

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ 110-500 кВ.

ЧАСТЬ 1. Перенапряжения на оболочке и длина соединительных проводов

Дмитриев М.В. (Санкт-Петербургский политехнический университет, к.т.н., доцент)

тел. +7-921-747-90-29, почта mvdm@ya.ru, сайт www.mvdm.ru

Введение

В нашей стране уже более 20 лет массово применяются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Если в сетях среднего напряжения 6-35 кВ используются кабели как однофазной, так и трехфазной конструкции, то в сетях 110-500 кВ – исключительно однофазной.

Однофазные кабели 6-500 кВ имеют ряд особенностей, одна из которых – наличие в медных экранах наведенных токов промышленной частоты и вызванных ими потерь активной мощности, для борьбы с которыми повсеместно внедряют одностороннее заземление экранов (рис.1,а) или транспозицию экранов (рис.1,б).

Вопросы проектирования и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, в частности однофазных, подробно рассмотрены в серии стандартов [1-3], которые еще несколько лет назад были подготовлены и утверждены ПАО «ФСК ЕЭС» (их можно бесплатно скачать с сайта компании). Например, выбору схем соединения и заземления экранов посвящен документ [3] – появление этого и других стандартов стало очень важным для страны шагом.

Накопленный к настоящему времени опыт работы с кабелями показал, что имеется несколько вопросов, которые не нашли отражение в актуальных редакциях стандартов, но которые было бы полезно туда добавить, когда представится такая возможность.

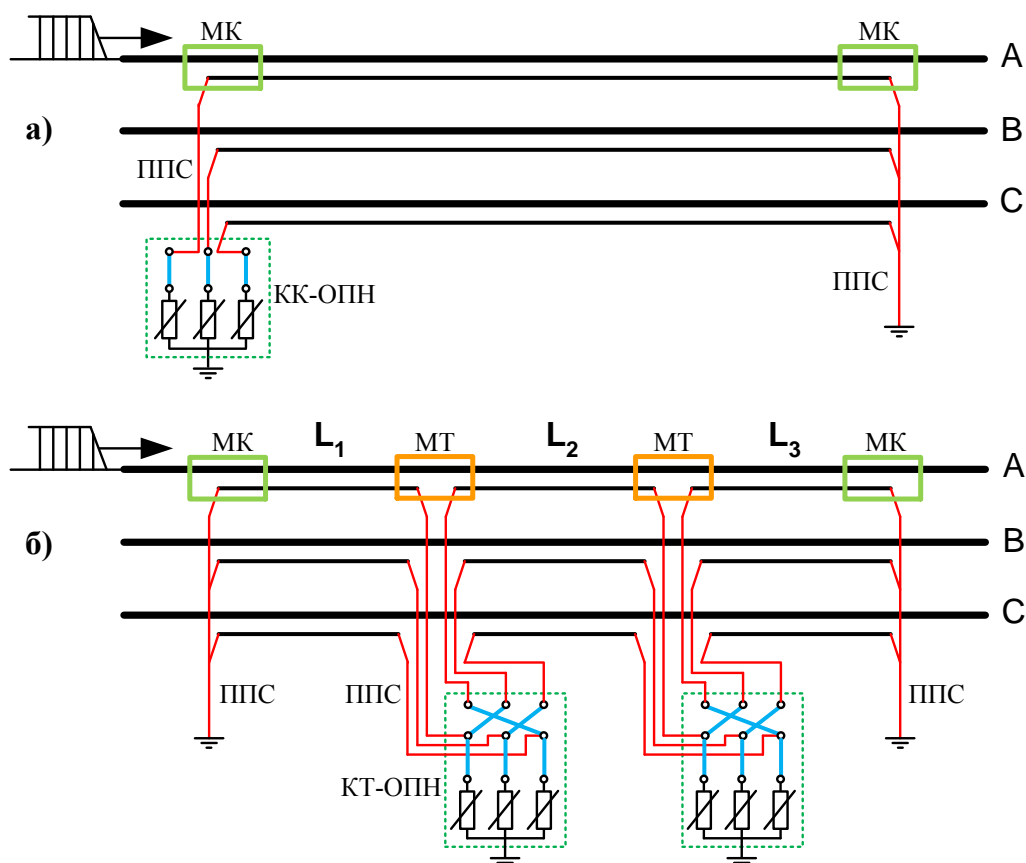


Рис.1. Основные схемы борьбы с токами и потерями в экранах однофазных кабелей.

В частности, нигде в нормах по кабельным линиям не указано на требования к сопротивлению заземления узлов транспозиции и к сопротивлению заземления опор воздушных линий в местах перехода в кабельные. Обосновать такие требования и добавить их в стандарты – очень важная задача.

Еще один из достаточно острых вопросов состоит в том, а существуют ли ограничения на длину соединительных проводов с полиэтиленовой изоляцией (ППС), которые связывают концевые муфты (МК) кабеля или транспозиционные муфты (МТ) с ограничителями перенапряжений (ОПН, рис.1), установленными в концевых коробках (КК) или в коробках транспозиции (КТ).

Отсутствие в отечественной документации четких указаний по поводу длин привело к тому, что производители кабельных муфт (концевых, транспозиционных) стали отказываться в гарантийных обязательствах и списывать случаи повреждения своей продукции на нарушение одного или двух следующих сомнительных правил:

1. длина соединительных проводов должна быть менее 10 (иногда 15 м);
2. длина соединительных проводов не должна различаться по фазам.

Например, в конце 2015 года один отечественный завод отказал в гарантийной замене пробившейся транспозиционной муфты 110 кВ на том лишь основании, что длина соединительного провода от этой муфты до коробки транспозиции КТ с установленным в ней ОПН составляла 16 м. Опасность длины 16 м на заводе была проверена специальным расчетом, получить который так и не удалось по причине «болезни технического персонала».

Подобные истории отнюдь не редкость. В отсутствие информации в нормах и не имея внятных разъяснений со стороны заводов, попытаемся разобраться в том, а существуют ли на самом деле ограничения на длину соединительных проводов и разброс длины по фазам кабеля.

Причины появления напряжений на экране кабеля

Ток промышленной частоты, проходящий в жилах кабеля, своим магнитным полем наводит в экранах напряжение промышленной частоты, ток и связанные с ним потери активной мощности. Наведенные напряжения, токи и потери различны в зависимости от схемы соединения и заземления экранов кабеля и поэтому влияют на ее окончательный выбор (методика [3-5]).

Схема соединения и заземления экранов кабеля должна быть такой, чтобы напряжение промышленной частоты на экране относительно земли не превышало:

- в нормальном режиме работы 100 В (п.5.2.3.1 из [1]);
- при коротком замыкании в сети 5 кВ (п.4.2.1.7 и п.4.2.3.4 из [3]).

Если ограничения по нормальному режиму связано с вопросами безопасности людей и животных, то ограничение при коротком замыкании обусловлено желанием минимизировать риск пробоя оболочки кабеля с экрана на землю.

На самом деле не только рабочие токи и токи короткого замыкания вызывают наводки с жил на экраны кабеля. Импульсные процессы, характерные при разрядах молнии или коммутациях, также передаются с жил в экраны. Поскольку грозовые и коммутационные импульсные напряжения способны привести к пробоя оболочке кабеля с экрана на землю, то в местах разземления экранов (рис.1,а) или в узлах транспозиции (рис.1,б) в экраны кабеля устанавливаются защитные ОПН.

Таким образом, напряжение промышленной частоты на экранах ограничивают путем рационального выбора схемы их соединения и заземления, а вот импульсные (грозовые и коммутационные) напряжения ограничивают за счет размещения ОПН. Итак, цель наличия ОПН в концевых или транспозиционных коробках – это защита от импульсных напряжений и ничего более.

Характеристики ОПН и прочность оболочки кабеля

Традиционно в энергетике при защите сетей от импульсных перенапряжений приходится решать вопрос о том, каково максимально допустимое расстояние, на котором еще можно размещать ОПН от оборудования. Например, в главе 4.2 ПУЭ для различных схем распределительных устройств 35-750 кВ такие расстояния даны в табличной форме в зависимости от основных влияющих факторов.

Дело в том, что при возникновении повышенных напряжений ОПН начинает пропускать ток, и этот ток создает падение напряжения в проводах, которыми ОПН подключен к защищаемому оборудованию. В итоге напряжение на оборудовании оказывается выше напряжения на зажимах ОПН на величину падения напряжения в соединительных проводах. В случае, когда длина проводов велика, напряжение на оборудовании оказывается недопустимым, представляя угрозу для изоляции. Этим и объясняется желание снизить длину соединительных проводов.

Для того, чтобы ответить на вопрос, на каком расстоянии можно размещать экранные ОПН от защищаемых ими концевых или транспозиционных муфт кабеля, как минимум необходимо знать характеристики ОПН и прочность оболочки кабеля (ее прочность в муфте), ведь и в том же ПУЭ расстояния зависят от типа защитного аппарата и от вида защищаемого оборудования.

В качестве экранных ОПН в нашей стране чаще всего применяют ОПН класса 6 кВ с рабочим напряжением 7.2 кВ. Практически у всех производителей ОПН при импульсном токе формы 8/20 мкс величиной 10 кА такие ОПН имеют близкие друг другу остающиеся напряжения (напряжения на выводах) – около 23 кВ.

Согласно п.4.5.10 [2] оболочка любого однофазного кабеля класса до 500 кВ периодически испытывается постоянным напряжением 10 кВ в течение 1 мин. К сожалению, в нормах не приходилось видеть цифр, которые помогли бы оценить прочность оболочки при воздействии импульсов или хотя бы при воздействии напряжения промышленной частоты. Вместе с тем, без указанных данных будет сложно вести рассуждения о допустимых расстояниях от ОПН до муфты. Поэтому обратимся к опыту испытательных центров и лабораторий. Возьмем, например, Санкт-Петербургский политехнический университет и голландский центр КЕМА.

СПбПУ. В политехническом университете под руководством Монастырского А.Е. проводились испытания оболочки кабеля 330 кВ напряжением промышленной частоты. Оболочка часами выдерживала напряжение 55 кВ и так и не была пробита. Длительно поднять напряжение выше 55 кВ помешали частичные разряды, которые были связаны исключительно с особенностями концевой разделки образцов. Что касается прочности «на пробой», то экспертно она была оценена цифрой свыше 100 кВ – при таком напряжении промышленной частоты пробой формировался бы за время в несколько минут. Импульсных испытаний оболочки не проводилось.

КЕМА. Во всемирно известной голландской лаборатории КЕМА проводились всесторонние испытания кабельной линии 220 кВ с установленными концевыми и транспозиционными муфтами. Пробой оболочки кабеля произошел при напряжении промышленной частоты 50 кВ через 15 секунд после начала испытаний, а пробоя при напряжениях 10, 20, 30, 40 кВ так и не было. Кроме того были выполнены испытания стандартным грозовым импульсом формы 1.2/50 мкс – при воздействии импульсов величиной 170 кВ пробоя оболочки не зафиксировано, а дальнейшему росту напряжения с целью поиска напряжения пробоя помешали разряды, которые были связаны исключительно с особенностями концевой разделки образцов.

Поскольку толщина оболочки у кабелей разных классов напряжения и разных производителей всегда составляет одну и ту же величину около 5 мм, то собранные результаты испытаний, полученные на нескольких конкретных образцах кабелей, допустимо распространить и на все остальные. Так, с известной долей осторожности можно утверждать, что без каких-либо последствий оболочка любых однофазных кабелей 6-500 кВ, даже несколько поврежденная при монтаже, способна держать:

- напряжение промышленной частоты свыше 30 кВ «без ограничения по времени»;
- напряжение стандартного грозового импульса формы 1.2/50 кВ свыше 100 кВ.

Глядя на данные цифры, специалисты, которые проводят испытания оболочек кабелей на действующих кабельных линиях, могут засомневаться, ведь иной раз им не удается подать на оболочку кабеля даже 10 кВ постоянного напряжения, так как же тогда поднять 30 кВ (это переменное напряжение, но суть не меняется)? Здесь можно сказать, что за последние годы большая часть известных мне случаев, когда на оболочке кабеля не удалось поднять постоянное напряжение 10 кВ, была связана не с кабелем или муфтами, а с неправильным монтажом и последующей небрежной эксплуатацией концевых коробок и коробок транспозиции.

Напряжение промышленной частоты 30 кВ, которое здесь приведено, не имеет отношения к защите от импульсных перенапряжений, а дано лишь для того, чтобы, пользуясь случаем, обратить внимание всех заинтересованных лиц: в случае такой необходимости вполне допустимо, чтобы при коротких замыканиях напряжение на экране относительно земли было больше указанного в стандарте излишне жесткого значения 5 кВ [3]. С точки зрения прочности оболочки на экране можно было бы допускать не до 5 кВ, а вплоть до 30 кВ и даже более. Однако при таком высоком напряжении выйдут из строя установленные в коробках экранные ОПН класса 6 кВ с рабочим 7.2 кВ.

Современные ОПН могут выдерживать напряжение промышленной частоты с кратностью 1.25 о.е. в течение более 10 с, что с запасом превосходит время любого короткого замыкания. Следовательно, на экране любого кабеля на время короткого замыкания теоретически можно было бы разрешить напряжение промышленной частоты до $7.2 \cdot 1.25 = 9$ кВ. При этом не возникает риска ни для экранных ОПН, ни для оболочки кабеля (она вообще держит более 30 кВ без ограничения по времени). Итак, при выборе схем соединения и заземления экранов по необходимости можно повысить предельное напряжение с 5 кВ (как в [3]) до 7 кВ и даже до 9 кВ.

Вернемся теперь к импульсной прочности оболочки – предполагается, что она составляет для всех кабелей 6-500 кВ не менее 100 кВ при воздействии стандартного грозового импульса с фронтом 1.2 мкс и длительностью до полуспада 50 мкс. Если

остающееся напряжение применяемых в экранах ОПН составляет 23 кВ, а оболочка способна выдержать 100 кВ – то тогда падение напряжения в проводе между ОПН и муфтой не должно быть более $100 - 23 = 77$ кВ, и, зная эту величину, можно было бы постараться оценить предельную длину соединительного провода.

Техническая политика CIGRE

Примерно похожие рассуждения ведут в соответствующем рабочем комитете международного совета по делам электроэнергетики CIGRE – зная характеристики ОПН и оболочки, по очень простой формуле они пытаются определить предельную длину соединительного провода.

Первое, что хочется сказать – основные рекомендации CIGRE касаются лишь узлов транспозиции, а про одностороннее заземление экранов информации почти нет. Второе, – рекомендации CIGRE ориентированы на использование в качестве проводов, соединяющих муфту с коробкой транспозиции и ОПН, не шести проводов типа ППС (как показано на рис.1,б), а трех коаксиальных проводов. Иными словами, от каждой транспозиционной муфты выходят не два провода ППС, а лишь один коаксиальный, внутренний проводник которого присоединен к экрану одного из двух заходящих в муфту участков силового кабеля, а внешний проводник – к экрану другого (рис.2).

В России коаксиальные провода применяются главным образом на объектах, где использованы муфты французской фирмы NEXANS, тогда как большинство других заводов ориентированы на провода типа ППС, которые имеют небольшой внешний радиус, проще гнутся и разделяются. Поскольку штаб-квартира CIGRE также расположена во Франции, а основным языком – французский, и только потом английский, то нет ничего удивительного, что CIGRE ориентируется на технические решения NEXANS. Наша же задача – обратить внимание всех заинтересованных на то, что материалы CIGRE не могут широко применяться в России, поскольку они разработаны под нехарактерные для нас технические решения. Не говоря уже о том, что они не имеют в России статуса нормативного документа.

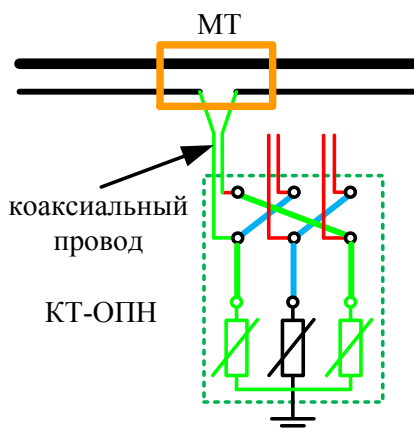


Рис.2. Соединение муфты с коробкой, выполненной коаксиальным проводом.

В случае применения коаксиального провода возникает специфическая задача – определить, на какое импульсное напряжение должна быть рассчитана изоляция между двумя его концентрически расположенными токоведущими частями. Для ее решения CIGRE и предложила «знаменитую» формулу (обозначения сохранены):

$$E_{1b} = 2 \cdot \left[U_R + 0.45 \cdot L_b \cdot L \cdot \frac{I}{\tau} \right], \quad (1)$$

где U_R – остающееся напряжение ОПН (кВ); I – некоторый «входящий» ток (кА); τ – длительность фронта волны тока (мкс); L – длина коаксиального провода (м); L_b – индуктивность единицы длины коаксиального провода (мкГн/м).

Формулу (1) несложно получить по 2-му закону Кирхгофа, записанному для конура, выделенного на рис.2 зеленым цветом. Единственная особенность в том, что в (1), в отличие от учебника по технике высоких напряжений (ТВН), присутствует эмпирический коэффициент 0.45, который был получен CIGRE после обработки результатов расчетов электромагнитных переходных процессов, выполненных в канадско-американской компьютерной программе EMTP.

Проведя расчеты по (1), CIGRE дает рекомендации [6] по прочности изоляции коаксиального провода (см. табл.1). Видно, что требования к прочности изоляции этого провода увеличиваются с ростом его длины и с ростом класса напряжения силового кабеля. Зависимость от длины очевидна, а влияние класса также несложно понять, ведь для более высоковольтных линий возможные грозовые импульсы на жиле кабеля значительны, а потому – велики и наводки на экран, т.е. I/τ в (1).

Табл.1. Рекомендации CIGRE по прочности изоляции коаксиального провода E_{1b} на стандартном грозовом импульсе формы 1.2/50 мкс.

Грозовой импульс по МЭК для главной изоляции	Класс главной изоляции по ГОСТ 1516.3-96	Требования к изоляции провода	
		Провод до $L = 3$ м	Провод до $L = 10$ м
<325 кВ	6-35 кВ	60 кВ	60 кВ
380-750 кВ	110 кВ	60 кВ	75 кВ
850-1050 кВ	220 кВ	60 кВ	95 кВ
1175-1425 кВ	330 кВ	75 кВ	125 кВ
1550 кВ	500 кВ	75 кВ	145 кВ

Хотя качественно табл.1 не вызывает особого сомнения, каким образом были получены конкретные цифры – остается загадкой, ведь непонятно, какими в (1) надо принимать погонную индуктивность L_b и скорость изменения тока I/τ .

Погонная индуктивность провода L_b может быть вычислена на основе данных о его конструкции и обычно находится в диапазоне значений от 0.1 до 1.2 мкГн/м. Авторы (1) утверждают, что чаще использовали значение 0.24 мкГн/м, которое отвечает волновому сопротивлению 50 Ом и скорости волны около 200 м/мкс.

Если с индуктивностью L_b более менее понятно, то какой принимать скорость изменения тока I/τ (кА/мкс) – нигде не сказано ни слова. Вместе с тем, ток молнии может иметь скорость изменения на фронте от 5 кА/мкс до 100 кА/мкс. Столь существенный разброс параметров тока делает невозможным использование (1), и на этом фоне цифры из табл.1 выглядят не обоснованными и не заслуживающими доверия. Отнюдь не случайно, что уже упомянутые выше конкретные требования ПУЭ к организации грозозащиты распределительных устройств получены вовсе не по формулам, а с привлечением статистических расчетов.

В материалах CIGRE упоминается разумное правило – чем короче провод от ОПН до муфты, тем лучше, но никаких адекватных методик для поиска конкретных предельных длин CIGRE не дает. Указанные в табл.1 длины 3 и 10 м рассмотрены в качестве примера использования формулы (1) и вовсе не означают, что нельзя иметь провода длиной 15, 20, 25 м. Также нигде не сказано, что длины проводов не могут отличаться по фазам и что делать, если провода не коаксиальные.

По названным причинам материалы CIGRE далее рассматривать не будем как не содержащие полезной информации по интересующему вопросу.

Расчет импульсных напряжений для кабеля 110 кВ

Механизм появления импульсных напряжений в экранах описан, например, в 10-й главе [4]. Если бы в месте разземления экрана (рис.1,а) и в узле транспозиции (рис.1,б) отсутствовали экранные ОПН, то возникающее при этом напряжение на экране относительно земли могло достигать половины напряжения на жиле и даже более. Поэтому необходимость установки экранных ОПН сомнения не вызывает, но эффективность их работы, к сожалению, снижается из-за наличия соединительных проводов той или иной длины, которые отделяют ОПН от защищаемой концевой или транспозиционной муфты.

В качестве примера проведем расчет напряжения в узле транспозиции линии 110 кВ длиной 3 км с кабелями 1000/240 мм², имеющей один полный цикл (рис.1,б). Моделирование процессов выполним в программе ЕМТР, где будем варьировать длину провода ППС, связывающего муфту и ОПН с рабочим напряжением 7.2 кВ.

При включении кабеля под напряжение сети в его жилах скачком появляется рабочее напряжение. В сети 110 кВ рабочее напряжение может достигать 127 кВ, а амплитуда фазного напряжения – 100 кВ. Наибольшие импульсы будут возникать в экране, отвечающем той из трех жил (фаз) кабеля, напряжение которой на момент включения кабеля было близко амплитудному значению, т.е. к 100 кВ.

На рис.3,а даны две осциллограммы напряжения в узле транспозиции – одна отвечает нулевой длине провода ППС, а другая – огромной длине 100 м. Реальные длины проводов ППС лежат в диапазоне от 0 до 10-20 м, а длина 100 м была взята с целью наглядной иллюстрации процессов. Согласно рис.3,а напряжение на экране в узле транспозиции не превосходит всего 40 кВ даже для провода длиной 100 м, т.е. напряжение на экране составило 0.4 от напряжения жилы.

Из рис.3,а может показаться, что на экране возникает целая серия импульсов, которые многократно достигают 40 кВ. Здесь следует сказать, что традиционно в подобных расчетах принято ориентироваться лишь на первые колебания. Другие же импульсы, последующие, во внимание не принимаются, так как на практике их не будет в силу серьезного действия потерь и вносимого ими затухания, которое, увы, не удастся достоверно учесть в программах вроде ЕМТР.

Напряжение рис.3,а вряд ли представляет опасность для оболочки кабеля и муфты, поскольку:

- для оболочки допустимо более 100 кВ, а здесь всего 40 кВ;
- прочность оболочки проверяется на импульсе с длительностью 50 мкс, а здесь она не более всего 3 мкс.

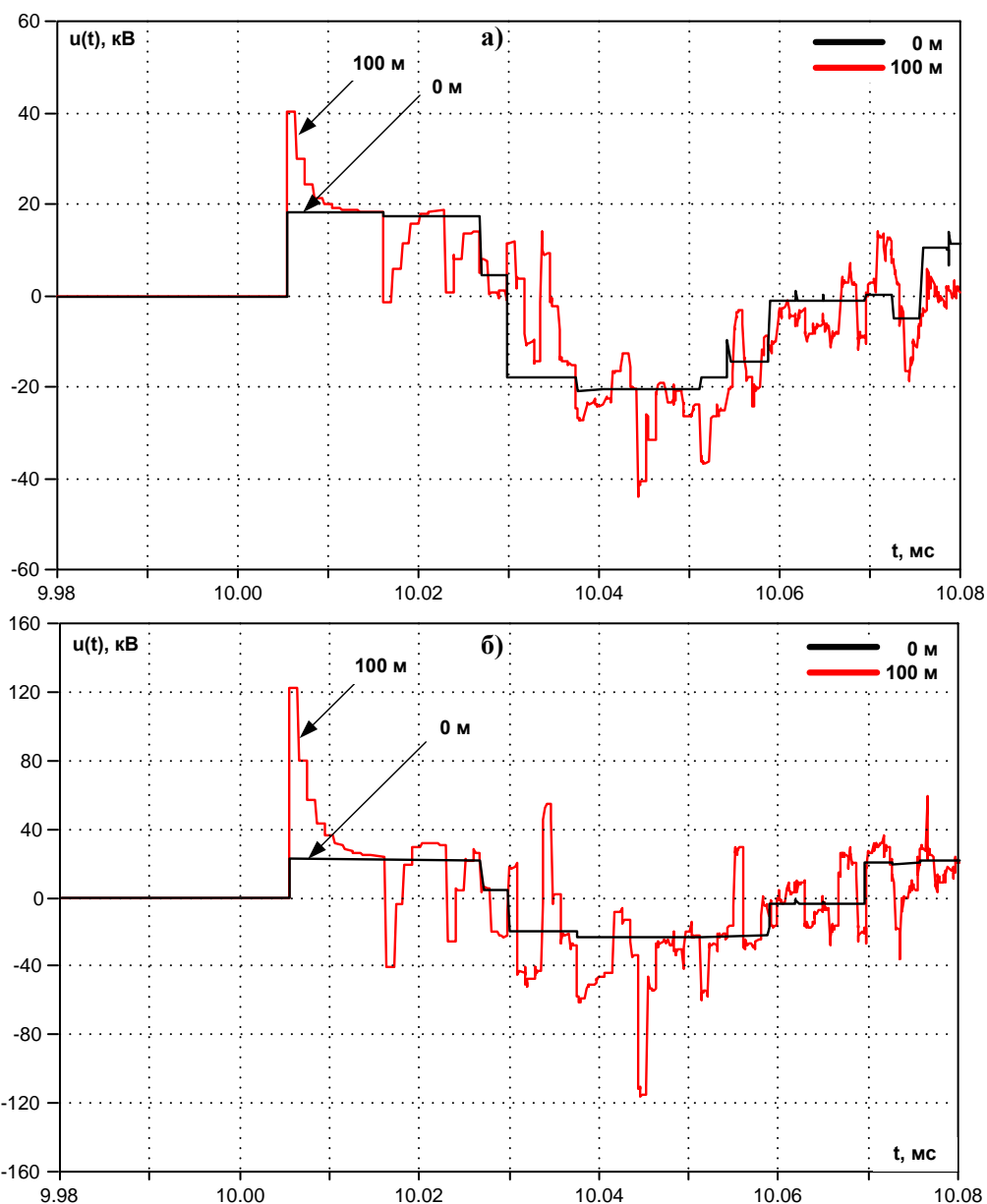


Рис.3. Напряжение в узле транспозиции КЛ 110 кВ в зависимости от длины провода ППС: (а) при коммутации кабеля; (б) при близком разряде молнии.

Расчет грозовых процессов можно провести следующим образом. Известно, что если кабель проложен в сети, содержащей воздушные линии, то для его защиты от грозовых перенапряжений вблизи от концевых муфт устанавливают силовые ОПН. Остающееся напряжение ОПН 110 кВ не превосходит 300 кВ, и поэтому для расчета грозовых импульсов на экране в узле транспозиции достаточно включать кабель под постоянное напряжение 300 кВ.

Результат соответствующего расчета показан на рис.3,б. Наибольшее значение напряжения на экране составило 120 кВ, что близко к прочности оболочки кабеля, но все же вряд ли опасно в силу малой длительности импульса (всего 3 мкс против испытательных 50 мкс). Тем не менее, очевидно, что грозовые воздействия мощнее коммутационных и требуют более детального изучения. Также можно отметить, что на рис.3,б как и на рис.3,а наводка на экраны – около 0.4 от напряжения жилы.

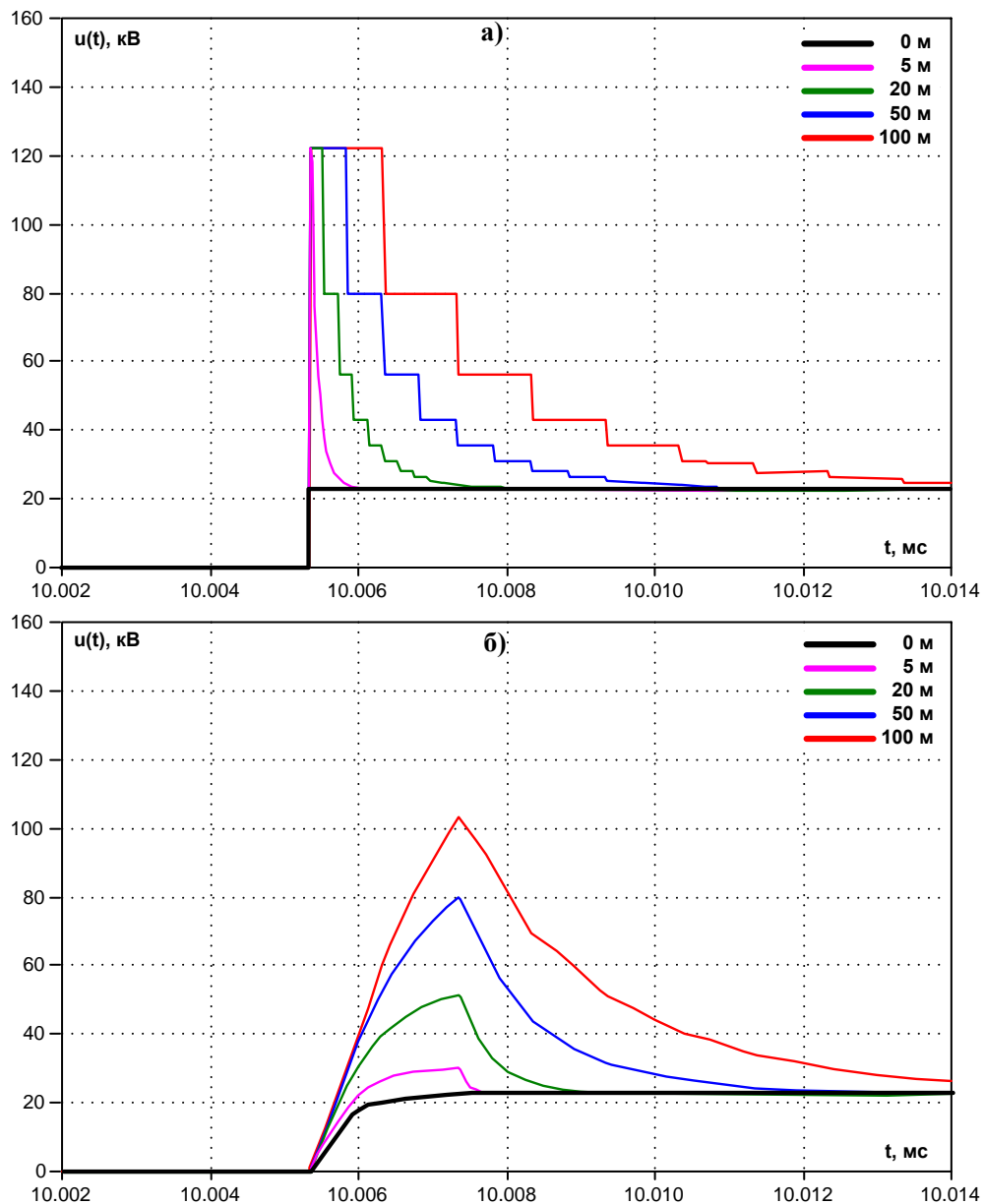


Рис.4. Напряжение в узле транспозиции КЛ 110 кВ в зависимости от длины провода ППС: (а) грозовая волна с фронтом 0 мкс; (б) грозовая волна с фронтом 2 мкс.

На рис.4,а показан первый грозовой импульс напряжения на экране, и то, как он изменяется по мере увеличения длины провода ППС от 0 до 100 метров. Видно, что максимальное значение напряжения при этом не меняется, а все что происходит – это постепенно увеличивается длительность импульса (время до его полуспада), достигая 3 мкс (при 100 м).

Грозовая волна, пришедшая в жилу кабеля, имеет крутой фронт тогда, когда она образовалась в результате близкого к кабелю разряда молнии в заземленную часть воздушной линии (ВЛ) и последующего обратного перекрытия с заземленной части ВЛ на фазный провод. В остальных случаях грозовая волна имеет не фронт нулевой длительности, а какой-то другой, конечный. В качестве примера на рис.4,б даны расчеты для случая, когда грозовое напряжение на ОПН выросло до 300 кВ не мгновенно, а за время 2 мкс.

Из рис.4,б видно, что увеличение длительности фронта волны от 0 до 2 мкс вызвало снижение напряжения на экране, особенно заметное при небольших длинах ППС. Например, при длине 5 м снижение произошло со 120 кВ до всего 30 кВ.

Осциллограммы рис.4,а,б не позволяют сделать никакого конкретного вывода кроме и без того известного «чем короче провода, тем лучше». Никто не знает, куда ударит молния и какие у нее параметры, а значит никто не сможет быть уверен в том, подставлять ли в расчеты фронт 0 мкс или 2 мкс или какой-то другой. Здесь требуются статистические расчеты, способные учесть все многообразие параметров грозовых волн, приходящих в кабель с воздушной линии. Их несложно провести, но они потребуют времени и финансирования.

В условиях существенного различия формы реальных импульсов в экранах (короткие) и испытательных (длинные), в условиях неопределенности с прочностью оболочки кабеля (100 кВ или какая?), в условиях статистической природы молнии и мест ее разряда, глядя на рис.4,а,б нельзя сделать однозначного вывода, что длина провода ППС, например, 5 м еще допустима, а скажем 20 м – нет. Все что остается – рекомендовать использование проводов ППС минимальной длины, но при этом не может быть и речи о каком-то запрете применения проводов длиной более 10 (15) м: если обстоятельства на стройплощадке потребовали применения проводов более 10 (15) м, то нет законных оснований, которые могли бы запретить это сделать.

Оценка импульсных напряжений для кабелей 220-500 кВ

Рассмотрим, как изменятся осциллограммы рис.4, если речь пойдет о кабеле 220 кВ и выше. Для защиты кабеля 220 кВ применяют ОПН 220 кВ с остающимся напряжением около 500 кВ, и тогда напряжение в узле транспозиции можно оценить как $0.4 \cdot 500 = 200$ кВ, достигаемое лишь в случае грозовой волны с фронтом нулевой длительности. Однако для воздушных линий 220-500 кВ прочность изоляции ВЛ так высока, что риск обратных перекрытий минимален, а значит – в расчеты процессов в кабеле надо подставлять не фронт нулевой длительности, а другой, конечный, что снизит напряжение на оболочке с уровня 200 кВ до менее опасного.

Согласно главе 4.2 ПУЭ на подходах ВЛ к распределительным устройствам 35 кВ и выше следует предпринимать меры по снижению риска обратных перекрытий изоляции и возникновению грозовых волн с крутым фронтом, способных вызвать опасные перенапряжения на изоляции оборудования. Для этого на ближайших к распределительному устройству опорах ВЛ обеспечивают малые сопротивления заземления (не более 10-20 Ом), а также устанавливают 1-2 молниезащитных троса.

Выше было показано, что риск обратных перекрытий напрямую определяет воздействия на оболочку примыкающего к воздушной линии кабеля. Следовательно, в случаях, когда имеет место кабельно-воздушная линия 35 кВ и выше, переходной пункт (да и сам кабель с муфтами) следует также воспринимать как своеобразное распределительное устройство, и тогда, как этого требует ПУЭ, несколько опор ВЛ, примыкающих к переходному пункту, должны иметь сопротивление заземления не более 10-20 Ом и должны быть с тросами. В противном случае, никакие экранные ОПН даже при длине проводов ППС всего 5 м уже не смогут обеспечить защиту оболочки кабеля и муфты, особенно для кабелей 220, 330, 500 кВ.

Допустимый разброс в длинах соединительных проводов

Несколько раз приходилось слышать, что длины соединительных проводов должны быть одинаковы. Прежде всего, подобные соображения высказываются про схемы транспозиции (рис.1,б), и остается только догадываться о причинах таких требований и месте их публикации (это точно не CIGRE).

Импульсные процессы в каждом соединительном проводе происходят почти обособлено от проводов других фаз. Поэтому все сводится к тому, что на оболочке той фазы кабеля и муфты, где провод до ОПН короче, будут возникать импульсы пониженной величины и/или длительности, но никакой проблемы в этом нет.

На промышленной же частоте все провода, являясь продолжениями экранов кабеля, объединяются в одну общую связанную систему, и здесь уже, теоретически, можно понять желание иметь все провода одинаковой длины, ведь благодаря этому все три экрана кабеля тоже окажутся равной длины и будут вести себя как система идеальной транспозиции. Эти соображения, по сути, являются вариацией на часто встречающееся заблуждение, заключающееся в том, что, мол, транспозиция экранов работоспособна лишь в случае равенства длин трех участков L_1, L_2, L_3 (рис.1,б).

Рассмотрим два примера, показывающие, что транспозиция экранов прекрасно выполняет свои функции даже в случае существенно различия длин L_1, L_2, L_3 . Для удобства основные исходные данные заимствуем из примера статьи [5], где линия 10 кВ длиной 6 км была выполнена кабелями 630/95 мм², проложенными сомкнутым треугольником, и для линии достаточным оказалось обустроить один полный цикл транспозиции экранов. Погонное наводимое на экран напряжение составляло 50 В на каждые 1000 м длины кабеля и 1000 А тока в жиле.

Пример №1. Пусть линия длиной 6 км оказалась разбита на участки длиной $L_1 = 2500$ м, $L_2 = 2500$ м, $L_3 = 1000$ м. Тогда при токе жилы нормального режима 800 А наведенное на экран напряжение промышленной частоты составит: на 1-м участке $U_{э1} = 50 \cdot 2.5 \cdot 0.8 = 100$ В, на 2-м участке $U_{э2} = 100$ В, на 3-м участке $U_{э3} = 50 \cdot 1.0 \cdot 0.8 = 40$ В.

Коэффициент транспозиции [3,4]:

$$K_T = \frac{\sqrt{[U_{э1} - 0.5(U_{э2} + U_{э3})]^2 + [0.5\sqrt{3}(U_{э2} - U_{э3})]^2}}{U_{э1} + U_{э2} + U_{э3}} = 0.25.$$

Согласно [5] вообще без транспозиции относительное значение тока в экране $D_I = 0.25$ о.е., абсолютное значение $I_{э} = D_I \cdot I_{ж} = 0.25 \cdot 800 = 200$ А. После применения транспозиции с участками разной длины ток в экране снизится, но не до нуля, а до некоторого значения, отвечающего небалансу трех наводимых напряжений.

В условия неидеальной транспозиции относительно значение тока в экране $I_{э}/I_{ж} = D_I \cdot K_T = 0.25 \cdot 0.25 = 0.0625$ о.е., абсолютное $I_{э} = (I_{э}/I_{ж}) \cdot I_{ж} = 0.0625 \cdot 800 = 50$ А. Как видно из-за неидеальной транспозиции ток в экране снизился с 200 А не до нуля, а до 50 А, т.е. в 4 раза. Следовательно, потери в экранах снизились в 16 раз – так сильно, что основная цель транспозиции, безусловно, достигнута.

Пример №2. Пусть в условиях примера №1 на 3-м участке длиной $L_3 = 1000$ м фазы кабеля проложены сомкнутым треугольником лишь на отрезке 250 м, а 750 м они проложены в пучке полимерных труб диаметром 225 мм каждая.

Для треугольника погонная наводка составляет 50 В на каждые 1000 м и 1000 А, а для трубного участка отношение $s/d_{\text{э}} = 225/40 = 5.625$ и согласно рис.3 из [5] погонное наводимое на экран напряжение составит уже 150 В. Тогда при токе жилы нормального режима 800 А наведенное на экран напряжение промышленной частоты для 1-го и 2-го участка как и в примере №1 составит по 100 В, а на 3-м участке будет $U_{\text{э3}} = 50 \cdot 0.25 \cdot 0.8 + 150 \cdot 0.75 \cdot 0.8 = 100$ В, т.е. совпадет с первыми двумя.

Коэффициент транспозиции [3,4] $K_T = 0$, ток в экране $I_{\text{э}} = 0$, потери в экране $P_{\text{э}} = 0$, или, иными словами, в рассмотренном случае транспозиция ведет себя как идеальная, хотя длины трех ее участков серьезно отличаются (2500, 2500, 1000 м).

Два приведенных примера показывают, что нет никакого смысла добиваться равенства длин кабеля между узлами транспозиции, если при этом не задаваться вопросом о способах прокладки фаз кабеля и расстояниях между ними. Очевидно также, что различие длин в метры и даже десятки метров совершенно малозначимо, ведь в примерах различие длин достигало 2500-1000=1500 м, и это не помешало успешной работе транспозиции.

Заключение

1. В схемах заземления экранов кабелей 6-500 кВ провода, соединяющие экранные ОПН с концевыми или транспозиционными муфтами, желательно иметь малой длины в несколько метров. Однако никаких оснований для запрета применять провода длиной более 10 (15) м не существует, в том числе в международных документах CIGRE.
2. Для повышения надежности кабельных линий, особенно 220-500 кВ, на опорах сопряженных с ними воздушных линий рекомендуется выполнить мероприятия ПУЭ по организации защищенных подходов: снизить сопротивление заземления опор до уровня не более 10-20 Ом, установить 1-2 молниезащитных троса.
3. Нет никаких оснований требовать, чтобы в схемах заземления экранов кабелей 6-500 кВ длины соединительных проводов были одинаковы у разных фаз линии. Одностороннее заземление экранов или транспозиция остаются эффективными мероприятиями по снижению токов и потерь в экранах даже в случаях, когда длины проводов и длины участков кабеля отличаются на сотни метров.

Литература

1. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Условия создания. Нормы и требования.
2. СТО 56947007-29.060.20.072-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110-500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.
3. 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.
4. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –152 с.
5. Дмитриев М.В. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6-500 кВ // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», №6, 2013, стр.90-97.
6. Guide of the protection of specially bonded cable systems against sheath overvoltages. Cigre working group 07 of study committee n.21 (HV insulated cables). ELECTRA, N128, 1990.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ 110-500 кВ.

ЧАСТЬ 2. Повреждения транспозиционных муфт

Дмитриев М.В., к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета
тел. +7-921-747-90-29, почта mvdm@ya.ru, сайт www.mvdm.ru

Введение

подавляющее большинство повреждений кабельных линий приходится не на сам кабель, а на концевые и соединительные муфты. Вскрытие муфт, выполненное в независимых лабораториях (например, ВНИИКП), как правило, приводит экспертов к выводам о вине производителя муфты или же организации, сделавшей монтаж. Но есть процент случаев, совсем небольшой, 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 таким исключительным случаям на территории бывшего СССР можно отнести только два объекта:

- группа городских кабельных линий 110 кВ в Сочи;
- двухцепная кабельно-воздушная линия 220 кВ вокруг Алма-Аты.

Наиболее вероятные причины повреждений сочинских и алма-атинских линий определены в ходе проведения научно-исследовательской работы и согласованы с мнением ряда ведущих специалистов. К авариям приводил комплекс разноплановых факторов, среди которых - были и перенапряжения *на жиле*, сыгравшие свою роль в условиях сниженной электрической прочности деформированных давлением грунта стресс-конусов муфт, аномально большого числа коммутаций (более 200 раз в год), 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 или же это не так.

В материале [1] 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 соединительных проводов от муфты до коробки транспозиции составляла менее 10 м. Эти выводы, сделанные в результате расчетов в компьютерной программе ЕМТР, полностью согласуются с накопленным опытом эксплуатации на линиях 110-500 кВ, где повреждения муфт происходили при любых длинах соединительных проводов, будь то или всего 2-3 м, или даже 20-25 метров.

Для получения наиболее общей картины процессов, происходящих в экранах, рассмотрим не только перенапряжения при включении линии [1], но и при коротком замыкании в кабеле, а также при коротком за его пределами.

Почему именно транспозиционные муфты 110-500 кВ?

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

- почему не рассматриваются классы 6-35 кВ?
- почему не делается анализ для концевых муфт и для обычных соединительных?

Рабочие напряженности 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 классы 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 по причине возможности проводить их плановую диагностику путем тепловизионного обследования или измерения частичных разрядов, отчасти потому, что рядом с этими муфтами всегда установлены защитные ОПН, а медные экраны скорее всего надежно заземлены. Следовательно, основное внимание надо уделять не концевым муфтам, а расположенным в земле муфтам транспозиции (МТ, рис.1) или соединительным.

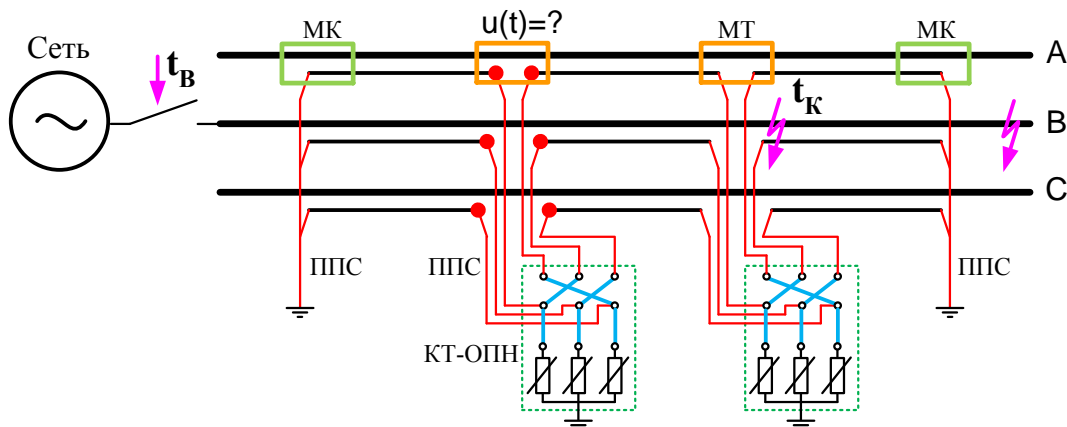


Рис.1. Кабельная линия с транспозицией экранов.

Переходные процессы отражения/преломления волн возникают или по концам кабельной линии или же в местах неоднородности трассы, к которым относятся как раз транспозиционные муфты, а не соединительные. Также интересно отметить, например, что соединительных муфт вообще не было ни на сочинских линиях, ни на самых аварийных участках алма-атинских, а в обоих случаях все муфты являлись транспозиционными. Таким образом, теперь ясно, почему основное внимание далее будет уделено исключительно узлам транспозиции 110-500 кВ.

Петербургская КЛ 330 кВ

Сочинские и алма-атинские линии имели за несколько лет эксплуатации более 10-15 повреждений транспозиционных муфт, а других аварий здесь не было. Эти объекты действительно представляют большой интерес, по ним накоплены хорошие статистические данные, они были обработаны. Также проводились и компьютерные расчеты переходных процессов при коммутациях и грозовых воздействиях, сделаны выводы, что если перенапряжения на жиле и могли быть опасны, то перенапряжения на экранах - скорее нет, они никак не могли спровоцировать пробой стресс-конуса.

Некоторые инженеры пытаются добавить в этот список еще и петербургскую линию 330 кВ "Северная-Василеостровская", где было лишь 3 повреждения, причем на муфты пришлось только два, а третье произошло в самом кабеле. Есть основания полагать, что негативный опыт эксплуатации данной линии не представляет особого научного интереса, поскольку связан с человеческим фактором. Поэтому проводить здесь расчеты перенапряжений и пытаться выявить корреляцию с повреждениями и тем более делать обобщающие выводы, распространяющиеся на другие линии - по меньшей мере странно. Поясним, почему гипотеза перенапряжений не состоятельна.

Повреждение на кабеле изучалось специалистами всемирно известного центра КЕМА, расположенного в Голландии, где заключили, что это короткое замыкание произошло вследствие вибрации грунта, обусловленной работой тяжелой техники при строительстве автодороги, проходящей неподалеку от трассы.

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 - в свое время она получила деньги за строительство линии 35 кВ по дну финского залива, которую до сих пор никому так и не удалось найти. Также работы можно оценить и с помощью фотографий. В частности, фото 1,2 показывают полное отсутствие герметизации колодцев транспозиции и установленных в них коробок.



Фото 1. Бетонный колодец, заполненный водой.

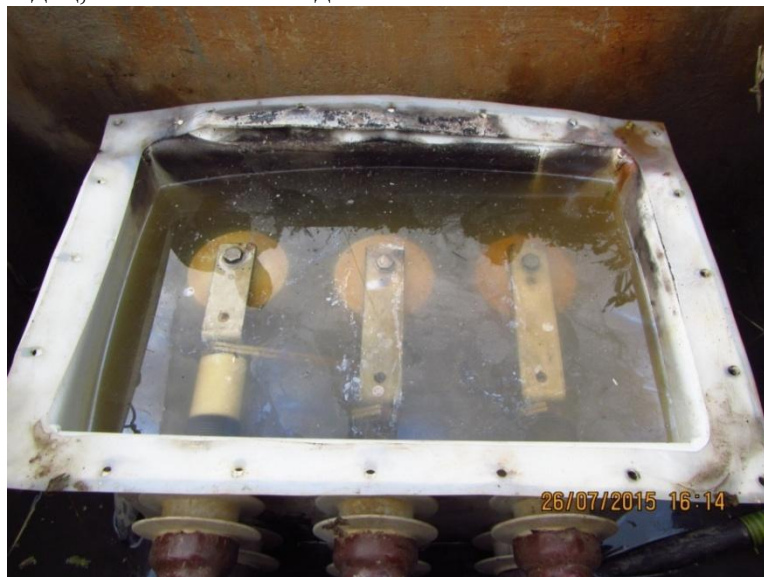


Фото 2. Последствия грубых нарушений инструкции по монтажу коробки транспозиции.

Отсутствие герметичности колодцев само по себе не является новостью для энергетиков. Но для "Северная-Василеостровская" ситуация была осложнена тем, что данные колодцы нетиповые, чрезвычайно малого размера, и для установки в них коробок транспозиции монтажники вначале полностью разбирали эти коробки (что категорически запрещено заводской инструкцией), а потом уже по месту собирали их обратно, разумеется растеряв уплотнительные кольца. В итоге многие коробки оказались заполнены водой так, как это показано на фото 2.

К концу 2016 года благодаря огромным усилиям ведущих специалистов "МЭС Северо-Запада" (Шатилов Д.А., Васильев Р.Е., Высоцкий В.А.) наконец удалось привести в порядок затопленные водой коробки транспозиции (вернуть утерянные уплотнения). Также сейчас ведутся переговоры о замене всех бетонных колодцев этой линии на современные полимерные (герметичные просторные) уже известной в России марки ПРОТЕКТОРФЛЕКС.

Из фотографий и ряда других материалов следует, что кабельная линия 330 кВ "Северная Василеостровская" работала вовсе не со штатной схемой транспозиции экранов, а по сути своей с простым заземлением, которое было обусловлено водой в коробках. Следовательно, никаких перенапряжений на экранах кабелей здесь быть не могло, и объяснить переходными процессами три произошедших аварии (все они до 2016 года) не представляется возможным. В целом анализ аварийности данной линии в период до 2016 года вряд ли может заслуживать доверия.

Включение или короткое замыкание?

Имеющаяся обширная база повреждений кабельных муфт в Сочи, Алма-Ате, Москве и ряде других городов свидетельствует о том, что большинство аварий 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 ее короткими замыканиями. Таким образом, первостепенное внимание следует уделять именно процессам обычного ввода линии в работу, а не коротким замыканиям.

Разумеется, короткие замыкания также нельзя исключать. Например, на линии в самой кабеле возникло короткое замыкание, 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 короткого замыкания, 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 короткое замыкание (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 коротком замыкании очень похожи - и там, и там имеет место быстрое изменение напряжения на жиле, 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 коротком замыкании). Следовательно, перенапряжения на оболочке примерно одинаковы и при включении линии, и при коротком замыкании.

Принципиальным отличием двух этих случаев будет лишь то, что скорее всего ОПН, установленные в коробках транспозиции, при коротком замыкании 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 экранные ОПН.

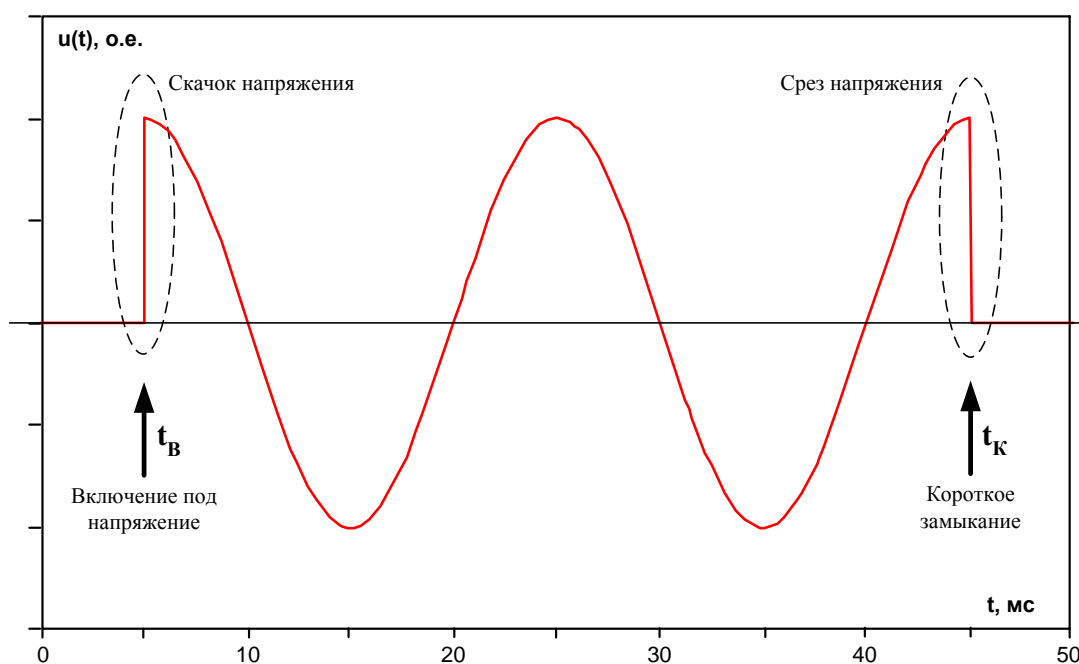


Рис.2. Напряжение на линии при ее включении и последующем коротком замыкании.

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 дана на рис.1, где изображены концевые муфты (МК), транспозиционные (МТ), коробки с ограничителями, обладающими рабочим напряжением 7.2 кВ (КТ-ОПН), соединительные провода с полиэтиленовой изоляцией (ППС). Красными точками указаны те места, где контролировались напряжения на экране относительно земли.

Осциллограммы коммутационных перенапряжений, как показано в [1], 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 действия потерь в линии и в земле. Так и будем поступать, особенно с учетом того, что компьютерная программа ЕМТР 5-й версии, имеющаяся у петербургского политехнического университета, не позволяет учитывать частотные зависимости параметров кабельных линий (хотя для воздушных это делается и неплохо).

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 короткого замыкания 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 ограничимся лишь одной муфтой и точкой.

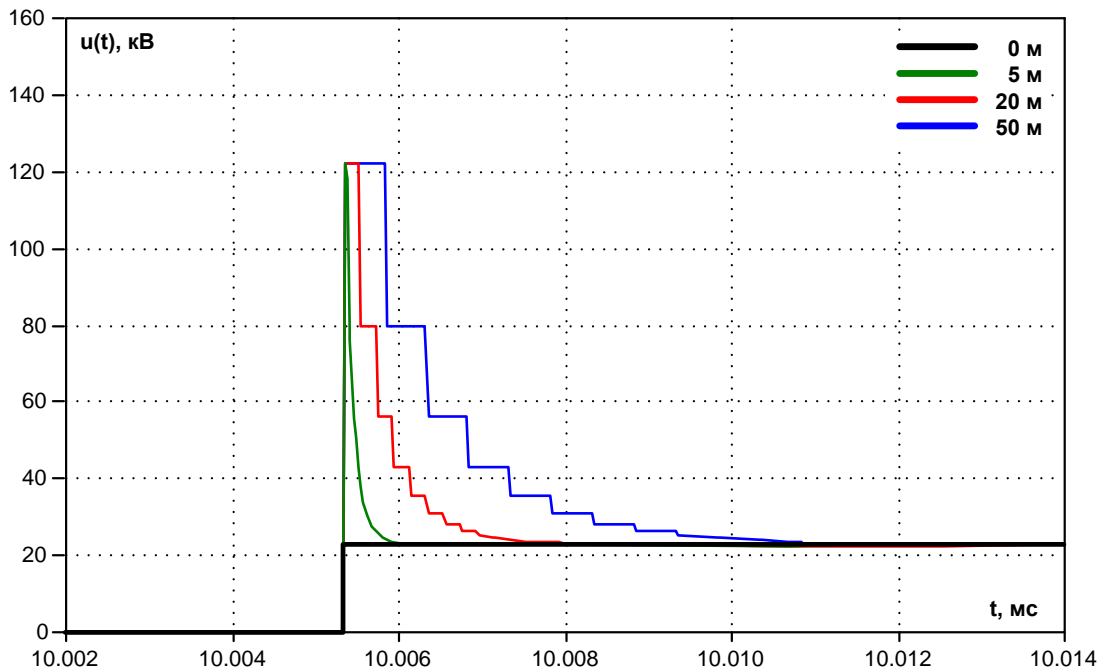


Рис.3. Импульс напряжения на оболочке кабеля 330 кВ в транспозиционной муфте при включении линии под напряжение сети. Варьируется длина соединительных проводов ППС.

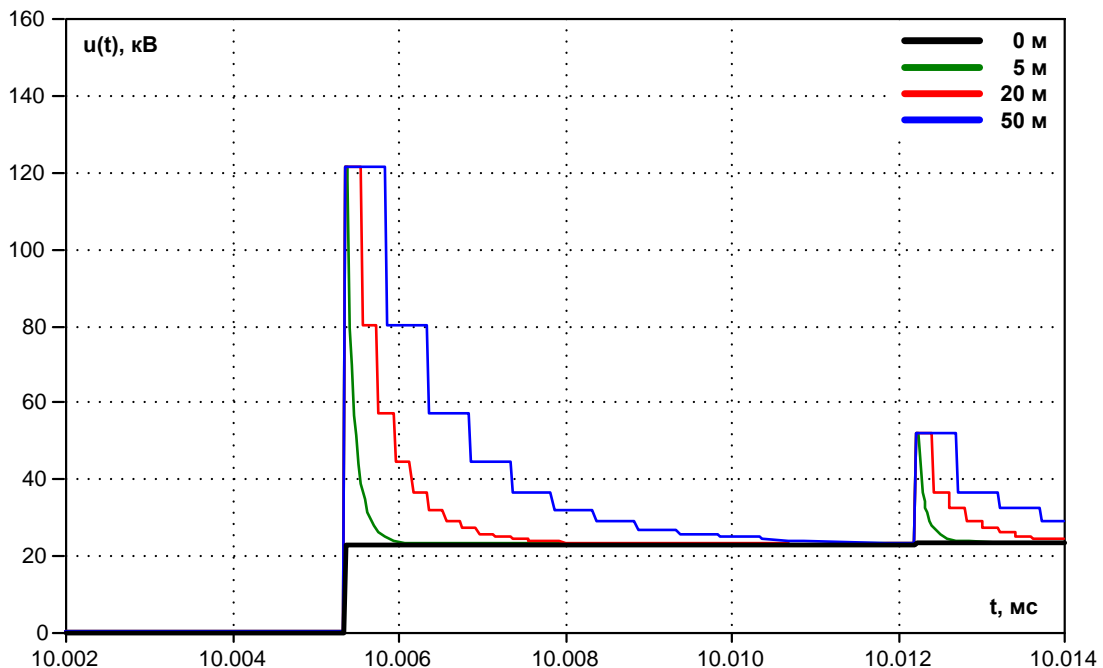


Рис.4. Импульс напряжения на оболочке кабеля 330 кВ в транспозиционной муфте при коротком замыкании в кабеле. Варьируется длина соединительных проводов ППС.

Наибольшее рабочее напряжение сети 330 кВ составляет 363 кВ, и поэтому амплитуда фазного напряжения может достигать уровня почти в 300 кВ. Процессы в экранах кабелей, полученные при скачке напряжения на жиле до 300 кВ и срезе с 300 кВ до нуля, представлены на рис.3 и рис.4 соответственно.

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

Срез фазного напряжения на жиле кабеля и возбуждение колебаний в экранах могут происходить не только при коротком замыкании непосредственно на линии, но и за ее пределами. Причем внешние короткие, очевидно, происходят чаще, чем в самом кабеле, особенно, если речь идет не о кабельной сети, а, например, о сети с кабельно-воздушными линиями с разрядами молнии в воздушные участки.

На рис.5 приведена осциллограмма, полученная в схеме рис.1 при однофазном коротком замыкании за кабелем (длина проводов ППС была принята равной 20 м). Внешнее короткое замыкание 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 никак 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.5).

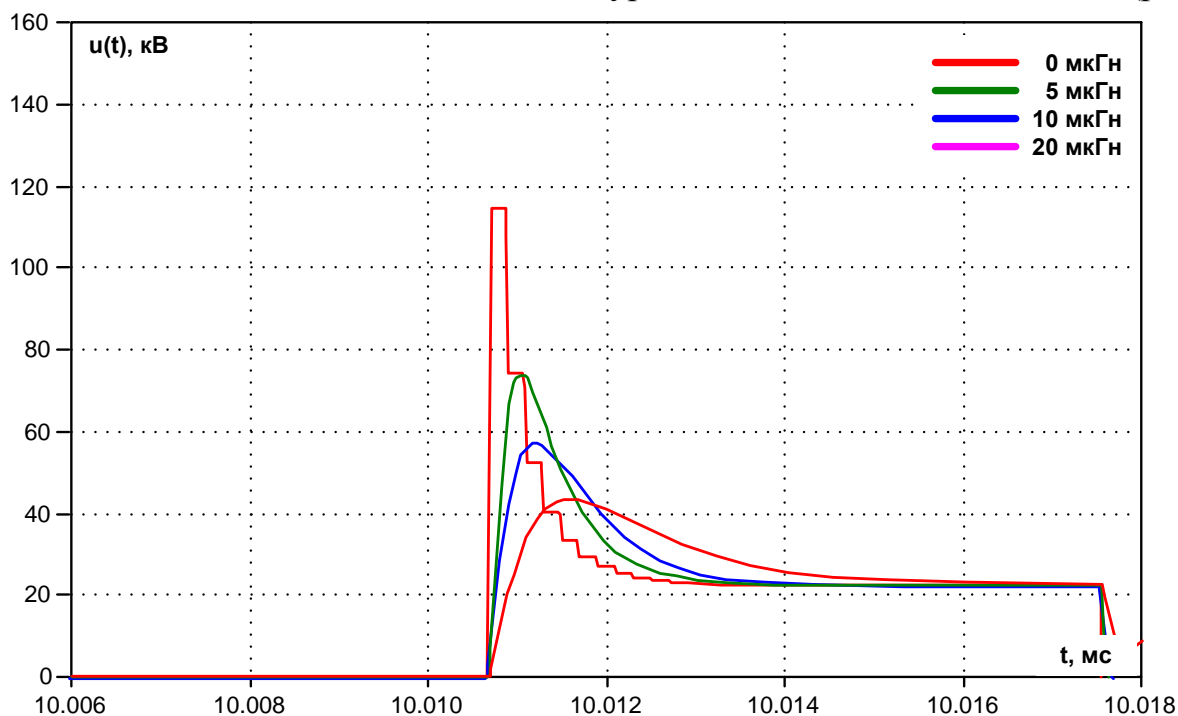


Рис.5. Импульс напряжения на оболочке кабеля 330 кВ в транспозиционной муфте при коротком замыкании вне кабеля. Длина провода ППС равна 20 м. Варьируется индуктивность на пути тока короткого замыкания в землю.

Эффект, аналогичный полученному на рис.5, уже был продемонстрирован в [1], правда на примере фронта грозových перенапряжений (см. рис.4,а и рис.4,б в [1]).

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

Какая прочность оболочки?

В материале [1] подробно рассказывается о испытаниях оболочки на пробой, которые выполнялись в голландской лаборатории КЕМА, а также в петербургском политехническом университете. Импульсная прочность оболочки в муфтах никак не менее 100 кВ - это на полном грозовом импульсе формы 1.2/50 мкс, а для коротких импульсов (вроде тех, что на рис.3-5) прочность еще больше.

Видно, что коммутационные перенапряжения на оболочках силовых кабелей 110-330 кВ не опасны для исправной транспозиционной муфты 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, исключение могут быть только на класс 500 кВ, где прочность оболочки такая же как на 110-330 кВ, а перенапряжения - выше. Однако на 500 кВ в странах бывшего СССР повредилось пока лишь две транспозиционные муфты, и систематизировать данные пока затруднительно.

Оценки прочности оболочки муфт рядом авторов делаются на уровне 30-50 кВ, и получаются путем умножения постоянного испытательного напряжения 10 кВ на "коэффициент импульса" 3-5. Принять такие цифры очень сложно. Во-первых, напряжение величины 10 кВ прикладывается к оболочке линии на 1 мин вовсе не с целью ее испытаний на пробой, а только лишь для проверки отсутствия критичных повреждений, способных дать возможность воде 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 монтажных работ.

Опасны ли процессы в экранах?

Положим, что прочность оболочки в муфте действительно значительна (а не мала) и составляет, например, 150 кВ. Это значит, что перенапряжения более 150 кВ на этой оболочке уже невозможны, поскольку все что свыше 150 кВ тут же вызовет пробой с экрана кабеля на землю. Импульсы подобной величины не могут оказать никакого влияния на главную изоляцию 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. Что уж говорить про опасность для главной изоляции (для стресс-конуса), если прочность оболочки была бы не 150 кВ, а лишь 30-50 кВ, которые берут некоторые авторы.

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 длительный, да и не всегда в грунте имеется вода. Также важно отметить, что повреждение оболочки муфт не упоминалось в актах их осмотра и вскрытия.

Более менее реальная опасность от переходных процессов в экранах связана не с рассмотренными выше перенапряжениями на экране относительно земли, а с перенапряжениями между двумя экранами вдоль муфты (вдоль ее стресс-конуса). Можно показать, что если на рис.3-5 перенапряжения "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) маловероятен.

Выполненные 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], где доказывалось, что длина соединительных проводов ППС даже более 10-15 м не создает опасности для муфт.

Заключение

1. В мире есть несколько кабельных линий 110-500 кВ, где зафиксировано аномально большое число повреждений транспозиционных муфт. Однако объяснить эти повреждения перенапряжениями на экранах затруднительно, отчасти и в связи с тем, что некоторые из таких линий эксплуатируются с небрежно смонтированными и поэтому заполненными водой транспозиционными коробками, обеспечивающими многократное повторное заземление экранов, но никак не их транспозицию.

2. При проведении расчетов перенапряжений на оболочках муфт относительно земли и вдоль разрыва экранов, если такая задача все же поставлена, основной упор следует делать на коммутацию включения кабельной линии под напряжение сети, а анализ коротких замыканий в кабеле и тем более за его пределами уже не нужен.

Литература

1. Дмитриев М.В. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Часть 1. Перенапряжения на оболочке и длина соединительных проводов // Сборник трудов ПЭИПК, 2017 год.