Требования к узлам транспозиции экранов КЛ 110–500 кВ

УДК 621.315.21

Кабельные линии высокого напряжения классов от 110 до 500 кВ играют ключевую роль в электроснабжении городов как в нашей стране, так и за рубежом. Вот уже более 20 лет такие линии в большинстве случаев выполняются кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена однофазной конструкции. Одной из проблем, которые при этом приходится решать, является борьба с наведенными токами в экранах кабелей и соответствующими потерями мощности в экранах, нагревающими изоляцию и, тем самым, снижающими способность линии передавать мощность. Для кабельных линий 110–500 кВ длиной более 500–800 м ограничение токов и потерь мощности в экранах осуществляется за счет транспозиции экранов. Статья рассматривает варианты обустройства узлов транспозиции и выбор наиболее оптимальных из них.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

Ключевые слова:
кабельная линия, однофазный кабель, транспозиция экранов, муфта транспозиции, коробка транспозиции, соединительный провод

Транспозиция экранов однофазных кабелей 110–500 кВ подробно рассмотрена в книге [1] и стандарте ПАО «ФСК ЕЭС» [2]. В качестве примера на рисунке 1 показан один полный цикл транспозиции экранов, предполагающий, что вся линия делится на три участка примерно равной длины, и экраны соседних участков соединяются друг с другом при помощи системы перемычек, размещенной в коробке транспозиции, также имеющей комплект ограничителей перенапряжений (ОПН), необходимых для защиты полимерных оболочек кабелей от импульсных перенапряжений. Подключение коробки к муфтам кабельной линии осуществляется соединительными проводами.

Встречается несколько вариантов конструктивного исполнения муфт и коробок, а также проводов для их соединения друг с другом. Рассмотрим основные имеющиеся варианты и оценим их преимущества и недостатки.

ИСПОЛНЕНИЕ МУФТ, КОРОБОК, ПРОВОДОВ

Транспозиционная муфта предполагает, что у соединяемых в муфте участков кабелей экраны не соединяются друг с другом, а выводятся наружу с использованием изолированных проводов. При этом известны два варианта исполнения таких выводов:

– при помощи единого общего коаксиального провода, имеющего в конструкции два проводника равного сечения, расположенных концентрически (рисунок 2);
– при помощи двух отдельных одножильных проводов (рисунок 3).

Отметим, что одножильные провода из муфт могут выводиться не только в две противоположные стороны (как показано на

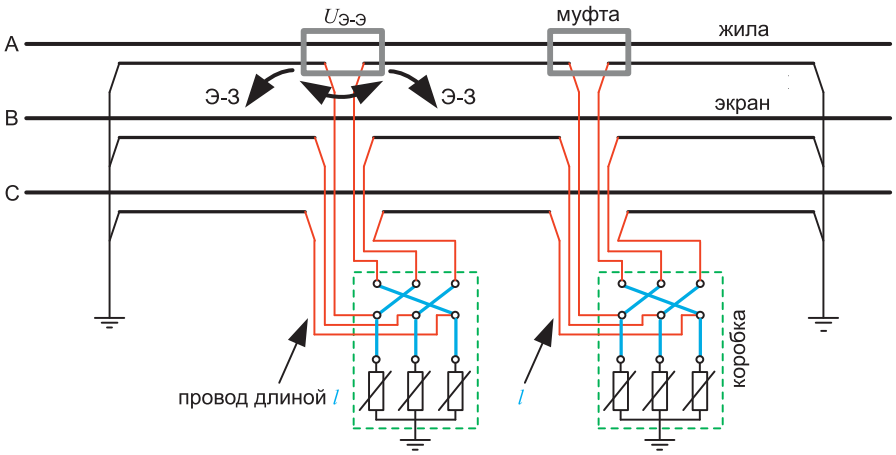


Рис. 1. Схема транспозиции экранов однофазных кабелей



Рис. 2. Муфты транспозиции с выводом экранов коаксиальными проводами



Рис. 3. Муфты транспозиции с выводом экранов одножильными проводами

рисунке 3), но и в какую-то одну сторону, и в таком случае техническое решение оказывается близко к показанному на рисунке 2.

Известно значительное число различных конструктивных исполнений коробок, которые отличаются материалом корпуса коробки, размером, числом болтов на крышке, способом подключения соединительных проводов. Сосредоточим внимание только на подключении проводов, причем не с точки зрения надежности и герметичности мест подключения, а с точки зрения их расположения на корпусе коробки. Есть три варианта:

– для коаксиальных проводов — в корпусе коробки имеется три «отверстия» для ввода проводов внутрь, где провода разделываются и подключаются к шести опорным изолятором, которые соединяются перемычками по схеме транспозиции (рисунок 4);
– для одножильных проводов — на одной и той же стороне корпуса коробки имеется шесть «отверстий» для ввода проводов внутрь (рисунок 5);
– для одножильных проводов: шесть «отверстий» разделены на две равные группы и размещены на двух противоположных стенках корпуса коробки (рисунок 6).

К каждой коробке (рисунки 4–6) также подключается один дополнительный провод, необходимый для заземления комплекта ОПН, но его расположение не имеет значения.

Показанные на рисунках 2 и 3 муфты можно подключить к показанным на рисунках 4–6 коробкам с помощью коаксиальных или одножильных проводов. Возможные варианты показаны на рисунке 7. Обратим внимание, что если одножильные провода вывести из муфты не в противоположные стороны, а на одну сторону, то тогда вариант рисунка 7б станет очень близок к варианту рисунка 7а.

На первый взгляд варианты, показанные на рисунке 7, кажутся равноправными, достигающими одного и того же результата (транспозиции экранов). Однако на самом деле указанные варианты отлича-

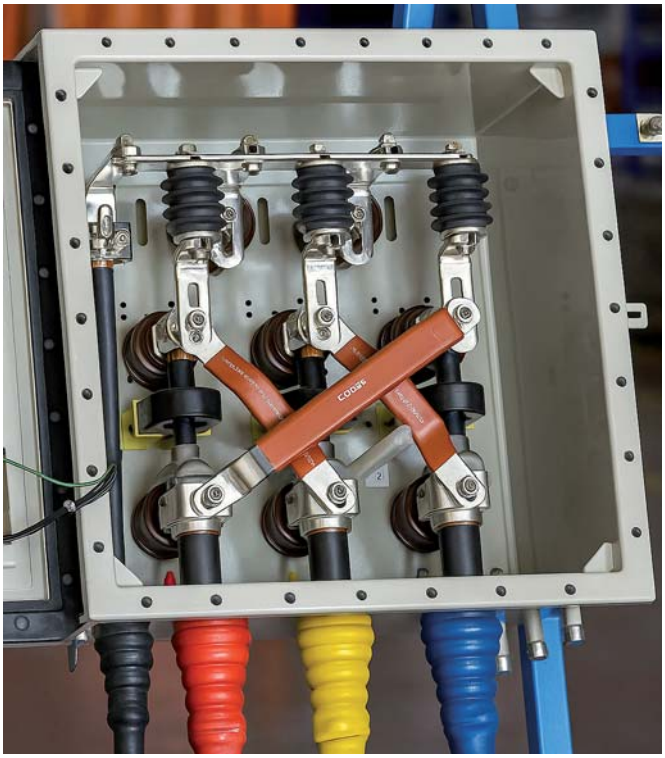


Рис. 4. Коробка транспозиции под коаксиальные провода



Рис. 5. Коробка транспозиции под одножильные провода (выводы с одной стороны)



Рис. 6. Коробка транспозиции под одножильные провода (выводы с двух противоположных сторон)

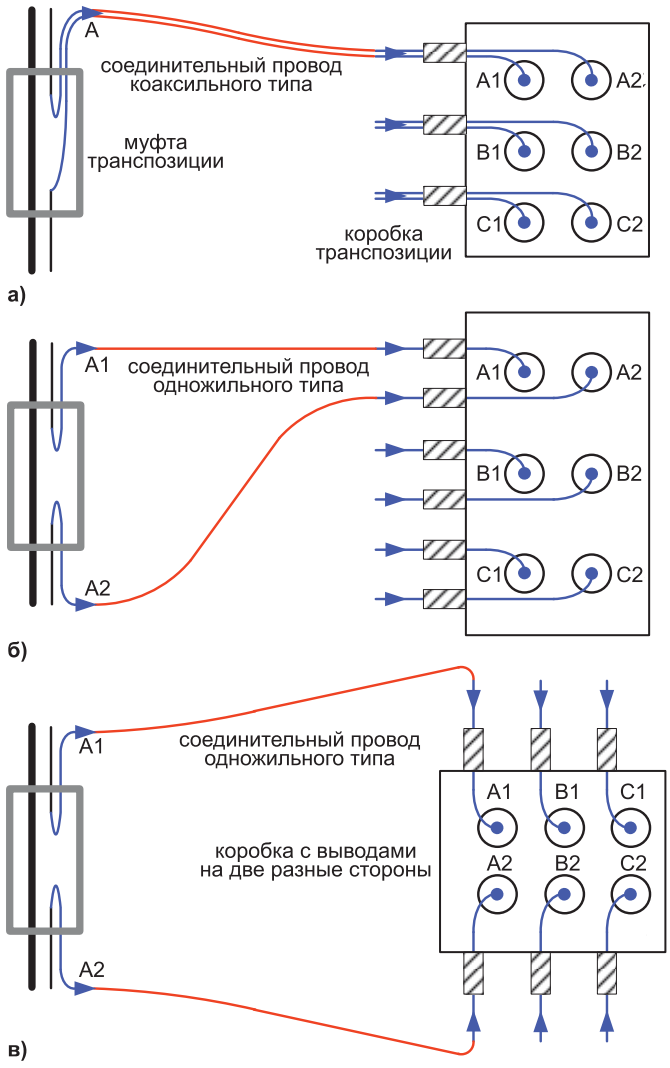


Рис. 7. Варианты обустройства узла транспозиции экранов: а) соединение муфты и коробки коаксиальными проводами; б, в) соединение муфты и коробки одножильными проводами

ются весьма существенно, и чтобы понять это, следует обратиться к нормативным документам и серии расчетов.

ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

В российских нормативных документах, к сожалению, не удалось найти какого-либо сравнительного анализа трех вариантов, показанных на рисунке 7. Однако такой анализ приведен в международном документе IEEE [3], где в п. 7.5.2 однозначно сказано отдавать предпочтение коаксиальным проводам. Также в [3] дано краткое руководство по подключению каждой муфты к коробке:

– при длинах проводов до 3 м можно использовать обычные одножильные провода;
– при длинах проводов от 3 м до 10 м следует использовать два скрученных друг вокруг друга одножильных провода и, если скрутить провода невозможно, по крайней мере их надо расположить вплотную друг к другу и скрепить стяжками;
– при длинах от 10 м до 15 м настоятельно рекомендуется брать коаксиальные провода;
– длины выше 15 м следует исключить.

Видно, что IEEE [3] рекомендует располагать провода, выходящие из муфты, как можно ближе друг к другу, а в идеальном случае даже объединять их в единый провод коаксиальной конструкции. Таким образом, из трех вариантов, показанных на рисунке 7, международные документы советуют вариант (а), тогда как вариант (в) разрешается лишь при минимальных длинах проводов всего до 3 м. Поскольку в узлах транспозиции длина проводов обычно достигает 10–15 м, то следует признать, что вариант (в) по сути не может применяться на практике, и его следует исключить при проектировании.

Причина необходимости тщательного выбора конструкции провода разъясняется в другом международном документе — технической брошюре CIGRE [4]. Здесь в п. 4.5.4 приводится формула для импульсного напряжения в кабельной муфте, равная сумме остающегося напряжения на ОПН, установленного в коробке, и падения напряжения на соединительных проводах. При этом падение напряжения на проводах оказывается прямо пропорционально:

– длине проводов (м);
– погонной индуктивности проводов (мкГн/м);
– крутизне фронта тока в проводах (кА/мкс).

Индуктивность пары проводов зависит от их конструкции (коаксиальная или же одножильная) и от расстояния между одножильными проводами в паре (если провода одножильные). В [4] указан весьма широкий диапазон погонных индуктивностей от 0,1 до 1,2 мкГн/м, что затрудняет использование формулы для расчета напряжения в муфте. Еще одной проблемой использования формулы [4] является статистический характер параметров молнии, и, например, необходимая для расчетов крутизна тока, согласно п. 4.2.1 [4], варьируется в широком диапазоне от 24 кА/мкс до 80 кА/мкс и даже более.

Видно, что не представляется возможным использовать формулу [4] для расчета напряжений в кабельной муфте и проверки обоснованности тре-

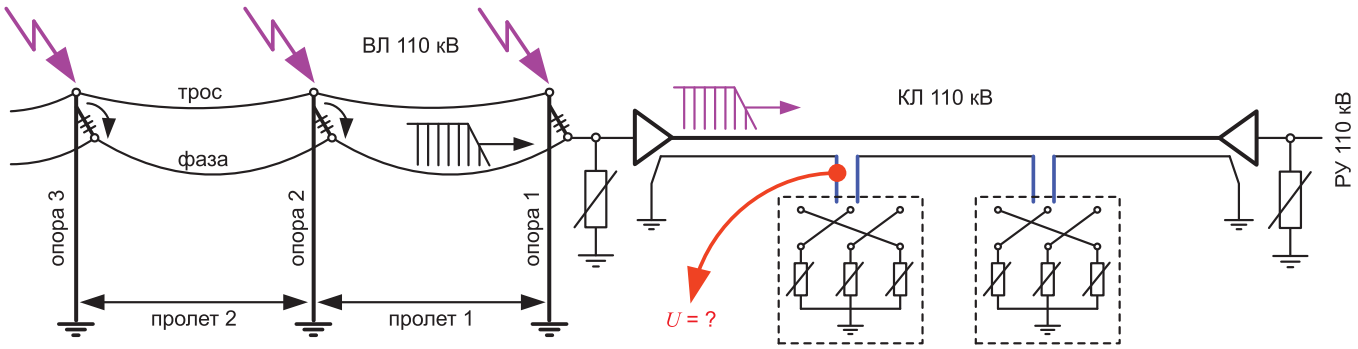


Рис. 8. Схема для проведения статистических расчетов перенапряжений

бований [3] к длине соединительных проводов, их оптимальному типу и взаимному расположению. По данной причине проверку требований [3] проведем при помощи детального компьютерного моделирования процессов, с учетом статистического характера основных параметров тока молнии, а также с учетом конструкции соединительных проводов, задание которой позволит определять корректные параметры проводов (индуктивность) автоматически.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

Грозовые перенапряжения в узле транспозиции могут возникать в тех случаях, когда кабельная линия подключена к воздушной линии, как это показано на рисунке 8. Компьютерное моделирование данной схемы удобно выполнить в программе EMTP, руководствуясь рекомендациями [5], нацеленными на статистические расчеты.

В качестве примера рассмотрим кабельную линию 110 кВ длиной 3 км с медной жилой сечением 1200 мм^2 и одним полным циклом транспозиции экранов (три участка по 1 км каждый). Пусть такая КЛ подключена к одноцепной ВЛ 110 кВ, выполненной на одноцепных опорах с одним тросом и расстоянием между опорами 300 м. Величину сопротивления заземления опор примем равной 0,5 Ом для опоры 1 (приемный портал) и 10 Ом для всех остальных опор. В месте соединения друг с другом ВЛ и КЛ учтем комплект ОПН 110 кВ (остающееся напряжение при токе 10 кА составляет 250 кВ), а для узлов транспозиции учтем установленные в коробках ОПН 6 кВ.

На графике рисунка 9 приведены результаты расчетов вероятности P, что максимальное значение грозового импульса «экран-земля» в муфте КЛ превысит значение U, которое откладывается по оси абсцисс. В расчетах варьируется место разряда молнии в ВЛ.

Импульсная прочность оболочки кабелей, в том числе в кабельной муфте, всегда является спорным вопросом. Полагая, что между экраном и землей для муфты 110 кВ допустимым является грозовой импульс с максимальным значением 75 кВ, видим, что опасные перенапряжения (величиной более 75 кВ) возникают только в случае разряда молнии в опору 1, то есть в опору переходного пункта между КЛ и ВЛ.

Расчеты рисунка 9 проведены для случая, когда соединительные провода в узле транспозиции имеют одножильную конструкцию и попарно уложены вплотную друг к другу. При этом длина проводов была принята равной 30 м (на практике такие длины не встречаются), чтобы показать, что даже при таких значительных длинах опасность для муфт представляют только разряды молнии непосредственно в опору переходного пункта между КЛ и ВЛ (опора 1), а не в последующие опоры ВЛ. При этом вероятность 0,04 означает, что опасность для муфты возникает только в одном случае из 1/0,04=25 разрядов молнии в опору 1. Располагая данными по грозовой активности в районе прохождения ВЛ (число разрядов молнии в опору в год или за срок эксплуатации линии), можно пересчитать ось ординат к абсолютным значениям.

График рисунка 10 построен только для случаев разряда молнии в переходную опору 1, так как было показано, что именно такие разряды несут основную опасность. При этом на рисунке 10 варьируется длина соединительных проводов и рассмотрены два случая:

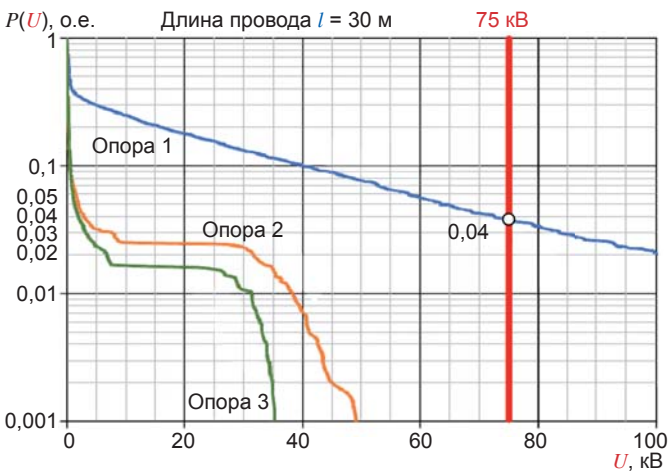


Рис. 9. Вероятность повреждения муфты при разрядах молнии в разные опоры ВЛ при подключении муфты проводами длиной 30 м, расположенными рядом друг с другом

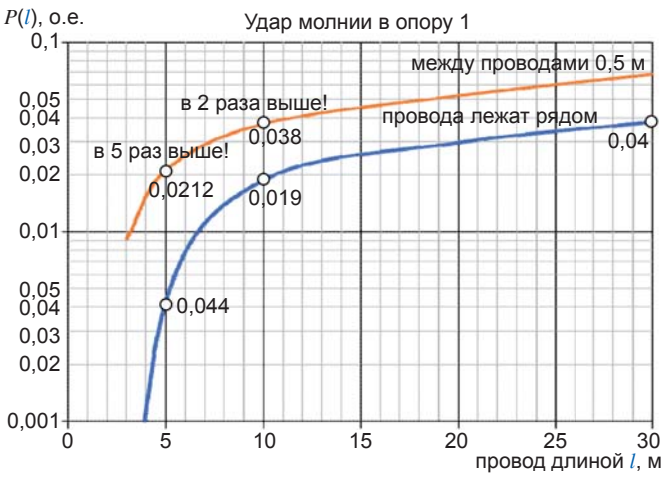


Рис. 10. Вероятность повреждения муфты в случае разрядов молнии в опору 1 при варьировании длины проводов и расстояния между ними

– провода лежат близко друг к другу;
– провода лежат на расстоянии, среднее значение которого 0,5 м.

Видно, что увеличение расстояния между проводами в несколько раз (в 2–5 раз) повысило вероятность P возникновения в муфте опасных грозовых импульсов. Таким образом, можно подтвердить положения IEEE [3], которые настоятельно рекомендуют прокладывать соединительные провода максимально близко друг к другу, а в идеальном случае перейти от проводов одножильной конструкции к коаксиальным проводам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. В статье рассмотрены варианты соединения муфт и коробок транспозиции.

2. При определении импульсных напряжений в муфтах предложено заменить спорные расчеты по формуле [4] на подробные статистические расчеты процессов, которые позволяют учитывать весь возможный диапазон крутизны тока молнии, а не какое-то одно ее значение. В статье дан вариант таких расчетов, выполненных в EMTP на примере типовой КЛ 110 кВ.

3. Показано, что для узлов транспозиции экранов КЛ 110–500 кВ требования IEEE [3] прокладывать пары одножильных соединительных проводов максимально близко друг к другу (или применять коаксиальные провода) являются обоснованными.

4. Показано, что увеличение расстояния между одножильными проводами пары может в разы повысить вероятность возникновения в муфте опасных импульсов. Поэтому транспозиционные муфты и коробки, конструкция которых предполагает выводы одножильных соединительных проводов в две противоположные стороны, являются наихудшими техническими решениями.

5. При выборе между коаксиальным проводом и двумя одножильными, проложенными вплотную друг к другу, следует учитывать, что коаксиальные провода не позволяют выполнять периодический контроль отсутствия токов в шести экранах кабелей КЛ путем поочередного наложения на провода токоизмерительных клещей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 154 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. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200088441.
3. IEEE 575-2014. Guide for bonding shields and sheaths of single-conductor power cables rated 5 kV through 500 kV, 2014.
4. CIGRE technical brochure TB 283 «Special bonding of high voltage power cables», 2005.
5. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35–750 кВ и защита от них. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 63 с.

REFERENCES

1. M. Dmitriev. Bonding and grounding of power cable screens. St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2010. 154 p.
2. STO 56947007-29.060.20.103-2011. Power cables with XLPE insulation of 110-500 kV voltage classes. Methodology for calculating of screen bonding and grounding. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200088441.
3. IEEE 575-2014. Guide for bonding shields and sheaths of single-conductor power cables rated 5 kV through 500 kV, 2014.
4. CIGRE technical brochure TB 283 «Special bonding of high voltage power cables», 2005.
5. M. Dmitriev. Lightning overvoltages in high voltage switchgear. – St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University, 2010. 63 p.

