

В России и в мире известен ряд высоковольтных кабельных линий, на которых число повреждений существенно больше, чем в среднем по кабельной сети. Поиск вероятных причин, безусловно, является актуальной задачей для электроэнергетики.

Некоторыми результатами исследований аварий на линиях 110–500 кВ делится в своей статье Михаил Викторович Дмитриев. По его мнению, перенапряжения на оболочке кабелей, которые иногда упоминаются в качестве важного фактора, влияющего на повреждения, на самом деле особой опасности не представляют.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ С ОДНОФАЗНЫМИ КАБЕЛЯМИ

Защита от перенапряжений

подавляющее большинство повреждений кабельных линий приходится не на сам кабель, а на концевые и соединительные муфты. Вскрытие муфт, выполненное в независимых лабораториях (например, во ВНИИКП), как правило, приводит экспертов к выводам о вине производителя муфты или же организации, проводившей монтаж. Но есть совсем небольшой процент случаев, когда установить главного виновника не удается, и тогда в условиях неопределенности рождаются разнообразные гипотезы, в основном связанные с перенапряжениями и их последствиями.

Важно понимать, что почти все аварии обусловлены дефектами монтажа, реже – дефектами конструкции муфты, а к различным «гипотезам» приходится прибегать лишь в исключительных случаях, к которым на территории бывшего СССР можно отнести только два:

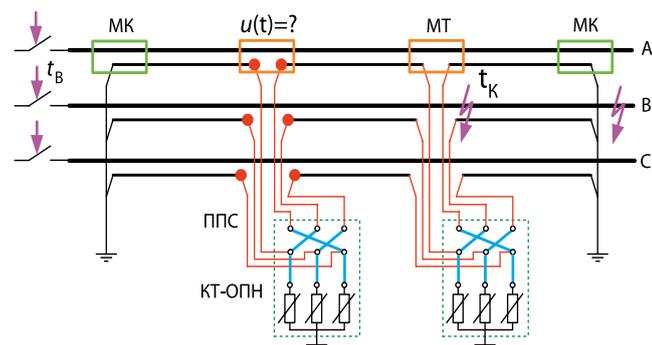
- повреждения на городских кабельных линиях 110 кВ в Сочи;
- аварии на кабельно-воздушных линиях 220 кВ вокруг Алма-Аты (Казахстан).

Наиболее вероятные причины повреждений сочинских и алма-атинских линий названы в [1]. Они определены в ходе проведения научно-исследовательской работы и согласованы с рядом ведущих специалистов отрасли. К авариям приводил комплекс разноплановых факторов, среди которых были и перенапряжения *на жиле*, сыгравшие свою роль в условиях:

- сниженной электрической прочности деформированных под давлением грунта стресс-конусов муфт;
- аномально большого числа коммутаций (более 200 раз в год);

• Рис. 1. Кабельная линия с транспозицией экранов

МК – концевые муфты;
МТ – транспозиционные муфты;
КТ-ОПН – коробки с ограничителями перенапряжений, обладающими рабочим напряжением 7,2 кВ;
ППС – соединительные провода с полиэтиленовой изоляцией.
Красными точками указаны места контроля напряжения на экране относительно земли.



Михаил Дмитриев,
к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

– отсутствия защитных силовых ОПН в местах перехода кабеля в воздушную линию.

Ряд инженеров предполагает, что к авариям муфт причастны перенапряжения *на экранах* кабелей, хотя и не поясняет, почему такие перенапряжения опасны лишь для узкого круга линий, а подавляющее большинство линий 110–500 кВ работает без каких-либо проблем. Постараемся разобраться, действительно ли перенапряжения на экранах могут быть опасны.

В [2] дан анализ напряжений на оболочке кабеля в наиболее часто возникающих случаях – при коммутации включения кабельной линии под сетевое напряжение или при разряде молнии в воздушную линию, сопряженную с кабелем. В частности, было показано, что нет оснований при монтаже узлов транспозиции обязательно требовать, чтобы длина проводов ППС от муфты до коробки составляла менее 10 м. Этот вывод, сделанный в результате расчетов в компьютерной программе ЕМТР, согласуется с накопленным опытом эксплуатации на линиях 110–500 кВ, где повреждения муфт происходят при любой длине соединительных проводов, будь то всего 5 м или даже 15 метров.

В статье коллектива петербургских авторов [3] делается предположение, что опасные перенапряжения на оболочке могут возникать, когда в кабеле происходит короткое замыкание (КЗ) в главной изоляции.

Таким образом, список требующих изучения ситуаций на первый взгляд получается следующим:

- плановое включение кабеля или воздействие молниевых разрядов ([2]);
- КЗ в кабеле или за его пределами ([3]).

Покажем, что при изучении перенапряжений на оболочке кабеля основное внимание следует уделять только включению линии, а КЗ рассматривать не обязательно, поскольку:

- перенапряжения при КЗ возникают гораздо реже, чем при включении;
- величина перенапряжений при КЗ не больше, чем при включении.

ТРАНСПОЗИЦИОННЫЕ МУФТЫ 110–500 кВ

Главным объектом исследований являются только транспозиционные муфты 110–500 кВ, и могут возникнуть вопросы:

- почему не рассматриваются классы напряжений 6–35 кВ?
- почему не дается анализ для концевых муфт или для обычных соединительных?

Рабочая напряженность поля в изоляции муфт 110–500 кВ в разы больше, чем в муфтах 6–35 кВ, и поэтому в самых тяжелых условиях оказываются как раз линии 110–500 кВ. Также надо отметить, что именно линии 110–500 кВ, очевидно, важнее для энергосистемы и всегда находятся под особым присмотром.

Опыт эксплуатации свидетельствует, что число аварий на концевых муфтах не так велико. Отчасти это связано с возможностью проводить их плановую диагностику путем тепловизионного обследования или измерения частичных разрядов, отчасти потому, что рядом с этими муфтами всегда установлены защитные ограничители перенапряжений (ОПН), а медные экраны, скорее всего, надежно заземлены. Следова-

Последствия грубых нарушений инструкции по монтажу коробки транспозиции**Фото 1** ●

тельно, основное внимание надо уделять не концевым муфтам, а расположенным в земле муфтам транспозиции (МТ, рис. 1) или соединительным муфтам.

Переходные процессы отражения/преломления волн возникают по концам кабельной линии или в местах неоднородности трассы, к которым относятся как раз транспозиционные муфты, а не соединительные. Также интересно отметить, например, что на сочинских линиях и на самых аварийных участках алма-атинских линий соединительных муфт вообще не было, и каждая муфта являлась транспозиционной.

Таким образом, становится понятно, почему всё внимание в работах [1–3] уделено исключительно узлам транспозиции и только на кабельных линиях 110–500 кВ.

ПЕТЕРБУРГСКАЯ КЛ 330 кВ

Сочинские и алма-атинские линии имели за несколько лет эксплуатации суммарно более 20 повреждений транспозиционных муфт, и никаких других аварий здесь не было.

На этом фоне не совсем непонятно, почему авторы [3] в качестве объекта для исследований и обобщающих выводов выбрали Санкт-Петербургскую линию 330 кВ «Северная-Василеостровская», где было всего лишь три повреждения, причем на муфты пришлось только два из них, а третье произошло в самой кабеле. Поясним, по каким причинам, о которых не упоминается в [3], на данной линии в принципе не могло быть никаких перенапряжений на оболочках.

Повреждение на кабеле изучалось специалистами всемирно известного центра КЕМА, расположенного в Голландии. В их заключении говорится, что КЗ произошло вследствие вибрации грунта, обусловленной работой тяжелой техники при строительстве автодороги, проходящей неподалеку от КЛ.

Два повреждения транспозиционных муфт с высокой вероятностью связаны с низким качеством электромонтажных работ. Достаточно упомянуть, например, что одна из подрядных организаций проходит по уголовному делу – она получила деньги за строительство линии 35 кВ по дну Финского залива, которую до сих пор так и не удалось найти. Также работы можно оценить и с помощью многочисленных фотографий непосредственно с линии 330 кВ. В частности, одна из них – это фото 2 из [1], иллюстрирующее отсутствие герметизации колодцев транспозиции.

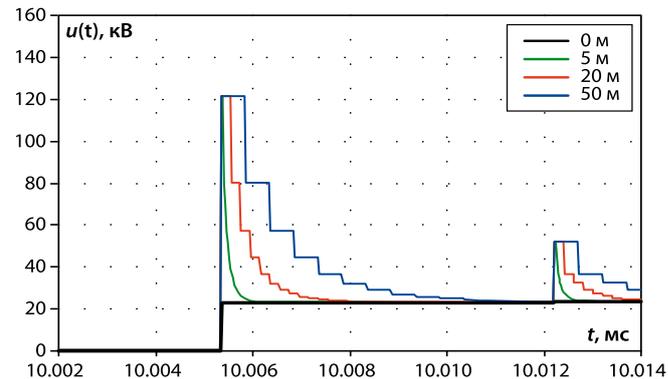
Ситуация была осложнена тем, что данные колодцы чрезвычайно малого размера и для установки в них коробок транспозиции монтажники вначале полностью разбирали коробки, что категорически запрещено заводской инструкцией, а уже потом собирали их на месте, при этом растеряв уплотнительные кольца. В итоге многие коробки оказались заполнены водой (фото 1).

Из фотографий и ряда других материалов следует, что кабельная линия 330 кВ «Северная-Василеостровская» первые годы, в которые и случились анализируемые в статье [3] аварии, работала вовсе не со штатной транспозицией экранов, а с простым двусторонним заземлением, которое было обусловлено залитыми водой коробками. Также интересно, что все эти годы коробки в узлах транспозиции № 13 и № 15 были ►

• **Рис. 2.** Напряжение на линии при ее включении и последующем коротком замыкании



• **Рис. 3.** Импульс напряжения на оболочке в муфте при коротком замыкании в кабеле 330 кВ. Варьируется длина проводов ППС



► совсем не такими, как показано на схеме в статье [3], и только поздней осенью 2016 ошибка монтажников была исправлена и схема была приведена к виду проектной.

Лично зная и глубоко уважая каждого автора статьи [3], вынужден констатировать, что проведенные ими расчеты переходных процессов и рассуждения о роли высокочастотных перенапряжений, к сожалению, имеют мало общего с реальной КЛ 330 кВ «Северная–Василюстровская» и не могут объяснить уже накопленный на ней опыт эксплуатации.

К концу 2016 года благодаря огромным усилиям ведущих специалистов МЭС Северо-Запада (Д.А. Шатилов, Р.Е. Васильев, В.А. Высоцкий) удалось исправить ошибки монтажников: привести в порядок затопленные водой коробки транспозиции, заменить коробки в узлах № 13 и № 15 на «правильные». Также сейчас ведутся переговоры о замене бетонных колодцев на современные герметичные полимерные колодцы транспозиции.

ВКЛЮЧЕНИЕ ЛИНИИ ИЛИ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ?

Имеющаяся обширная база повреждений кабельных муфт в Сочи, Алма-Ате, Москве и ряде других городов свидетельствует о том, что большинство повреждений муфт зафиксировано в момент включения линии под напряжение (или сразу после него), причем предшествовавшее включению отключенное состояние линии было связано с регламентными работами (испытаниями, измерениями), а вовсе не с КЗ. Таким образом, первостепенное внимание следует уделять именно процессам обычного ввода линии в работу [2], а не коротким замыканиям [3].

Разумеется, вариант, приведенный в [3], нельзя полностью исключить. Например, на линии в самом кабеле возникло КЗ, и оболочка некоторых муфт по трассе подверглась перенапряжениям, получила повреждения, которые сказались не сразу, а уже после ремонта линии, непосредственно в момент включения под напряжение.

На рис. 1 схематично показано включение под сетевое напряжение линии 110–500 кВ, имеющей транспозицию экранов (оно происходит в некий момент времени t_b). Также здесь показаны два возможных места КЗ, возникших в момент t_k : в самой кабельной линии или за ее пределами.

При включении кабельной линии (пусть в максимум ЭДС сети) напряжение на ее жиле скачком возрастет от нулевого значения до амплитуды фазного. Если же на линии или за ее пределами произойдет КЗ (обычно оно приходится на максимум ЭДС), то напряжение на жиле скачком упадет практически до нуля. Как видно из рис. 2, осциллограммы фазного напряжения при включении и при КЗ очень похожи – в обоих случаях имеет место быстрое изменение напряжения на жиле, т.е. своеобразный скачок, причем одной и той же величины, но разного знака.

Переходные процессы в экранах однофазных кабелей и импульсы напряжения на оболочке являются следствием наводок с жилы кабеля. При этом неважно, какой знак имеет волна в жиле – положительный (при включении) или отрицательный (при КЗ). Следовательно, перенапряжения на оболочке примерно одинаковы и при включении линии, и при КЗ.

Принципиальным отличием двух этих случаев будет лишь то, что, скорее всего, ОПН, установленные в коробках транс-

позиции, при КЗ на линии будут повреждены, не выдержав проходящего в них тока, тогда как при простом включении с ОПН этого не случится. Однако перед нами стоит задача исследования перенапряжений на кабельных муфтах, а не токовых воздействий на экраны ОПН.

В качестве примера проведем расчеты для КЛ 330 кВ длиной 3000 метров (три участка по 1000 м), имеющей один полный цикл транспозиции экранов. Такая линия показана на рис. 1. Осциллограммы коммутационных перенапряжений, как продемонстрировано в [2], имеют сложную форму колебаний разных частот, которые накладываются друг на друга и вызывают тем самым то повышение напряжения, то его снижение.

В компьютерных расчетах коммутационных (и грозовых) перенапряжений есть негласное правило, по которому доверять можно лишь первым максимумам, а последующие анализировать не имеет смысла, поскольку на реальном объекте они наверняка будут снижены за счет потерь в линии и в земле. Так и будем поступать, особенно с учетом того, что компьютерная программа ЕМТР 5-й версии, имеющаяся в Санкт-Петербургском политехническом университете, не позволяет учитывать частотные зависимости параметров кабельных линий (хотя для воздушных линий это делается неплохо).

Заявленный в [3] учет частотных параметров с помощью имеющейся в ЕМТР модели кабельной линии типа Bergeron, к сожалению, видимо, является опечаткой. Дело в том, что Bergeron – это модель с независимыми от частоты параметрами, а для учета частотной зависимости в ЕМТР предусмотрена модель J.Marti, однако, как уже говорилось, с кабельными линиями в ЕМТР-5 она исправно не работает.

Итак, в расчетах будем ориентироваться на первый максимум напряжения на оболочке кабеля, игнорируя последующие. В каждой муфте есть 6 точек, на которые целесообразно обратить внимание, они помечены на рис. 1. При различных условиях (момент включения линии, фаза и место КЗ и др.) напряжение будет достигать максимума то в одной муфте МТ, то в другой, то в одной из шести точек, то в другой. Для удобства рассмотрим лишь одну осциллограмму.

Наибольшее рабочее напряжение сети 330 кВ составляет 363 кВ, и поэтому амплитуда фазного напряжения может достигать уровня почти в 300 кВ. В статье [2] уже были даны осциллограммы напряжения на оболочке линии длиной 3000 м при ее включении под напряжение 300 кВ (рис. 4а в [2]). Здесь же приведем только осциллограмму КЗ в кабеле (рис. 3).

Сравнение рис. 4а из [2] и рис. 3 свидетельствует о том, что форма и величина первого импульса на обоих рисунках совпадают. Это демонстрирует уже отмеченное ранее отсутствие особой необходимости в специальном изучении переходных процессов при КЗ. В исследованиях внимание лучше сосредоточить не на КЗ, а на более частом явлении – включении линии под напряжение сети. Особое внимание к включению надо проявлять еще и по той причине, что большая часть повреждений муфт происходила именно в момент включения линии, отключенной перед этим не из-за КЗ, а для плановых работ.

Срез фазного напряжения на жиле кабеля и возбуждение колебаний в экранах может происходить не только при КЗ

непосредственно на линии, но и за ее пределами. Причем внешние КЗ, очевидно, происходят чаще, чем в самом кабеле, особенно если речь идет не о кабельной сети, а, например, о сети с кабельно-воздушными линиями.

На рис. 4 приведена осциллограмма, полученная в схеме рис. 1 при однофазном КЗ за кабелем (длина проводов ППС была принята равной 20 м). Внешнее КЗ может произойти, например, на воздушной линии или на шинах распределительного устройства, и во всех этих случаях следует учитывать индуктивность металлоконструкций на пути тока в землю, которая не может быть менее 5–10 мкГн. Учет конечной индуктивности в цепи тока снижает крутизну среза импульса фазного напряжения (рис. 2), а значит, напряжение на оболочке уже не успевает достичь своего максимального уровня и становится безопаснее (рис. 4).

Эффект, аналогичный полученному на рис. 4, уже был продемонстрирован в [2], правда на примере влияния длительности фронта грозových перенапряжений (рис. 4а и рис. 4б в [2]).

Итак, при изучении импульсных перенапряжений на оболочке линии вместо внутренних КЗ в кабеле лучше рассматривать его включение под напряжение сети. Что же касается внешних КЗ, то они и вовсе должны быть исключены из перечня расчетных случаев, как неопасные.

ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧКИ

В [2] подробно рассказывалось об испытаниях оболочки на пробой, которые выполнялись в голландской лаборатории КЕМА, а также в Политехническом университете Санкт-Петербурга. Импульсная прочность оболочки в муфтах составляла не менее 100 кВ на полном гроздовом импульсе формы 1,2/50 мкс, а для коротких импульсов (рис. 3, 4) – еще больше.

Видно, что коммутационные перенапряжения на оболочках кабелей 110–330 кВ не опасны для исправных транспозиционных муфт и никаким образом не способны пояснить происходящих с ними аварий. Это также подтверждается положительным опытом эксплуатации десятков линий 110–330 кВ с транспозицией экранов как в России, так и за ее пределами.

Теоретически исключением могут быть муфты на класс напряжения 500 кВ, где прочность оболочки такая же, как на 110–330 кВ, а перенапряжения – выше. Однако на кабельных линиях 500 кВ повредились пока лишь две транспозиционные муфты, и систематизировать данные затруднительно.

Сделанные в [3] оценки прочности оболочки на уровне 30–50 кВ, полученные путем умножения постоянного испытательного напряжения 10 кВ на коэффициент импульса 3–5 о.е., принять не представляется возможным. Во-первых, напряжение величиной 10 кВ прикладывается к оболочке линии на 1 мин вовсе не с целью ее испытаний на пробой, а только для проверки отсутствия критичных повреждений, из-за которых вода может проникнуть в главную изоляцию кабеля, т.е. реальная прочность оболочки, конечно же, выше 10 кВ. Во-вторых, все известные случаи, когда оболочка линии не выдержала эти 10 кВ, относятся не к муфтам, а к самому кабелю, который был ободран в ходе небрежных монтажных работ.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭКРАНАХ НА ГЛАВНУЮ ИЗОЛЯЦИЮ

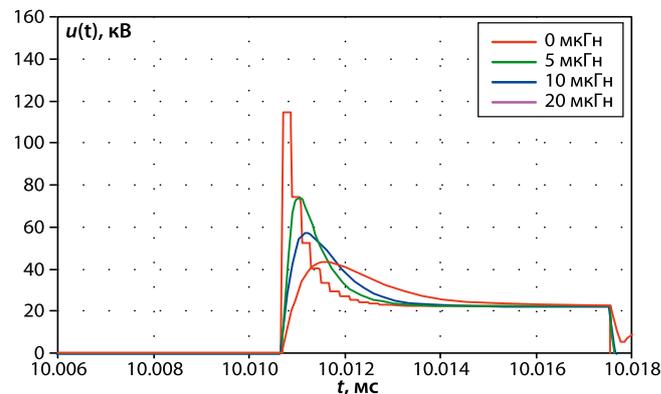
Положим, что прочность оболочки в муфте действительно велика и составляет, например, 100 кВ. Это значит, что перенапряжения более 100 кВ на этой оболочке уже невозможны, поскольку вызовут пробой с экрана кабеля на землю. Импульсы подобной величины, возникающие на экранах, не опасны для главной изоляции муфты, так как ее прочность составляет не менее 500 кВ на класс 110 кВ, не менее 750 кВ на класс 220 кВ и так далее.

Если бы прочность оболочки в муфте была всего 50 кВ, как это предполагают в [3], то тогда на оболочке отсутствовали бы перенапряжения величиной более 50 кВ. О какой опасности для главной изоляции может идти речь?

Теоретически влияние пробоя оболочки муфты на главную изоляцию может быть не прямым, а косвенным – скажем, за счет воды, которая с течением времени попадает из грунта в муфту через место повреждения оболочки. Однако подобный процесс достаточно длителен, да и не всегда в грунте имеется вода. Также важно отметить, что повреждение оболочки муфты не упоминалось в актах их осмотра и вскрытия.

Импульс напряжения на оболочке в муфте при коротком замыкании за кабелем 330 кВ. ППС длиной 20 м. Варьируется индуктивность на пути тока короткого замыкания в землю

Рис. 4 •



Более или менее реальная опасность от переходных процессов в экранах связана не с рассмотренными в [2, 3] перенапряжениями на экране относительно земли, а с перенапряжениями между двумя экранами вдоль муфты (вдоль ее стресс-конуса). Можно показать, что если на рис. 3–4 перенапряжения на изоляции «экран–земля» достигали 120 кВ, то продольные воздействия «экран–экран» были примерно в два раза больше, то есть до 240 кВ. Такое напряжение теоретически способно дать пробой вдоль стресс-конуса и нарушения в работе схемы транспозиции экранов, ведь место пробоя будет шунтировать собой коробку транспозиции. При этом пробой самого стресс-конуса (с жилы на экран) и КЗ маловероятны, то есть не получается объяснить известные аварии гипотезой о перенапряжениях на экранах относительно земли или между экранами.

Представленные рассуждения еще раз показывают, что переходные процессы в экранах кабеля вряд ли могут вызвать проблемы с главной изоляцией кабеля и его транспозиционных муфт, о чем уже говорилось в [1, 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В мире есть несколько кабельных линий 110–500 кВ, где зафиксировано аномально большое число повреждений транспозиционных муфт. Перенапряжения играют определенную роль в развитии подобных аварий, но это перенапряжения на жилах, а вовсе не на экранах.
2. Перенапряжения на экранах не обладают достаточной величиной, чтобы опасно повлиять на оболочку транспозиционных муфт и тем более на их главную изоляцию. Они не могут вызывать КЗ.
3. Попытки объяснить перенапряжениями на экранах две аварии муфт на КЛ 330 кВ «Северная–Василеостровская» являются надуманными хотя бы потому, что все повреждения произошли в условиях залитых водой коробок транспозиции, т.е. в условиях, когда экраны имели многократное повторное заземление и в принципе не могли подвергаться никаким перенапряжениям.
4. При проведении расчетов перенапряжений на оболочках муфт и вдоль разрыва экранов, если такая задача все же поставлена, основной упор следует делать на простую коммутацию – включение кабельной линии под напряжение сети, а анализ КЗ в кабеле и тем более за его пределами можно не выполнять.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Проектирование и строительство кабельных линий 6–500 кВ. Актуальные проблемы // Новости ЭлектроТехники. 2016. № 4(100).
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных кабелей 6–500 кВ: расстояние от муфт до коробок с ОПН // Электроэнергия: передача и распределение. 2016. № 1(34).
3. Бурлаков Е., Евдокунин Г.А., Карпов А.С., Шатилов Д. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Переходные процессы и перенапряжения // Новости ЭлектроТехники. 2016. № 5(101).