшитый полиэтилен, поиск повреждения

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ



- непосредственно в кабеле;
- в концевой или соединительной муфте;
- в дополнительном оборудовании (например, в коробке транспозиции экранов).

Перечисленное многообразие конструкций кабелей, условий их прокладки и видов повреждений говорит о том, что поиск конкретного места повреждения кабеля является серьезной задачей, для решения которой едва ли может существовать какой-то один универсальный способ. Вместе с тем, от скорости и точности поиска места повреждения зависят сроки ремонта линии и восстановления ее нормальной работы, а также количество воды, которое успело проникнуть в изоляцию кабеля из внешней среды и в будущем способно вызвать новые аварии. Учитывая изложенное, не стоит удивляться повышенному вниманию научного сообщества и инженеров-практиков к теме поиска повреждений. В частности, в сентябре 2019 года международный совет СИГРЭ опубликовал техническую брошюру [1], в которой рассмотрел практически все основные известные способы поиска мест повреждений кабельных линий.

Поскольку за последние годы в России значительно выросло число кабелей классов от 6 до 500 кВ, проложенных в полимерных трубах, то интерес представляет применимость известных способов поиска мест повреждений к таким изменившимся условиям размещения кабелей. В новой брошюре СИГРЭ трубным случаям посвящен отдельный параграф 3.7.1, в котором указывается на то, что современные полимерные трубы препятствуют поиску мест повреждения наружной оболочки кабелей, так как не позволяют испытательному току выходить из кабеля в грунт (для обеспечения возможности поиска приходится вскрывать трубы и делить их секции). Что касается повреждений главной изоляции кабеля, то и здесь трубы мешают процедуре поиска, например, если речь идет о поиске при помощи акустического метода (см. параграф 2.4.2 брошюры СИГРЭ [1]). Таким образом, проблемы с трубами, которые подробно описаны в статье [2], действительно заслуживают внимания. Вполне возможно, что четкое осознание наличия данных проблем послужит толчком для появления каких-то новых методов поиска повреждений кабелей, способных дополнить и без того уже широкую номенклатуру имеющихся на рынке приборов и установок.

Рассмотрим основные способы поиска повреждений кабелей, упомянутые в [1], и поясним, какие из них не смогут эффективно работать в случае, когда повреждение пришлось на трубный участок.

ПОИСК МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЯ

Процедуру поиска места повреждения кабеля можно разделить на два основных этапа: предварительный поиск и точный поиск. Предварительный поиск позволяет с ошибкой до нескольких десятков метров определить проблемный участок трассы, куда следует отправить выездную бригаду для выполнения уже точного поиска места, где случилось повреждение и где предстоит вести земляные и ремонтные работы.

Предварительный поиск осуществляется на выведенной из работы линии путем присоединения

к ее жиле оборудования, реализующего тот или иной метод поиска. Чаще всего достаточно присоединения только к одному из концов линии, однако в ряде случаев для повышения точности или же по другим причинам может возникнуть необходимость повторения процедуры путем присоединения оборудования также и на противоположном конце линии. Что касается точного поиска, то он предполагает выезд специалистов к участку трассы, на который указал предварительный поиск, и слаженную совместную работу людей на трассе и людей, оставшихся у концов кабеля и отвечающих за работу присоединенного там к кабелю поискового оборудования.

Жилы кабелей 6–500 кВ обычно имеют значительное сечение, и поэтому обрыв является редким событием и скорее характерен для случаев морской прокладки, где опасность исходит от судовых якорей. Поэтому большинство повреждений кабелей — это повреждения или главной изоляции, или наружной оболочки. Таким образом, не стоит удивляться, что не все методы годятся для поиска обрывов.

Рассмотрим вначале повреждения главной изоляции кабеля, а затем — оболочки.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПОИСК

Наиболее известными предварительными методами поиска места повреждения главной изоляции кабелей согласно [1] являются:

- волновой метод;
- импульсно-волновой метод;
- метод колебательного разряда;
- мостовой метод.

Волновой метод (Time Domain Reflectometry, TDR), как и многие другие методы предварительного поиска, основан на теории волновых процессов в линии, имеющей заданное волновое сопротивление Z_k и скорость распространения волны V_k . На конце кабеля к нему подключается генератор волн, которые распространяются по жиле и отражаются от мест, где имеется какая-то неоднородность (рисунок 1). Отражение волн происходит по известному закону:

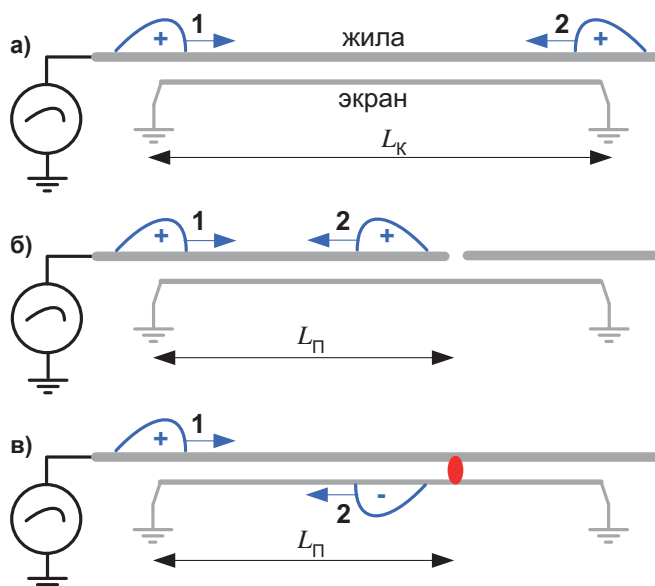


Рис. 1. Волновой метод поиска повреждения: а) кабель без повреждения; б) кабель с обрывом жилы; в) кабель с повреждением изоляции

- если сопротивление на пути волны превосходит Z_k (конец кабеля или его обрыв), то волна отражается с тем же знаком (рисунки 1а, 1б);
- если сопротивление на пути волны меньше Z_k (низкоомное повреждение), то волна отражается с противоположным знаком (рисунок 1в).

По характеру осциллограмм, которые фиксируются в месте подключения волнового генератора, можно определить вид повреждения (рисунок 2). Расстояние же до повреждения L_n можно найти по интервалу времени между соседними колебаниями, который виден на осциллограмме. Этот интервал времени равен сумме времени T_n пробега волны от генератора до места повреждения и времени T_n возврата волны назад, то есть составляет $2T_n$. Получив $2T_n$ по осциллограмме и определив таким образом T_n , далее, зная скорость волны V_k , расстояние до места повреждения может быть вычислено как $L_n = T_n \cdot V_k$.

К сожалению, по мере распространения волн вдоль кабеля они деформируются и затухают. Также некоторые отражения волн происходят и в местах расположения соединительных муфт. Все это требует от специалистов определенной квалификации, чтобы верно интерпретировать осциллограммы и хотя бы примерно найти расстояние L_n до места повреждения. Использование волнового метода для предварительного поиска, а не точного, связано еще и с тем, что, как правило, скорость распространения волны вдоль кабеля V_k известна лишь с погрешностью до 5–10%.

Высокоомные повреждения кабеля не способны вызвать заметного отражения или преломления волн, и поэтому их трудно выявить при помощи волнового метода. В таком случае перед использованием волнового метода рекомендуется перевести это повреждение из высокоомного в низкоомное, что

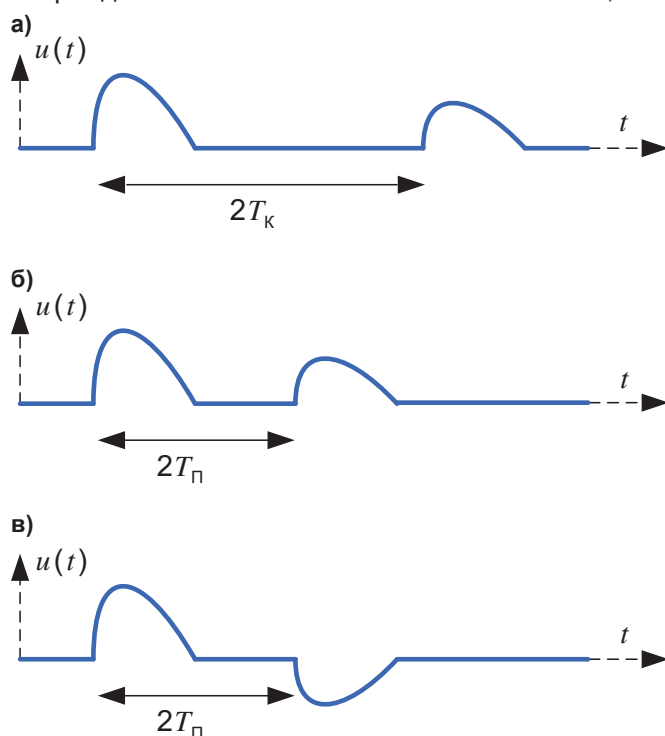


Рис. 2. Осциллограммы волнового метода: а) кабель без повреждения; б) кабель с обрывом жилы; в) кабель с повреждением изоляции

можно сделать путем прожига (Burn down technique). Прожиг производится в несколько этапов — на первом этапе на кабель подается повышенное постоянное напряжение, приводящее к пробое поврежденного места изоляции. На следующем этапе прожига контролируется уже не напряжение, а ток, тепловым воздействием которого и осуществляется прожиг изоляции. По мере снижения сопротивления в месте повреждения изоляции кабеля для поддержания тока требуется все меньшее напряжение источника (рисунок 3).

Важно отметить, что согласно п. 2.3.3 брошюры СИГРЭ [1], прожиг изоляции можно использовать для кабелей с масляной изоляцией, а для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) его применение не рекомендуется, поскольку способно привести к существенному увеличению размеров места повреждения. Поэтому для СПЭ разработан импульсный прожиг, реализованный в импульсно-волновом методе поиска повреждений.

Импульсно-волновой метод (Arc Reflection Method, ARM), также называемый методом стабилизации электрической дуги, может считаться некоторой комбинацией процедуры прожига и волнового метода. Этот метод специально разработан для СПЭ-изоляции и заключается в следующем: генератор, подключенный на одном из концов кабеля, отправляет в кабель силовой импульс напряжения, который вызывает пробой места повреждения (рисунок 4) на время до нескольких миллисекунд, не представляющее опасности с точки зрения перегрева изоляции. Вслед за силовым импульсом в кабель отправляется зондирующая волна по аналогии с тем, как это происходило в волновом методе (рисунок 1). Силовой

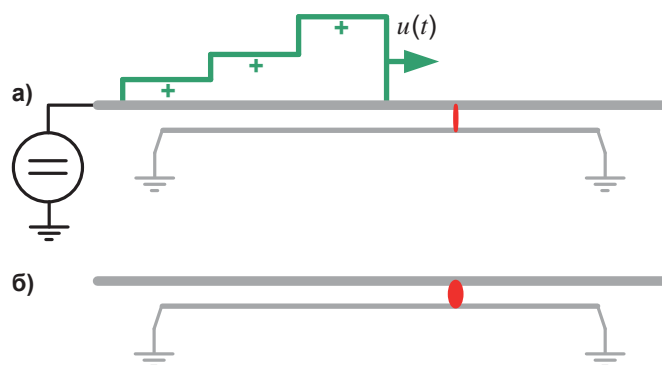


Рис. 3. Метод прожига: а) воздействие на высокоомное повреждение; б) переход повреждения в низкоомное

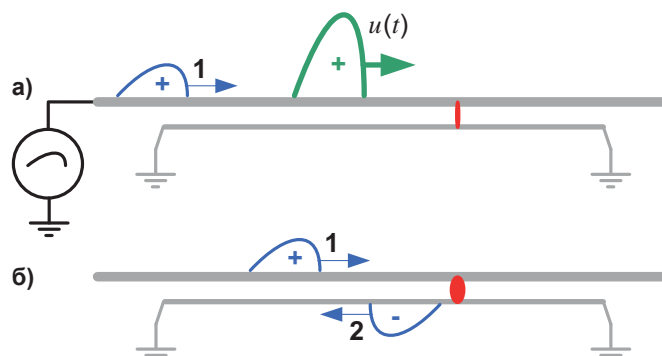


Рис. 4. Импульсно-волновой метод: а) генерация силового импульса и волны; б) волновой переходный процесс

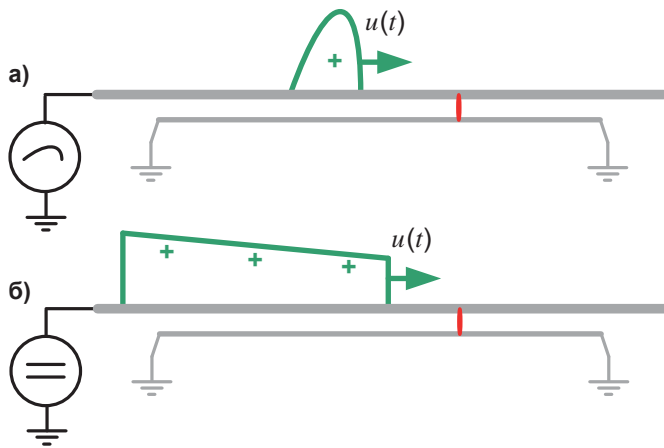


Рис. 5. Метод колебательного разряда: а) разряд инициируется импульсом; б) разряд инициируется постоянным напряжением

импульс и зондирующая волна должны синхронизироваться таким образом, чтобы волна приходила к месту повреждения в те моменты времени, когда силовой импульс уже вызывал пробой изоляции, но дуга еще не погасла. Есть модификации данного метода, когда в кабель направляют не одну, а сразу серию из нескольких зондирующих волн, после чего на экране осциллографа выбирают самую «удачную» из полученных осциллограмм.

Метод колебательного разряда — это еще один метод, который используется для поиска высокоомных повреждений. Если в импульсно-волновом методе силовой импульс и зондирующая волна представляли собой отдельные воздействия на кабель, и каждое из этих воздействий имело свою собственную функцию, то применительно к методу колебательного разряда можно сказать, что эти функции совмещены в одном общем воздействии на кабель (рисунок 5). Согласно [1], есть две основные модификации метода колебательного разряда:

- связь по току (Impulse Current Method);
- связь по напряжению (Decay Method).

В первом случае от источника, имеющего заряженный конденсатор большой емкости, в кабель направляется мощный силовой высоковольтный импульс (рисунок 5а), который обеспечивает пробой места с ослабленной прочностью изоляции, после чего в кабеле на участке между источником и местом пробоя возникает колебательный переходный процесс. Анализ осциллограмм этого процесса и определение периода колебаний позволяют получить информацию о расстоянии до повреждения.

Во втором случае источник представляет собой зарядное устройство, а в роли заряжаемого конденсатора выступает емкость кабельной линии. По мере процедуры заряда кабеля постоянное напряжение на его емкости возрастает (рисунок 5б), и в какой-то момент оно становится достаточным для пробоя места с ослабленной прочностью изоляции. На участке между источником и местом пробоя возникает колебательный переходный процесс. Анализ осциллограмм дает представление о месте повреждения.

Мостовой метод (Bridge Method), в отличие от всех предыдущих методов, не использует теории волновых процессов в линии. Схема поиска места

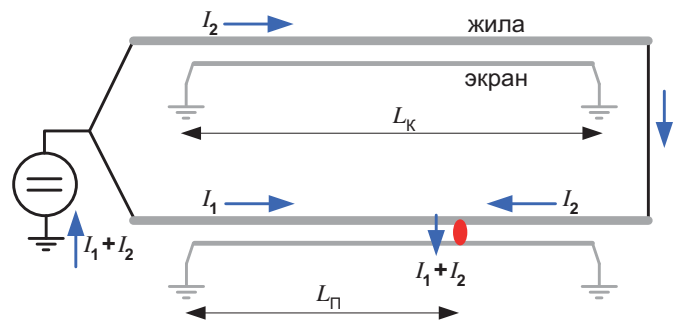


Рис. 6. Мостовой метод поиска повреждения

повреждения главной изоляции кабеля показана на рисунке 6 и, как видно, для использования метода требуется наличие хотя бы одной неповрежденной фазы. Также необходим доступ к обоим концам кабеля для установки набора перемычек, что затрудняет применение метода в случаях, когда кабель заходит в распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ).

Принципы работы электрического моста (мост Мюррея, мост Глейзера) есть во многих литературных источниках, однако здесь, с целью упрощения, поясним работу моста иначе. При использовании мостового метода (рисунок 6), по сути, производится сравнение друг с другом токов I_1 и I_2 , фиксируемых в двух плечах моста. Сравнение токов I_1 и I_2 позволяет оценить соотношение длины кабеля L_k и расстояния до места повреждения L_p , то есть дает возможность найти место повреждения. Например, случай $I_1 = I_2$ означает, что повреждение возникло вблизи конца кабеля $L_p = L_k$, а случай $I_1 \gg I_2$ означает, что повреждение вблизи начала кабеля $L_p \ll L_k$.

Прочие методы. Среди предварительных методов поиска повреждений кабеля известны также частотная рефлектометрия (Frequency Domain Reflectometry, FDR); метод измерения емкости изоляции кабеля; различные методы, которые основаны на анализе информации, получаемой от встроенного в кабель оптического волокна.

Отметим, что полимерные трубы, в которых все чаще прокладываются кабели, мешают выходу тока из кабеля в грунт. Однако большинство рассмотренных методов предварительного поиска повреждения не требуют выхода тока в грунт, и поэтому их применимость никак не ухудшится с появлением на трассе кабеля трубных участков.

ТОЧНЫЙ ПОИСК

Предварительные методы дают возможность найти примерное расположение места повреждения вдоль трассы линии, после чего это место необходимо уточнить путем дополнительных измерений, проводимых непосредственно рядом с аварийным участком. Чаще всего в качестве методов точного поиска места повреждения главной изоляции кабелей согласно [1] используются:

- акустический метод;
- индукционный метод;
- метод шагового напряжения.

Акустический метод (Acoustic method) предполагает, что с одного из концов в кабель подаются

силовые импульсы, приводящие к пробоям в месте повреждения, из-за чего в этом месте раздаются хлопки. Специалист с приемником звуковых сигналов проходит вдоль участка трассы, расположенного около места повреждения, и наблюдает за силой хлопков. Наибольшей величины сила хлопков достигнет тогда, когда специалист окажется непосредственно над местом повреждения (рисунок 7а).

Важно отметить, что пробои места повреждения, сопровождаемые хлопками, невозможны при низкоомном повреждении изоляции, и поэтому акустический метод применим, главным образом, для поиска высокоомных повреждений. Также важно, что акустический метод плохо работает, если кабель не касается грунта, а проложен в полимерной трубе. Дело в том, что воздух в трубе обеспечивает гораздо меньшее затухание звука, чем грунт, и поэтому хлопки хорошо слышны даже на значительном удалении от искомого места повреждения, и это не позволяет найти расположение источника звука.

Индукционный метод (Magnetic field method) предполагает, что с одного конца кабеля в него подается переменное напряжение, причем с целью отстройки от помех частота этого напряжения не должна быть кратна 50 Гц. Также необходима антенна, настроенная на измерение магнитного поля той частоты, которая задана у источника, подключенного к кабелю.

Переменный ток от источника проходит по жиле кабеля и создает вокруг него магнитное поле $H > 0$. Дойдя от источника до места повреждения, ток попадает в экран и окружающий грунт. Таким образом, за местом повреждения в кабеле уже не будет тока и связанного с ним поля $H = 0$. Для поиска места повреждения необходимо, чтобы специалист с ан-

тенной прошел по земле вдоль трассы кабеля и зафиксировал уровень магнитного поля протекающего по кабелю тока. Место трассы, начиная с которого наблюдаемое магнитное поле H начнет ослабевать вплоть до $H = 0$, как раз и будет расположено над повреждением кабеля (рисунок 7б).

Следует понимать, что для работы индукционным методом важно, чтобы ток в месте повреждения уходил из жилы не только в экран кабеля, но и хотя бы частично уходил в окружающий грунт через поврежденную оболочку кабеля. Если же оболочка цела и не выпускает ток с экрана в грунт, то в этом случае «прямой» ток жилы и «обратный» ток экрана окажутся близки друг другу по величине и противоположны по знаку, то есть магнитное поле у кабеля будет отсутствовать не только справа от места аварии ($H = 0$ на рисунок 7б), но и слева от него (там, где на рисунке 7б сейчас стоит $H > 0$), что сделает индукционный метод бесполезным.

Даже если оболочка кабеля имеет повреждение, то в некоторых случаях ток все равно не может выйти в окружающий грунт, что создает препятствия для применения индукционного метода — это происходит, когда кабель проложен в полимерной трубе.

Метод шагового напряжения (Step voltage methods) заключается в измерениях шагового напряжения вдоль трассы кабеля рядом с местом повреждения (рисунок 7в). На конце кабеля к нему подключается источник постоянного напряжения, под действием которого ток из кабеля через место повреждения выходит в окружающий грунт, где растекается и создает тем самым шаговое напряжение. Специалист идет вдоль трассы кабеля и при помощи двух металлических электродов, втыкаемых в землю вдоль кабеля на удалении 0,3–0,5 м друг от друга, измеряет прибором шаговое напряжение. Точка трассы, где знак шагового напряжения меняется на противоположный, и есть искомое место.

Принцип измерения шагового напряжения можно применять, лишь когда ток из места повреждения кабеля имеет возможность выхода в окружающий грунт. Если кабель проложен в полимерной трубе, то ток не сможет выйти в грунт, и поэтому метод шагового напряжения работать не будет. Исключение составит ситуация, когда труба заполнена водой, и эта вода помогает току дойти от места повреждения кабеля до торцов трубы и там уйти в грунт — на этих торцах удастся зафиксировать изменение знака шагового напряжения, но такая информация едва ли будет полезной при поиске точного места повреждения.

ПОИСК МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧКИ

Методы, показанные на рисунках 1–7, имеют отношение к поиску места повреждения главной изоляции кабеля или к поиску места обрыва кабеля. Применимость данных методов для поиска повреждения оболочки кабеля должна быть оговорена отдельно.

Предварительный поиск. Волновые методы хорошо работают именно при поиске поврежде-

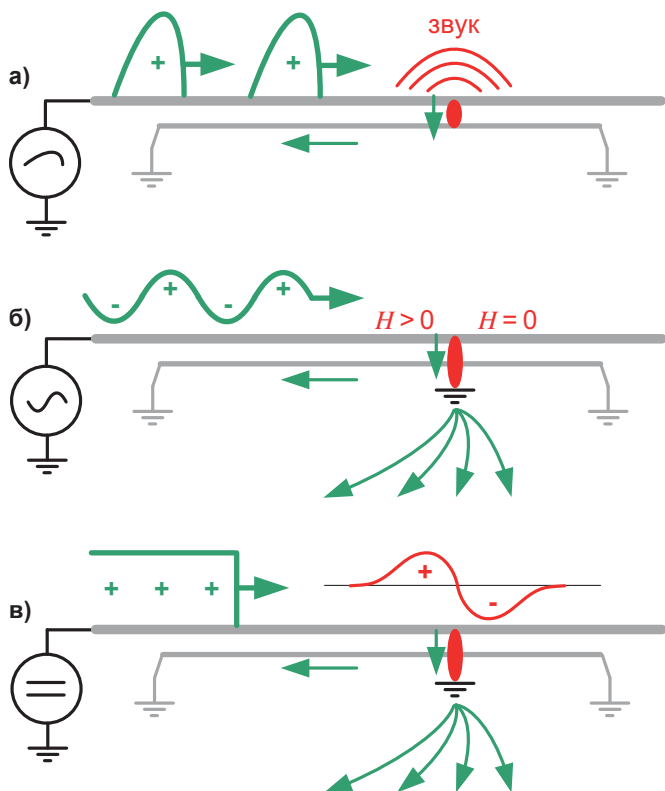


Рис. 7. Методы точного поиска: а) акустический; б) индукционный; в) шагового напряжения

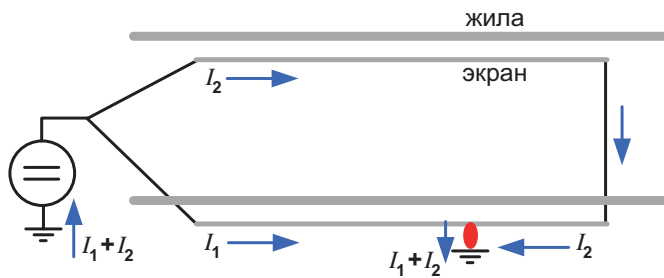


Рис. 8.
Мостовой метод
поиска повреж-
дения оболочки

ний изоляции кабеля, так как волны распространяются между жилой и экраном кабеля с известной постоянной скоростью, определяемой диэлектрической проницаемостью изоляции, а затухание таких волн остается в приемлемых рамках. Если стоит задача поиска места повреждения оболочки кабеля, то волны необходимо запускать не в жилу кабеля, а в экран, и, таким образом, они будут распространяться уже не между жилой кабеля и его экраном, а между экраном и грунтом. К сожалению, определение скорости и затухания волны в грунте — сложные инженерные задачи, решение которых зависит от многих влияющих факторов. Поэтому применение волновых методов для поиска места повреждения оболочки кабеля затруднено.

Отбросив волновые методы, для предварительного поиска повреждения оболочки кабеля остается только мостовой метод, схема которого дана на рисунке 8. Как видно, для использования метода нужен выход тока в окружающий грунт, а значит полимерные трубы будут препятствовать процедуре поиска.

Точный поиск. Для поиска места повреждения оболочки кабеля в грунте можно применять те же методы точного поиска, которые были рассмотрены для главной изоляции кабеля (рисунок 7). Отличие заключается, в том, что установки надо подключать не к жиле кабеля, а к его экрану, и испытательный ток при этом будет выходить не с жилы в экран кабеля, а с экрана в окружающий грунт.

Появление на трассе кабеля трубных участков мешает выходу испытательного тока с экрана кабеля в грунт, и поэтому использование известных точных методов (акустический, индукционный, шаговый) оказывается неэффективных для поиска места повреждения оболочки кабеля [1, 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на брошюре СИГРЭ [1] и других источниках, в статье дан обзор основных методов поиска места повреждения кабельных линий и показано, почему современные полимерные трубы мешают:

- точному поиску места повреждения главной изоляции;
 - предварительному и точному поиску места повреждения оболочки.
- Таким образом, несмотря на значительное многообразие методов, материалы статьи подтверждают выводы международной комиссии СИГРЭ [1] о том, что поиск повреждения на тех участках трассы, где кабели проложены в полимерных трубах (ducts, pipes), является серьезной проблемой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fault location on land and submarine links (AC & DC)» / Cigre Technical Brochure № 773, September 2019,152 p.
2. Дмитриев М.В. Испытания кабелей 6–500 кВ в полимерных трубах // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2019, № 4(55). С. 82–85.

REFERENCES

1. Fault location on land and submarine links (AC & DC)» // Cigre Technical Brochure № 773, September 2019.152 p.
2. Dmitriev M.V. Methods of reducing the voltage induced on the cable line 6-500 kV. ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution, 2019, no. 4(55), pp. 82–85.

ELKACABLE

ELKAPOWER
Кабель силовой на
напряжение 0,66 и 1 кВ с
 жилой из сплава ТАС



Ниже
СТОИМОСТЬ



Ниже вес



Повышенная
надежность
контакта



www.okp-perm.ru