

Количество кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена возрастает с каждым годом, соответственно накапливается опыт эксплуатации.

Проанализировав имеющиеся сведения, Михаил Викторович Дмитриев рассказывает о типичных ошибках при выборе и реализации схем заземления экранов кабелей.

ЭКРАНЫ ОДНОФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ 6–500 кВ

Ошибки при выполнении схем заземления



Михаил Дмитриев,
к.т.н., заместитель генерального
директора по научной работе
ПКБ «РосЭнергоМонтаж»
г. Санкт-Петербург

По мере все более широкого применения однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при сооружении линий среднего и высокого напряжения, всё чаще проявляются проблемы, связанные с ошибками проектных организаций, некачественным оборудованием, небрежным монтажом и т.д. Если исключить повторение хотя бы основных, самых распространенных ошибок, то это существенно повысит эффективность и надежность КЛ.

Конструкция однофазного кабеля упрощенно показана на рис. 1, а на рис. 2 даны основные схемы соединения и заземления экранов трехфазных групп таких кабелей [1, 2].

В качестве примера на рис. 2 показан кабель, имеющий три строительные длины. Они связаны друг с другом в зависимости от принятой схемы соединения и заземления экранов: или при помощи простых соединительных муфт (МС), или при помощи специальных транспозиционных муфт (МТ) с разрывом экрана и выводом концов наружу. Также на линии имеются концевые муфты (МК).

В местах разземления экранов (рис. 2б) или их транспозиции (рис. 2в) для защиты оболочки кабеля от импульсных перенапряжений устанавливаются ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), которые размещаются внутри специальных электромонтажных коробок – концевых коробок (КК-ОПН) или коробок транспозиции (КТ-ОПН). Электрическая связь экранов силового кабеля с защитными ОПН выполняется вспомогательным кабелем, в качестве которого используют так называемый провод соединительный с полиэтиленовой изоляцией (ШПС).

Рассмотрим типичные ошибки при создании схем заземления экранов.

ВЫБОР СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ И ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ

Схема «Заземление экранов с двух сторон»

Данная схема заземления экранов (рис. 2а) – самая простая, однако она имеет существенный недостаток: в экранах кабеля наводятся токи промышленной частоты, создающие дополнительные потери мощности и вызывающие:

- ограничение пропускной способности кабеля по условию нагрева изоляции;
- необходимость оплаты этих потерь.

Таким образом, применение простого двустороннего заземления экранов зачастую само по себе является ошибочным техническим решением.

Кроме того, даже если схема рис. 2а применена обоснованно, то нередко она имеет непродуманную конструкцию узла заземления. Например, если на рис. 3а в нормальном установившемся режиме работы ток в контуре заземления I_{ABC} отсутствует, то в схеме рис. 3б по элементам контура заземления уже будут проходить уравнивающие токи I_{AB} и I_{BC} , которые нагреют его стальные элементы сверх температуры медных экранов кабеля.

В качестве примера на фото 1 показана двухцепная кабельная линия 10 кВ, проложенная от двух трансформаторов 110/10 кВ до двух секций шин 10 кВ (в каждой фазе линии при

этом имеется сразу три однофазных кабеля для обеспечения необходимой пропускной способности по току). Экраны фаз кабеля заземлены на различные участки металлической подерживающей рамы, что вызвало их перегрев.

Схема «Заземление экранов с одной стороны»

Рассматриваемая схема (рис. 2б) лишена недостатков предыдущей, однако она применима лишь для линий небольшой длины из-за необходимости ограничивать напряжение промышленной частоты на конце экрана относительно земли пропорционально длине кабеля и величине тока КЗ.

Для увеличения длины кабельных линий, при которых еще можно применять данную схему, т.е. для борьбы с токами и потерями в экранах, в [1, 2] предлагается два способа, позволяющих снизить напряжение промышленной частоты на экране относительно земли:

- разделение кабеля на $K > 1$ последовательно соединенных секций, каждая из которых имеет экраны, заземленные один раз [1, 2];
- прокладка металлической заземленной шины [3], параллельной кабельной линии.

При секционировании экранов напряжение на экране относительно земли снижается прямо пропорционально увеличению числа секций K . Однако при этом из-за секционирования экранов заметно усложняются испытания оболочки и поиск ее повреждений, поскольку на время их проведения требуется обеспечить доступ к пунктам секционирования с целью подключения оборудования. Всё это с точки зрения затрат на строительство и эксплуатацию сближает решение $K > 1$ с транспозицией экранов. Поскольку транспозиция экранов эффективнее снижает напряжение на экране относительно земли, то решение $K > 1$, как правило, является неудачным, отчасти даже ошибочным.

Что касается металлической шины, то на ее применении совместно со своими кабелями настаивают некоторые зарубежные производители. В [3] показано, что шина позволяет снизить наводимое на экран напряжение промышленной частоты в одном единственном случае – при однофазном КЗ в сети 110–500 кВ с заземленной нейтралью, причем не более чем в 1,5–2,0 раза по сравнению со случаем ее отсутствия.

Не до конца понимая назначение такой шины, ряд проектных организаций идет на поводу у иностранных производителей кабелей и ошибочно предусматривает её даже для тех линий 110–500 кВ, у которых при однофазном КЗ напряжение на экране относительно земли с запасом меньше допустимого.

Схема «Идеальная/неидеальная транспозиция экранов»

Схема (рис. 2в) также не имеет токов и потерь в экранах, но применяется в тех случаях, когда недорогая схема рис. 2б (и её вариации) не проходит по напряжению на экране относительно земли. На рис. 2в показан один полный цикл транспозиции $N = 1$, когда $3N - 1$ узла транспозиции делят трассу на $3N$ участков. Для ограничения напряжения на экране относительно

земли в узле транспозиции, пропорционального длине участка кабеля между узлами транспозиции и величине тока КЗ сети, иногда требуется несколько полных циклов $N > 1$.

Эффективность транспозиции снижается (в экранах появляются некоторые токи и вызванные ими потери мощности) в следующих случаях:

- различаются длины участков между узлами транспозиции;
- различаются расстояния между фазами (способ прокладки) на участках между узлами транспозиции (например, из-за наличия проколов под препятствиями).

В [4] было показано, что встречающееся на практике различие длин участков между узлами транспозиции или различие способов прокладки не является сколь-нибудь катастрофичным и не может рассматриваться как причина отказа от транспозиции. Поэтому попытка некоторых специалистов жестко требовать выполнения критериев идеальной транспозиции (равные длины участков, одинаковый способ прокладки) следует признать ошибочным – неидеальная транспозиция вполне работоспособна.

Это важно понимать, поскольку в условиях плотной городской застройки, большого числа преград (в том числе водных) и проколов для многих линий на практике может быть реализована лишь неидеальная транспозиция.

Также известны случаи, когда не удается найти место для реализации полной транспозиции экранов и число участков оказывается некратным трем.

Например, такая неполная транспозиция может иметь один пункт транспозиции, который делит трассу кабеля на два участка примерно равной длины. Это решение можно применять для линий, у которых заземление экранов с одной стороны уже не «проходит» из-за повышенного напряжения на экране относительно земли, а полный цикл транспозиции еще не получается из-за небольшой длины линии и отсутствия достаточного числа соединительных муфт.

В подобной схеме с одним пунктом токи экранов оказываются сниженными в 2 раза, а потери в экранах – в 4 раза по сравнению с исходным случаем простого двустороннего заземления экранов [1], и можно показать, что такая транспозиция является выгодной и целесообразной по сравнению со схемой рис. 2а.

Еще одним примером неполной транспозиции может выступать схема рис. 4, которую пришлось рекомендовать для одной из кабельных линий 110 кВ длиной 3 км.

Выполнить «привычную» транспозицию экранов с делением трассы кабеля на три участка примерно равной длины не получилось, поскольку на отметке 2/3 из-за прокола под рекой не было возможности установить муфту. Несмотря на это, для линии удалось достичь нулевых токов и потерь в экранах, то есть точно таких же показателей, которыми обладает линия с идеальной транспозицией экранов.

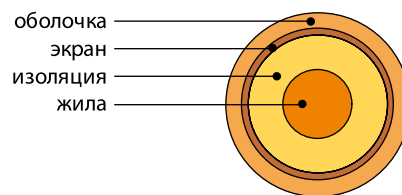
В схеме рис. 4, также как и для идеальной транспозиции, для каждой из трех возможных последовательностей чередования фаз (ABC, BCA, CAB) суммарные длины участков кабеля оказываются одинаковы и равны 1000 м:

- ABC имеется на первом (500 м) и пятом (500 м) участках;
- BCA имеется на втором (500 м) и третьем (500 м) участках;
- CAB имеется на четвертом (1000 м) участке.

Итак, при проектировании кабельных линий 6–500 кВ можно использовать любые варианты схем транспозиции экранов (идеальной и неидеальной, полной и неполной), но только при наличии обосновывающих расчетов. В общем случае требование иметь исключительно идеальную полную транспозицию является ошибочным.

Конструкция однофазного кабеля 6–500 кВ

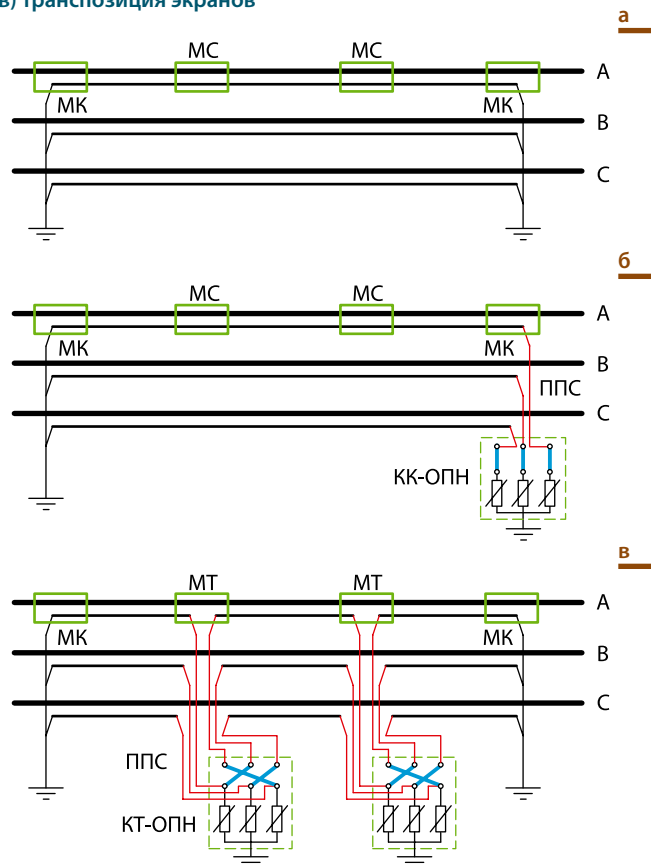
Рис. 1 •



Типовые схемы заземления экранов трехфазных кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями:

Рис. 2 •

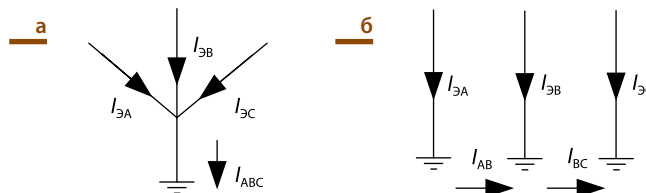
- а) заземление экранов с двух сторон;
- б) заземление экранов с одной стороны;
- в) транспозиция экранов



Возможные варианты соединения экранов с контуром заземления:

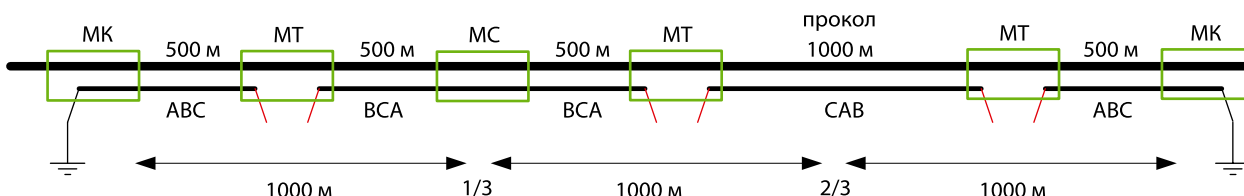
Рис. 3 •

- а) соединение экранов с контуром при помощи одного общего проводника;
- б) соединение каждого экрана с контуром отдельно

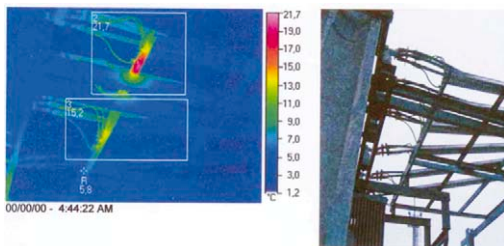


Пример неполной транспозиции экранов кабельной линии, при которой нет токов и потерь в экранах

Рис. 4 •



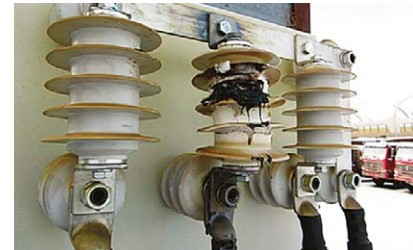
• **Фото 1.** Результаты тепловизионного обследования узла заземления экранов кабельной линии 10 кВ



• **Фото 2.** Последствия установки ОПН 3 кВ в концевой коробке зарубежного производства



• **Фото 3.** Последствия установки ОПН 3 кВ в концевой коробке отечественного производства



ВЫБОР ЧИСЛА ЦИКЛОВ ТРАНСПОЗИЦИИ

Особо следует выделить технические решения, где применена транспозиция с завышенным числом циклов N . Например, в Москве известна линия с кабелями зарубежного производства, у которой выполнено 5 циклов транспозиции экранов – 14 узлов транспозиции делят трассу кабеля на 15 участков. Расчеты напряжения на экране показали достаточность всего 1–2 циклов, но изготовитель кабеля, пользуясь своим лидирующим положением на рынке, настоял на применении сразу 5 циклов (соответственно увеличив число поставляемых на объект транспозиционных муфт и коробок транспозиции своего производства), не представив никаких технических доводов в пользу такого решения.

Аналогичным примером являются семинары по кабельным линиям, которые проводит одна очень известная европейская фирма, где проектировщиков убеждают в том, что пункты транспозиции экранов следует устраивать через каждые 500 м длины кабельной линии. Подобные высказывания доводят до абсурда прекрасную идею транспозиции экранов, потому что обслуживание кабельной линии с таким числом пунктов транспозиции оказывается крайне затруднено, ведь любые испытания требуют откачки воды из колодцев транспозиции, вскрытия коробок транспозиции (необходимость открутить от 15 до 30 болтов) и отсоединения установленных в коробках ОПН. Из-за этого только подготовка линии к испытаниям может занять несколько дней, в течение которых кабель будет отключен от сети, персонал занят тяжелой работой, а потребитель будет запитан по временной схеме со сниженной надежностью.

Если говорить о происхождении конкретной цифры «500 м», то, по всей видимости, оно следующее. В самом неблагоприятном случае, когда фазы кабеля проложены в ряд на большом расстоянии друг от друга, а ток КЗ сети составляет заоблачные 80–100 кА, напряжение на экране относительно земли в узле транспозиции кабельной линии длиной 1500 метров достигнет 5–7 кВ (согласно [1, 2]), которые считаются предельно допустимыми для оболочки кабеля.

Таким образом, ясны причины, по которым ряд зарубежных производителей «продавливает» завышенное число циклов транспозиции:

- не надо проводить никаких обосновывающих расчетов по выбору числа циклов транспозиции, потому что предлагаемое правило «500 м» гарантирует «успех»;
- снижается напряжение промышленной частоты на экране относительно земли и вероятность пробоя оболочки кабеля, т.е. уменьшаются риски возникновения ситуации, когда придется выполнять гарантийные обязательства;
- увеличивается объем поставок дорогостоящего оборудования (муфт, коробок).

Поскольку нередко поставщик кабеля на объект известен еще до проведения торгов, то именно это и позволяет ему безнаказанно и безапелляционно диктовать техническим специалистам среднего звена (проектировщикам) выгодные для себя решения, игнорируя требования представить обосновывающие расчеты.

ВЫБОР ОПН

Любой ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН) предназначен для защиты изоляции оборудования от импульсных перенапряжений и не предназначен для ограничения повышенных напряжений промышленной частоты.

Именно такие функции выполняет ОПН, устанавливаемый между экранами и землей в концевых кабельных коробках

(КК-ОПН) и коробках транспозиции (КТ-ОПН). Его назначение – защита оболочки кабеля от грозовых и коммутационных перенапряжений, которые передаются туда с главной изоляции кабеля.

Толщина оболочки однофазного кабеля 6–500 кВ практически не зависит от класса его номинального напряжения и составляет около 5–6 мм, что с точки зрения электрической прочности отвечает изоляции класса 6 кВ. Поэтому для её защиты от импульсных перенапряжений следует ориентироваться на применение типовых ОПН класса напряжения 6 кВ.

При прокладке кабельных линий оболочка почти всегда получает те или иные механические повреждения. Из-за этого схемы заземления экранов выбирают таким образом, чтобы при КЗ кратковременно наводимое на экран напряжение 50 Гц не превышало 5–7 кВ. Это напряжение безопасно и для оболочки кабеля, и для ОПН класса 6 кВ, который мог бы выдерживать его в течение всего срока службы, составляющего 30 лет.

В настоящее время характерными в выборе типа ОПН стали такие ошибки, как применение ОПН класса напряжения менее 6 кВ, например класса 3 кВ, и, кроме того, попытки возложить на ОПН задачу ограничения напряжения промышленной частоты, а не только ограничения импульсных перенапряжений.

Ошибки при выборе типа ОПН

Применять для защиты оболочки ОПН класса напряжения более 6 кВ нельзя, так как напряжение на его зажимах при прохождении импульсных токов окажется выше, чем импульсная прочность оболочки кабеля. Однако может показаться, что снижение рабочего напряжения, напротив, будет полезным, поскольку позволит лучше обезопасить оболочку от импульсных перенапряжений. Отчасти поэтому в кабельных коробках ряда зарубежных производителей встречаются ОПН класса напряжения 3 кВ, а некоторые отечественные проектные организации, перенимая этот «опыт», требуют ОПН 3 кВ и от отечественных производителей. В результате имеется значительное число повреждений коробок с ОПН 3 кВ (см. фото 2, 3).

Повреждения ОПН 3 кВ происходят по трем причинам:

- приемлемой считается схема заземления экранов, у которой на экране относительно земли при КЗ напряжение составляет 5–7 кВ, тогда как для ОПН 3 кВ такое напряжение опасно;
- чем ниже рабочее напряжение ОПН, тем глубже он ограничивает импульсные перенапряжения и, следовательно, тем большей энергией будут обладать проходящие в нем импульсные токи и тем выше риск повреждения нелинейных объектов ОПН из-за недостаточной энергоемкости;
- чем ниже рабочее напряжение типового ОПН, тем меньше диаметр нелинейных элементов, используемых при его сборке, и меньше их способность пропускать импульсные токи, а значит выше риск повреждения из-за низкой энергоемкости.

Первая причина дает повреждения только при КЗ в сети, а вторая и третья приводят к выходу из строя ОПН даже при простой коммутации включения кабеля под напряжение без каких-либо КЗ.

Ошибки в понимании назначения ОПН

Бытует мнение, что экранный ОПН устанавливается в том числе и для ограничения напряжения промышленной частоты на оболочке кабеля. При этом выстраивается, например, такая цепочка рассуждений: «Для кабельной линии при одностороннем заземлении экранов наводимое на экран напряжение промышленной частоты при внешнем коротком замыкании, согласно

расчетам по [1, 2], составило 15 кВ. Это больше допустимого для оболочки значения 5–7 кВ. Тогда, поставив на конце кабеля между экраном и землей ограничитель ОПН класса напряжения 6 кВ, удастся снизить перенапряжения до безопасного уровня».

Ошибочность рассуждений состоит в том, что ОПН не предназначен для ограничения напряжения промышленной частоты, т.е. важнейшим условием применения ОПН является обеспечение в месте его установки допустимого для ОПН напряжения промышленной частоты. Иными словами, если, скажем, в сеть класса 15 кВ поставить ОПН 6 кВ, то такой ОПН будет поврежден, а сеть класса 15 кВ так и не превратится в сеть 6 кВ.

Итак, важнейшим условием возможности защиты оболочки кабельной линии от импульсных перенапряжений за счет установки ОПН является грамотный выбор схемы заземления экранов, обеспечивающей при КЗ наведенное на экране напряжение промышленной частоты не более 5–7 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заземленных по концам экранах линий 6–500 кВ с однофазными кабелями существуют заметные паразитные потери мощности, ограничивающие пропускную способность кабеля и требующие оплаты. По этой причине простое двустороннее заземление экранов однофазных кабелей должно применяться лишь при наличии соответствующего обоснования, а предпочтение следует отдавать схемам заземления без паразитных потерь мощности в экранах. Среди таких схем наибольшее распространение получили одностороннее заземление экранов (для кабельных линий малой длины, не более нескольких сотен метров) и транспозиция экранов (для всех остальных линий).

1. Если принято решение выполнить заземление экранов в обоих концах линии, то на каждом из концов экраны трех фаз должны быть присоединены к контуру заземления в одном и том же месте, так как это исключает нагрев элементов контура уравнительными токами экранов.
2. Если принято решение выполнить одностороннее заземление экранов, то следует использовать схемы с одной односторонне заземленной секцией, так как разделение экранов кабельной линии на несколько односторонне заземленных секций усложняет эксплуатацию кабельной линии. В случае, когда напряжение на экране превышает допустимое для оболочки значение, вместо увеличения числа односторонне заземленных секций целесообразно рассмотреть прокладку вдоль кабельной линии специальной эквипотенциальной проводящей шины.
3. Если принято решение выполнить транспозицию экранов, то для подавляющего большинства кабельных линий достаточно одного-двух полных циклов транспозиции экранов. Проекты с тремя и более полными циклами или проекты, где пункты транспозиции выполнены на каждой соединительной муфте, с высокой долей вероятности являются ошибочными и должны быть проверены и при необходимости исправлены.
4. Транспозиция остается эффективной даже в том случае, если она неидеальная (разные длины участков и способы прокладки), неполная (число транспонированных участков некратно трем).
5. В концевых кабельных коробках и коробках транспозиции следует запретить применение ОПН класса напряжения 3 кВ. Должны устанавливаться ОПН 6 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 152 с.
2. СТО 56947007-29.060.20.103-2011. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.
3. Дмитриев М.В., Кияткина М.Р. Металлическая шина. Эффективность при параллельной прокладке с однофазными кабелями // Новости ЭлектроТехники. 2011. № 5(71). С. 70–73.
4. Дмитриев М.В., Кияткина М.Р. Транспозиция экранов кабелей 6–500 кВ. Практические аспекты использования // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 2(74). С. 80–84.

В следующем номере журнала автор рассмотрит ошибки, допускаемые при выборе концевых коробок, коробок транспозиции, муфт и вспомогательного кабеля. ■