

Переходные процессы и перенапряжения в однофазных кабельных линиях высокого напряжения

Бурлаков Е., Евдокунин Г., Карпов А.

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
esburlakov@outlook.com

Шатилов Д.

Ленинградское ПМЭС, филиал ПАО «ФСК ЕЭС»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время все большее распространение получают воздушно-кабельные и кабельные линии высокого напряжения. Эти линии, как правило, выполняются однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Применение таких линий наталкивается на ряд нерешенных проблем, главная из которых – большое число повреждений кабельных муфт различного назначения. В данной статье исследована кабельная электропередача 330 кВ в г. Санкт-Петербурге, связывающая ПС Северная с ПС Василеостровская, и рассмотрены три реальные аварии, приведшие к повреждению большого числа муфт по всей длине кабеля. На основе расчетов была сформулирована одна из версий, объясняющая причины этих аварий, которая связана со значительными перенапряжениями в муфтах кабеля при коротких замыканиях (КЗ). Опасными в этом случае являются не только высокочастотные перенапряжения, которые не всегда могут ограничиваться ОПН, а также большие токи через ОПН от напряжений промышленной частоты, приводящие к повреждению ОПН.

Ключевые слова: кабельная линия, ограничитель перенапряжения, перенапряжения, экран, муфта.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое распространение получили воздушно-кабельные линии и кабельные линии высокого напряжения. Примером такой линии может служить энергетическое кольцо 220 кВ вокруг города Алма-Аты республики Казахстан (ПС Ерменсай – ПС Кенсай). Данная электропередача включает в себя воздушные участки, общей длиной около 8,47 км, и кабельные вставки, протяженностью около 19,13 км. Меньше чем за год эксплуатации на этой электропередаче произошло 10 аварий, из которых 5 произошли на муфтах, 2 на кабеле и 3 на воздушной линии.

Другим примером может служить кабельная линия 330 кВ в Санкт-Петербурге. Данная линия, длиной около 14 км, выполнена однофазными кабелями, проложенными в земле преимущественно сомкнутым треугольником, имеет подводный участок в 4182 м (кабели проложены в ряд) и соединяет ПС Северная с ПС Василеостровская. На передаче имеются 72 однофазные муфты: 18 кабельных муфт для осуществления транспозиции экранов, 15 кабельных муфт, где осуществляется промежуточное заземление экрана (“заземлительные” муфты) без ОПН, 6 муфт где промежуточное заземление экрана осуществлялось через с ОПН (“заземлительные” муфты через ОПН) и 33 соединительные муфты. На линии выполнены 3 полных цикла транспозиции с расстоянием между транспозиционными муфтами при-

мерно в 1 км. За 7 месяцев эксплуатации на электропередаче произошло 3 аварии, сопровождающиеся повреждением большого числа разных муфт на всей длине кабеля.

Подобные аварии также происходили и на других электропередачах (электропередаче 220 кВ в Китае [1], и т.д.), что говорит о реальном существовании проблем повышения надежности работы изоляции в кабельных и воздушно-кабельных сетях.

Значительное число повреждений оборудования высоковольтных кабельных линий с однофазными кабелями 110-330 кВ настоятельно требует выяснения причин этих повреждений и разработки мероприятий по их устранению. Подавляющее большинство повреждений кабельных линий приходится на соединительные муфты, особенно на те из них, в которых обустроены устройства для транспозиции кабельных экранов. В журналах “Новости Электротехники” [2, 3] опубликованы две работы, касающиеся поискам причин повреждения оборудования КЛ. В работе [2] высказано предположение, что повреждение оборудования муфт может быть вызвано нерасчетными воздействиями токов и напряжений на него при внешних или внутренних однофазных коротких замыканиях (КЗ). Последствия прохождения КЗ, особенно неприятно тем, что они могут приводить к повреждениям оборудования сразу в нескольких муфтах по длине кабеля, что нельзя объяснить только возможными ошибками при монтаже муфт. Именно поэтому утверждение в [3], что поскольку КЗ. бывает реже, чем коммутационные операции с КЛ, то его (КЗ.) не следует считать расчетным. Это утверждение следует считать неверным, т.к. КЗ. не должно приводить к повреждению оборудования. Вызывает недоумение и фраза в [3]: “Принципиальным отличием этих двух случаев (включение КЛ и КЗ. на КЛ) будет лишь то, что, скорее всего, ОПН, установленные в коробках транспозиции, при КЗ. на линии будут повреждены, не выдержав проходящего в них тока, когда как при простом включении КЛ с ОПН этого не случится. Повреждение любого элемента КЛ при КЗ. недопустимо и отключение линии по любой причине, тем более связанной с ремонтом оборудования, не должно иметь места.

Данная статья является развитием работы [2], дополненная и исправленная с учетом замечаний, сделанных публично, например, в [3] и в частном порядке. Она посвящена не общему анализу проблемы перенапряжений в КЛ, а в основном, проблеме недопустимых условий работы ОПН в транспозиционных муфтах, приводящих к их повреждению.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования процессов, происходящих при нормальных и аварийных режимах работы, в программном комплексе ЕМТР [4] была собрана схема близкая к реально существующей кабельной сети 330 кВ (рис. 1). Значками обозначены места установки вольтметров, которые позволяли регистрировать напряжения переходных процессов.

Схема состоит из двух источников ЭДС напряжением 330 кВ, эквивалентных индуктивностей систем, равных: 38 мГн на ПС 1 и 45 мГн на ПС 2, а также – 3-х фазной кабельной линии, выполненной однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 2500/339 мм² с медными жилой и экраном. Однофазные кабели на сухопутной части трассы электропередачи проложены сомкнутым или разомкнутым треугольником, на подводной части уложены в ряд. На кабельной линии установлены заземляющие и транспозиционные муфты, образующих 3 полных цикла транспозиции экранов.

Транспозиционные пункты моделировались приближенными к реальным: подводы экранов из муфт к колодцам выполнялись с помощью шести однофазных специальных кабелей (без экрана), с которыми соединялись экраны кабелей разных фаз (экран рабочего кабеля, выходящий из муфты, соединялся с жилой данного кабеля, прокладывавшаяся до колодца и также другим кабелем возвращался обратно; длина этих кабелей принималась равной 15 метров). Существуют и другие способы соединения экранов с транспозиционными или заземляющими колодцами (например, с использованием кабелей с экраном, с использованием 3-х кабелей и др.). Различия в конструкциях соединительных кабелей влияют на высокочастотные перенапряжения: на их частоту и величину.

В схеме использовались следующие модели ЕМТР: трехфазные источники ЭДС; предвключенные индуктивности X_{nc1} и X_{nc2} , определенные по данным токов К.З., модели кабельных линий с распределенными параметрами для силовых кабелей (модель J. Marti ЕМТР с учетом поверхностного эффекта), а также для кабелей, осуществляющих транспозиции экранов и кабелей, заземляющих экраны. Учитывались также сопротивления заземления в колодцах.

В качестве расчетных в этой статье показаны аварийные возмущения, вызванные однофазными короткими замыканиями на кабельной линии, в тех точках, где они имели место в процессе эксплуатации (0,6 и 2,3 км от ПС1 и 3,38 км от ПС2). Однофазное короткое замыкание выполнялось посредством электрического соединения жилы с экраном той же фазы. В данных расчетах (непосредственно до пункта выяснения защитной роли ОПН) ОПН в схеме не учитывался.

Рассмотрим перенапряжение на транспозиционной муфте №3 при коротком замыкании в точке 1 (внутреннее К.З. на участке кабеля с полным циклом транспозиции) в момент максимума напряжения на фазе А (рис. 2). Оно составило 42 кВ (на фазе А, помеченной красным цветом). При этом заметим, что квазиустановившееся напряжение (после затухания свободных составляющих, т.е. на частоте 50 Гц) составило величину, равную 71 кВ. Момент возникновения К.З. имеет важную роль в величине перенапряжений [5]. Так в рассмотренном случае, если момент возникновения К.З. совпадает с нулевым значением напряжения на повреждаемой фазе, то в той же транспозиционной муфте высокочастотные перенапряжения практически отсутствуют. Высокое значение напряжения 50 Гц на экране обусловлено внутренним К.З. на этом участке транспозиции [5].

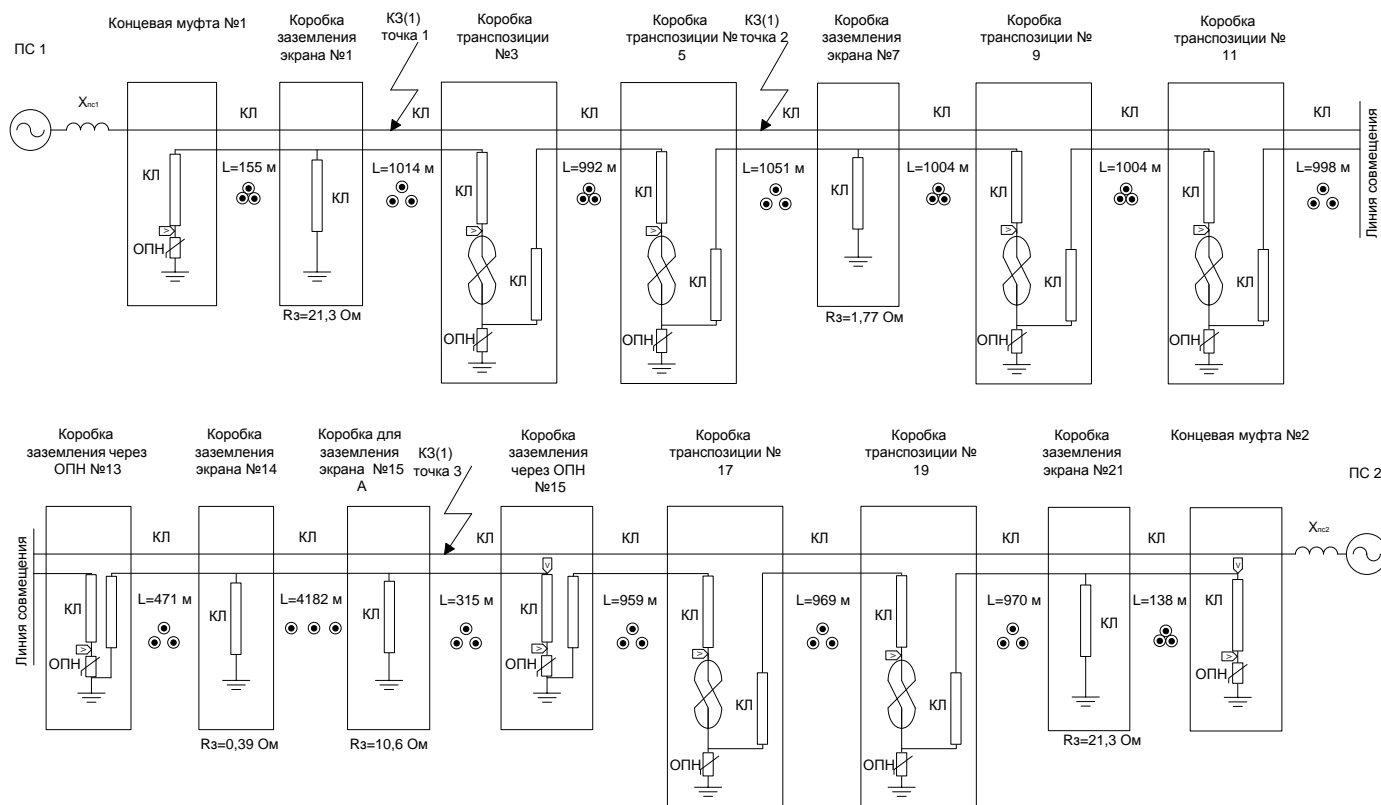


Рис. 1. Полная расчетная схема кабельной линии электропередачи 330 кВ

При коротком замыкании в точке 2 (внешнее К.З. по отношению к второму циклу транспозиции, экран в конце которого заземлен через ОПН) в момент максимума напряжения, рассмотрим перенапряжение в транспозиционной муфте №9 (рис. 3). Оно составило 126 кВ. При этом заметим, что квазиустановившееся напряжение (после затухания свободных составляющих, т.е. на частоте 50 Гц) составило величину, равную 56 кВ. Высокое значение напряжения 50 Гц на экране вызвано заземлением участка только с одной стороны.

При коротком замыкании в точке 3 (внешнее К.З. по отношению к рассматриваемому 3 циклу транспозиции) в момент максимума напряжения на этой фазе рассмотрим перенапряжение в транспозиционной муфте №17 (рис. 4). Оно составило 63 кВ. Если момент возникновения К.З.

совпадает с нулевым значением напряжения на повреждаемой фазе, то в той же транспозиционной муфте максимум высокочастотных перенапряжений не превышает 7,6 кВ.

При этом заметим, что квазиустановившееся напряжение (после затухания свободных составляющих, т.е. на частоте 50 Гц) невелико и составило 7,4 кВ, что близко к расчетной величине установившегося напряжения по формулам [5, 6]. Малая величина этого напряжения объясняется заземлением этого участка экрана с двух сторон.

Приведенные расчеты показывают возникновение при К.З. не только значительных напряжений 50 Гц на изоляции экранов (в определенных условиях), но и высокочастотных перенапряжений (порядка 10 кГц) большой кратности в начальный момент К.З. Почти во всех случаях они превышают испытательное напряжение изоляции экрана,

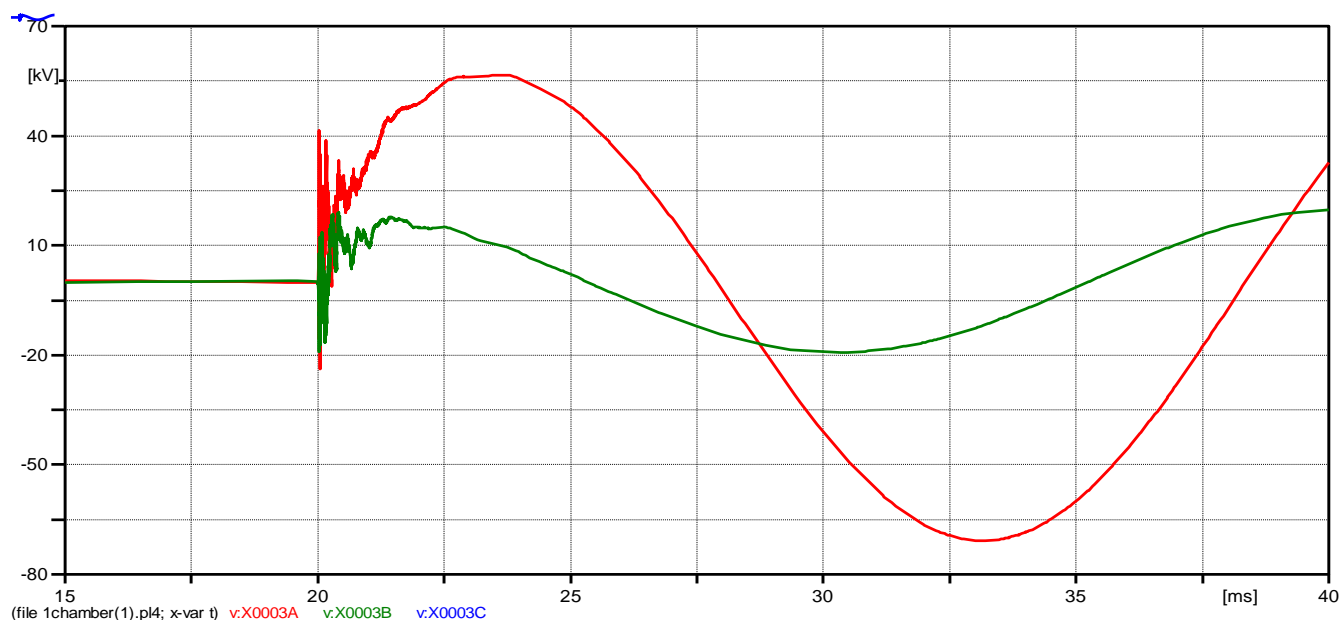


Рис. 2. Перенапряжения на экране в транспозиционной муфте №3 при коротком замыкании в точке 1 на фазе А

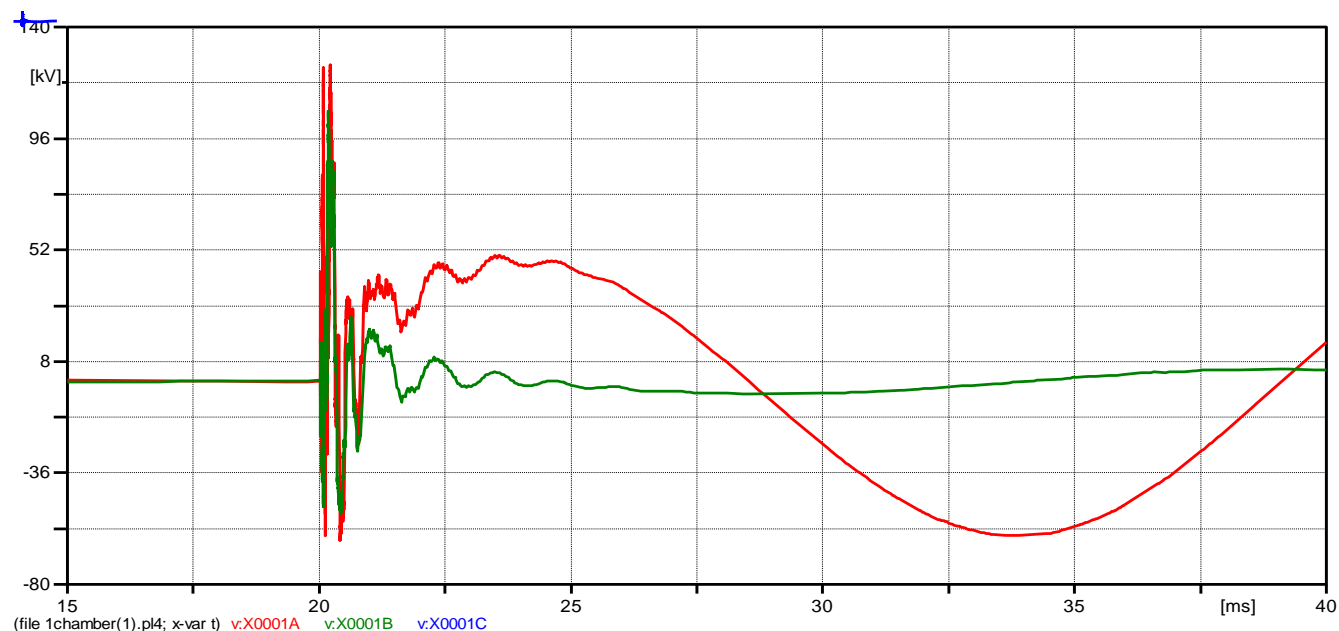


Рис. 3. Перенапряжения на экране в транспозиционной муфте №9 при коротком замыкании в точке 2 на фазе А

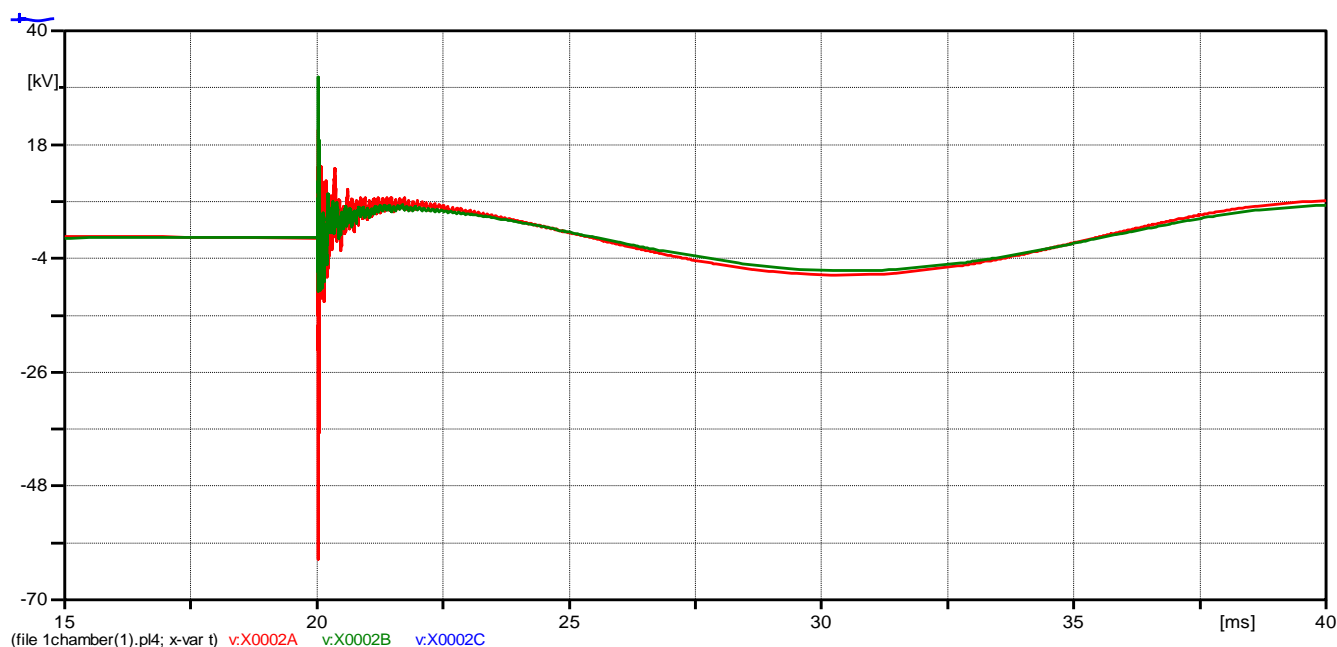


Рис. 4. Перенапряжения на экране в транспозиционной муфте №17 при коротком замыкании в точке 3 на фазе А

составляющее 10 кВ. Возникновение К.З. вызывает также значительные высокочастотные перенапряжения на всех элементах (а не только в транспозиционных муфтах). Так в табл. 1 для примера показаны максимальные перенапряжения в коробках транспозиции и в коробках заземления через ОПН по длине кабеля для случая К.З. в точке 1.

Данные табл. 1 и рис. 2-4 убедительно демонстрируют тот факт, что наибольшие высокочастотные перенапряжения возникают в одной из ближайших к месту К.З. коробках транспозиции, ближе к местам разрыва экранов. Высокие кратности перенапряжений, которые имеют место и в других точках кабельной линии, приводят к возможности повреждения сразу в нескольких точках по трассе кабеля (в т.ч. и из-за снижения электрической прочности в некоторых из них из-за наличия воды в некоторых колодцах).

Таблица 1

Наибольшие максимумы высокочастотных перенапряжений экран-земля в колодцах вдоль длины кабеля при однофазном КЗ в точке 1

	Максимальное напряжение
Концевая муфта №1	95
Коробка транспозиции №3	41,5
Коробка транспозиции №5	63
Коробка транспозиции №9	115
Коробка транспозиции №11	149
Коробка заземления через ОПН (разземленный конец экрана) №13	220
Коробка заземления через ОПН (разземленный конец экрана) №15	88
Коробка транспозиции №17	15
Коробка транспозиции №19	14
Концевая муфта №2	11

Расчеты показывают, что уменьшение длины соединительных шлейфов от силового кабеля до колодцев, уменьшает кратность высокочастотных перенапряжений (табл. 2). Квазистационарные напряжения при этом практически не меняются. Следует заметить, что конструкция соединительных кабелей (например, использование в качестве прямого провода жилы кабеля и в качестве обратного провода экрана того же кабеля) также влияет на кратность высокочастотных перенапряжений (в сторону снижения кратностей).

Таблица 2

Наибольшие максимумы высокочастотных перенапряжений экран-земля в колодцах вдоль длины кабеля при однофазном КЗ в точке 1 при длине соединительных шлейфов, равной 0 м

	Максимальное напряжение
Концевая муфта №1	42
Коробка транспозиции №3	33
Коробка транспозиции №5	25
Коробка транспозиции №9	106
Коробка транспозиции №11	147
Коробка заземления через ОПН (разземленный конец экрана) №13	210
Коробка заземления через ОПН (разземленный конец экрана) №15	109
Коробка транспозиции №17	8
Коробка транспозиции №19	7
Концевая муфта №2	6

Как показано в [6] электрическая прочность изоляции экрана должна быть не менее 10 кВ при тестировании постоянным напряжением (около 5 кВ на частоте 50 Гц). Данных по испытаниям высокочастотным напряжением

производителем не приводится (возможно, это испытание и не производится). Однако, учитывая обычные соотношения между выдерживаемым напряжением изоляции на импульсах и на рабочем напряжении (прочность изоляции на импульсах больше примерно в 3-5 раз, что ориентировочно составляет 40-50 кВ), следует предположить, что столь большое напряжение, приложенное к изоляции экрана при К.З., может приводить к повреждению изоляционных элементов в транспозиционных колодцах или в колодцах, где заземление экрана осуществляется через ОПН. Имеет место неофициально распространяемая информация, что электрическая прочность изоляции экрана выше указанной, однако до официального подтверждения она не может быть принята во внимание. В любом случае ОПН с классом 6 кВ (обычно применяемые на КЛ ОПН) не удовлетворяет реальным условиям его работы. Столь большие напряжения, приложенные к главной изоляции со стороны экрана, могут, в конечном итоге, вызвать повреждение и главной изоляции кабеля.

Роль защитного аппарата (ОПН), вынесенного в колодец №13 (включенный на открытый конец экрана кабеля) можно видеть из рис. 5-7. По величине токов через ОПН видно, что скорее всего ОПН будет разрушен, т.к. воздействующие токи существенно превышают испытательные воздействия. В зависимости от места К.З. и установки ОПН высокочастотные перенапряжения могут вообще не ограничиваться. Так, например, это происходит на ОПН в транспозиционном колодце №3 при К.З. в точке 1.

Выводы

1. Однофазные К.З. в кабельной линии являются опасными для изоляции экрана этого кабеля. Опасными для данного кабеля могут быть и удаленные КЗ, если они случаются на другом кабеле, включенном на общие шины (при относительно малой входной емкости подстанции).
2. Эти К.З. могут вызвать (при неблагоприятном мо-

менте их возникновения) значительные высокочастотные перенапряжения на изоляции экрана кабеля (многие десятки кВ и частотой в несколько кГц). Значительные длины транспозиционных и “заземляющих” кабелей, составляющие 10-15 м до соединительных коробок в колодцах, влияют на уровень перенапряжений. При заземлении экрана через ОПН на нем могут возникнуть опасные длительные повышения напряжения частоты 50 Гц, вызывающие недопустимые токи через ограничитель. Такие воздействия на ОПН могут привести к его повреждению.

3. Значительные перенапряжения на изоляции экран-земля, не входящие в перечень испытательных воздействий, могут привести к повреждению этой изоляции и в конечном итоге являться причиной пробоя главной изоляции кабеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis on breakdown of main insulation on middle joint of 220 kV power cable / X. Duan, M. Tang, F. Lin, H. Ye // High Voltage App. – 2009. – vol. 45, no.6. – P. 142-144.
2. Высоковольтные линии с однофазными кабелями / Е.С. Бурлаков, Г.А. Евдокунин, А.С. Карпов, Д.А. Шатилов // Новости Электротехники. – 2016. – №5(101).
3. Дмитриев М.В. Высоковольтные линии с однофазными кабелями // Новости Электротехники. – 2016. – №6(102). – С. 38-41.
4. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. – USA, 1986. <http://www.emtp.org>.
5. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Издательский дом "Родная Ладога", 2016. – 384 с.
6. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. – СПб.: Изд-во "ЗЭУ", 2010. – 152 с.

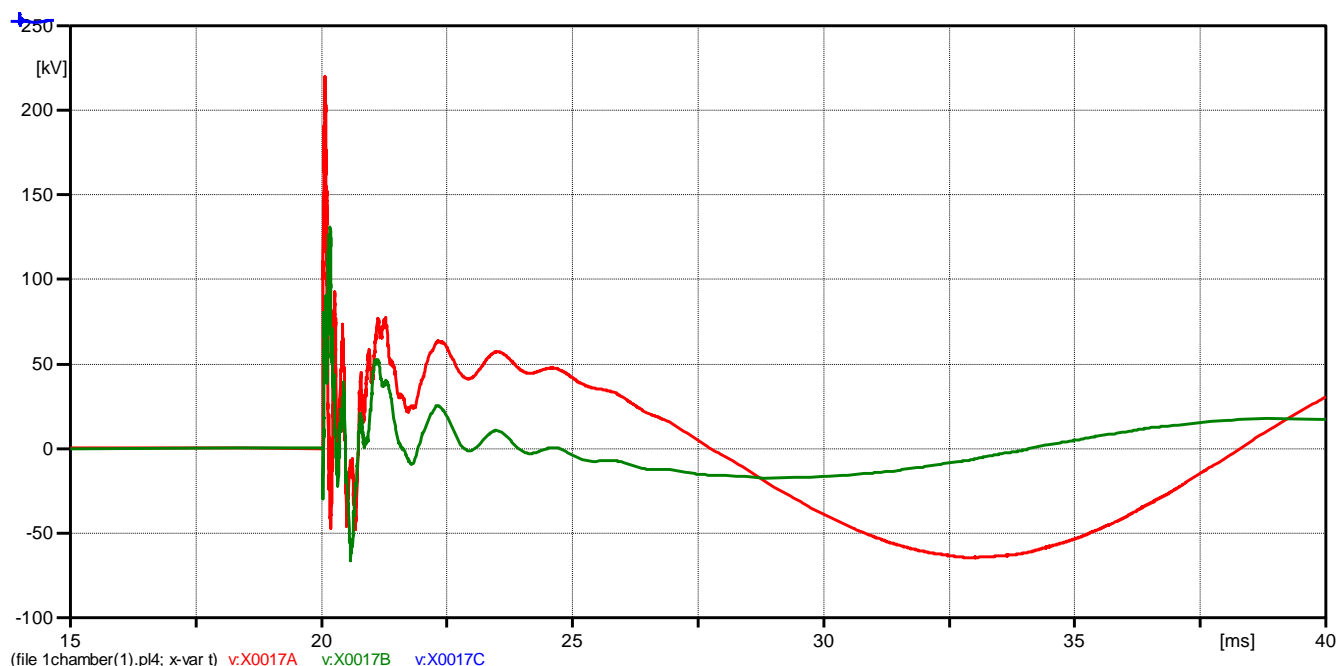


Рис. 5. Перенапряжения в коробке заземления через ОПН №13 при К.З. в точке 1 на фазе А в модели без ОПН

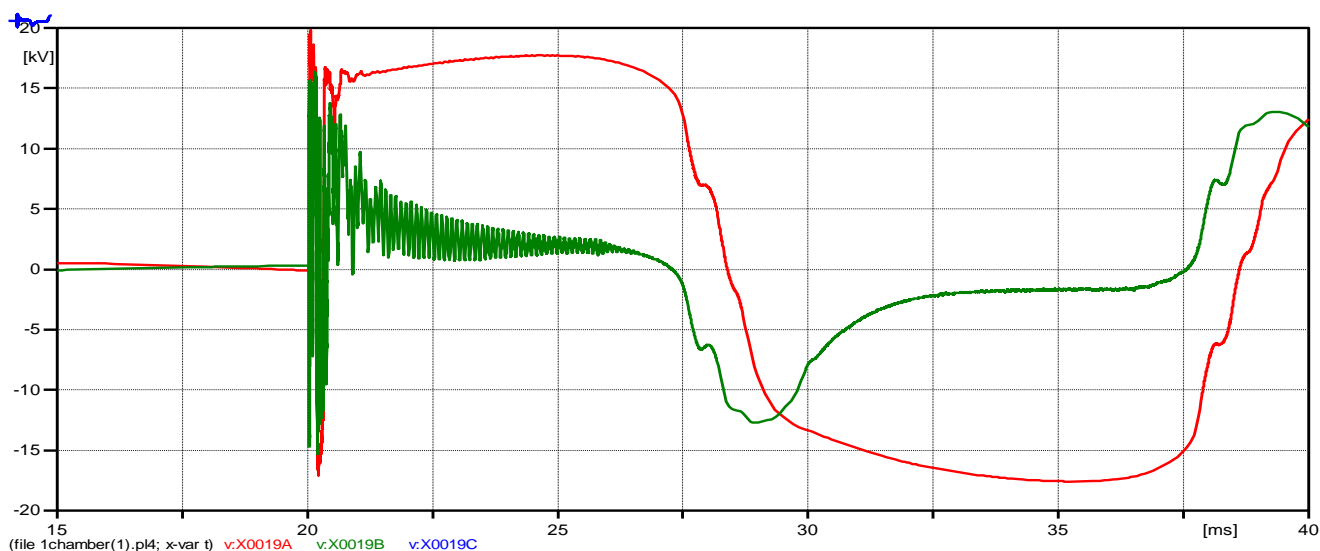


Рис. 6. Перенапряжения в коробке заземления через ОПН №13 при К.З. в точке 1 на фазе А в модели с ОПН

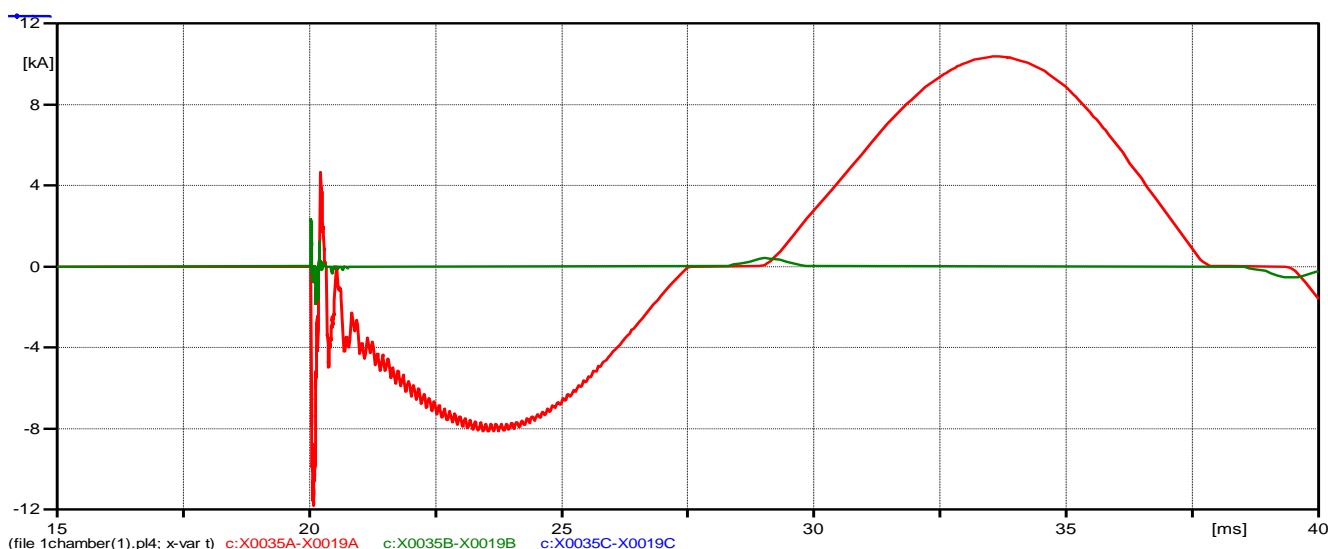


Рис. 7. Токи через ОПН в коробке заземления через ОПН №13 при К.З. в точке 1 на фазе А в модели с ОПН

Transient Processes and Voltage Overloads in Single-Phase High Voltage Cable Lines

Burlakov E., Evdokunin G., Karpov A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Saint Petersburg, Russian Federation
esburlakov@outlook.com

Shatilov D.

Leningrad EMPN
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. High-voltage lines with overhead and cable sections are getting high popularity in nowadays energetics. These transmission lines are normally constructed using a single-phase cables with XLPE insulation. On the other hand an application of this type of cables leads to certain unsolved problems, for instance - a numerous amount of breakdowns at the cable joints. This paper takes as an example the power line of 330kV in the city of Saint-Petersburg, which connects substations Severnaya and Vasileostrovskaya. There were considered three accidents, which led to a

number of breakdowns of cable joints along the entire line. Basing on the simulation results it was proposed, that the accidents were caused by a significant overvoltage at the joints during the short-circuits. Firstly, it concerns high-frequency overvoltage, which cannot be bounded by a surge arrester. Secondly, excessive current flows going through the arrestors.

Keywords: cable line, surge arrester, overloads, cable shielding, cable joint.

REFERENCES

1. Duan X., Tang M., Lin F., Ye H. Analysis on breakdown of main insulation on middle joint of 220 kV power cable, *High Voltage App.*, 2009, vol. 45, no.6, pp. 142-144.
2. Burlakov E.C., Evdokunin G.A., Karpov A.S., Shatilov D.A. High-voltage lines with single-phase cables [Vysokovol'tnye linii s odnofaznymi kabelyami], *Novosti Elektrotehniki [News Electricity]*, 2016, №5(101). (In Russ.)
3. Dmitriev M.V. High-voltage lines with single-phase cables [Vysokovol'tnye linii s odnofaznymi kabelyami], *Novosti Elektrotehniki [News Electricity]*, 2016, №6(102), pp. 38-41. (In Russ.)

4. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering, USA, 1986. <http://www.emtp.org>.

5. Evdokunin G.A. *Vysokovol'tnye linii s odnofaznymi kabelyami* [Electrical systems and networks], Saint Petersburg, Publishing house "Native Ladoga", 2016, 384 p. (In Russ.)

6. Dmitriev M.V. *Zazemlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabeley 6-500 kV* [Grounding shields of single-phase power cables 6-500 kV], Saint Petersburg, Publishing house "ZEU", 2010, 152 p. (In Russ.)

Библиографическое описание статьи

Бурлаков Е. Переходные процессы и перенапряжения в однофазных кабельных линиях высокого напряжения / Е. Бурлаков, Г. Евдокунин, А. Карпов, Шатилов Д. // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2017. – Т.4, №1. – С. 3-9.

Reference to article

Burlakov E., Evdokunin G., Karpov A., Shatilov D. Transient processes and voltage overloads in single-phase high voltage cable lines, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol.4, no.1, pp. 3-9.