

Нормативные документы по кабельным линиям, а также каталоги заводов-изготовителей рассматривают расположение однофазных кабелей 6–500 кВ в ряд и в сомкнутый треугольник как два равноправных способа прокладки, отличающихся друг от друга только величиной длительно допустимого тока жилы.

Вместе с тем при выборе способа расположения фаз следует учитывать и многие другие факторы, о которых в своем материале рассказывает Михаил Викторович Дмитриев.

## ОДНОФАЗНЫЕ КАБЕЛИ КЛ 6–500 кВ

### Выбор взаимного расположения

#### ВВЕДЕНИЕ

Два основных способа взаимного расположения фаз для трехфазной группы однофазных кабелей 6–500 кВ показаны на рис. 1. Хотя нормативные документы и каталоги заводов основное внимание уделяют только длительно допустимому току жилы, следует понимать, что это вовсе не единственный и не главный аргумент при выборе оптимального варианта прокладки фаз. По мнению автора, полный список требующих учета факторов по меньшей мере должен включать в себя следующее:

- величина длительно допустимого тока КЛ;
- стоимость схемы заземления экранов КЛ;
- ширина трассы и культура монтажа КЛ;
- удобство идентификации цепей многоцепных КЛ;
- безопасность проведения работ на многоцепных КЛ;
- степень несимметрии параметров КЛ по фазам;
- величина токов нулевой последовательности в экранах КЛ и в контуре заземления экранов, а также потенциал контура заземления и коррозия его металла;
- величина токов нулевой последовательности в жилах КЛ и ложная работа защит в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью;
- поиск места повреждения кабелей в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью;
- возможность проведения АПВ на кабельно-воздушных линиях 110–500 кВ.

В статье показано, что учет всех перечисленных факторов должен склонять проектировщиков скорее к прокладке фаз сомкнутым треугольником (рис. 1б), нежели к прокладке фаз в ряд (рис. 1а).

#### ДОПУСТИМЫЙ ТОК КЛ И ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ

Длительно допустимый ток КЛ определяется в ходе специальных тепловых расчетов и зависит от потерь активной мощности в фазах КЛ и интенсивности их охлаждения прилегающим грунтом или окружающим воздухом.

При прокладке трех фаз в ряд (рис. 1а) площадь соприкосновения кабелей с охлаждающей средой (грунт или воздух) оказывается больше, чем при прокладке сомкнутым треугольником (рис. 1б). Поэтому может показаться, что для рядного расположения фаз допустимый ток больше, нежели для сомкнутого треугольника. Это действительно было бы так, если бы потери в однофазных кабелях не зависели от расстояния  $S$  между фазами, а они в некоторых случаях всё же зависят.

Потери активной мощности в трехфазной КЛ, выполненной однофазными кабелями, определяются как сумма потерь в жилах и потерь в экранах. Если потери в жилах не зависят от расположения трех фаз (пренебрегаем эффектом близости), то для экранов многое определяется схемой их заземления.

Согласно [1] известны три основные схемы заземления экранов:

- двустороннее заземление (рис. 2а);
- одностороннее заземление (рис. 2б);
- транспозиция экранов (рис. 2в).

При двустороннем заземлении экранов в них возникают потери мощности, обусловленные наведенными с жилы токами промышленной частоты, и эти потери зависят:

- от расстояния между фазами  $S$ ;
- от поперечного сечения экрана  $F_3$ ;
- от материала экрана (Cu, Al, Pb и др.).

В [1] показано, что при двустороннем заземлении экранов потери в экранах существенно возрастают по мере увеличения расстояния  $S$  и сечения  $F_3$ . Поэтому при переходе от прокладки трех фаз КЛ сомкнутым треугольником к прокладке в ряд, хотя охлаждение фаз и улучшается, но потери в фазах не остаются на прежнем уровне, а тоже возрастают. В итоге допустимые токи при прокладке в ряд КЛ с двусторонним заземлением экранов могут оказаться как выше, так и ниже тех, что при прокладке треугольником.

Расчеты, отраженные в частности в каталогах ведущих фирм, показывают, что для КЛ с двусторонним заземлением экранов самый высокий допустимый ток жилы достигается:

- при прокладке в ряд, если у КЛ малое сечение экранов (25, 35 мм<sup>2</sup>);
- при прокладке сомкнутым треугольником, если у КЛ большое сечение экранов (50, 70, 95 мм<sup>2</sup> и т.п.).

Сечение экранов КЛ определяется уровнем токов короткого замыкания сети, и обычно для кабелей 6–35 кВ оно составляет не менее 50 мм<sup>2</sup>, а для кабелей 110–500 кВ – не менее 95 мм<sup>2</sup>. Данные сечения таковы, что при заземлении экранов с двух сторон максимальные допустимые токи КЛ достигаются при прокладке фаз сомкнутым треугольником, а не при рядной прокладке.

Если экраны КЛ имеют одностороннее заземление или транспозицию, то в этом случае потери в экранах отсутствуют, причем вне зависимости от расстояния  $S$  между фазами и сечения экранов  $F_3$ . Тогда наибольшие допустимые токи будут при рядном расположении фаз.

Видно, что прокладка трех фаз КЛ в ряд (рис. 1а) обеспечивает повышенные допустимые токи лишь при некоторых схемах заземления экранов, а именно при одностороннем заземлении (рис. 2б) и при транспозиции экранов (рис. 2в). Однако для КЛ с такими схемами всё же не следует стремиться повысить допустимые токи путем разнесения трех фаз КЛ на большее расстояние друг от друга, поскольку рост расстояния  $S$  между фазами согласно [1] вызывает увеличение наведенного на экраны напряжения  $U_3$  промышленной частоты.

Превышение напряжением  $U_3$  допустимых уровней (100 В для нормального режима и 5–7 кВ при внешних коротких замыканиях) в соответствии с [1] приводит к необходимости увеличивать число  $K$  односторонне заземленных секций или же увеличивать число  $N$  циклов транспозиции экранов, а это существенно усложняет и удорожает строительство КЛ и ее эксплуатацию.

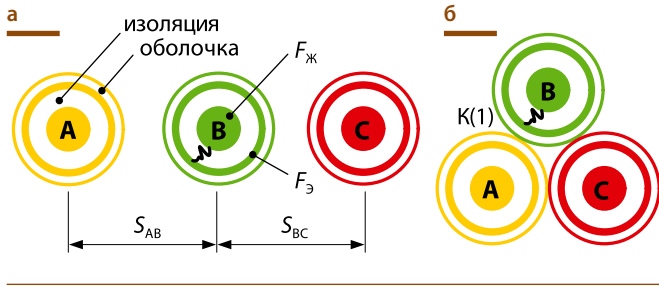
Таким образом, даже для схем соединения экранов вида рис. 2б и рис. 2в всё равно предпочтение следует отдавать именно сомкнутому треугольнику.



**Михаил Дмитриев,**

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

• **Рис. 1** Основные варианты прокладки однофазных кабелей: а – в ряд, б – сомкнутым треугольником



**БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ НА ДВУХЦЕПНЫХ КЛ**

Во многих случаях кабельные линии имеют двухцепное исполнение (рис. 3), что позволяет обеспечить электроснабжение потребителей в условиях, когда одна из цепей отключена с целью ее ремонта или испытаний. Говоря о безопасности КЛ, рассмотрим три следующих вопроса:

- идентификация цепей многоцепных КЛ;
- величина наведенного напряжения;
- конструкция узлов транспозиции экранов.

**Идентификация цепей**

При прокладке фаз двухцепной КЛ в ряд (рис. 3а) известны случаи, когда на поворотах трассы однофазные кабели 1-й цепи и однофазные кабели 2-й цепи перекрещивались друг с другом. В результате этого ремонтный персонал, который выходит на трассу, может неверно идентифицировать фазы отключенной цепи КЛ и попасть под напряжение.

Если фазы каждой цепи КЛ проложены сомкнутым треугольником (рис. 3б), местами соединены хомутами, снабжены идентифицирующими бирками, то вероятность ошибки персонала снижается. Также треугольная прокладка фаз дает возможность несколько снизить ширину трассы.

**Наведенное напряжение**

Для персонала, обслуживающего отключенную цепь КЛ, важной является величина напряжения промышленной частоты 50 Гц, которое будет наведено от расположенной рядом работающей цепи КЛ. Исследования по этой тематике даны в статье [2].

Наличие в конструкции однофазного кабеля заземленного экрана приводит к тому, что за пределами кабеля отсутствует электрическое поле. Магнитное же поле есть и может достигать опасных величин. Снижению магнитного поля помогает то обстоятельство, что совместно прокладываются сразу три однофазных кабеля, их синусоидальные токи равны друг другу по величине и имеют сдвиг 120°. Наиболее хорошо компенсация магнитных полей трех фаз происходит тогда, когда они уложены сомкнутым треугольником.

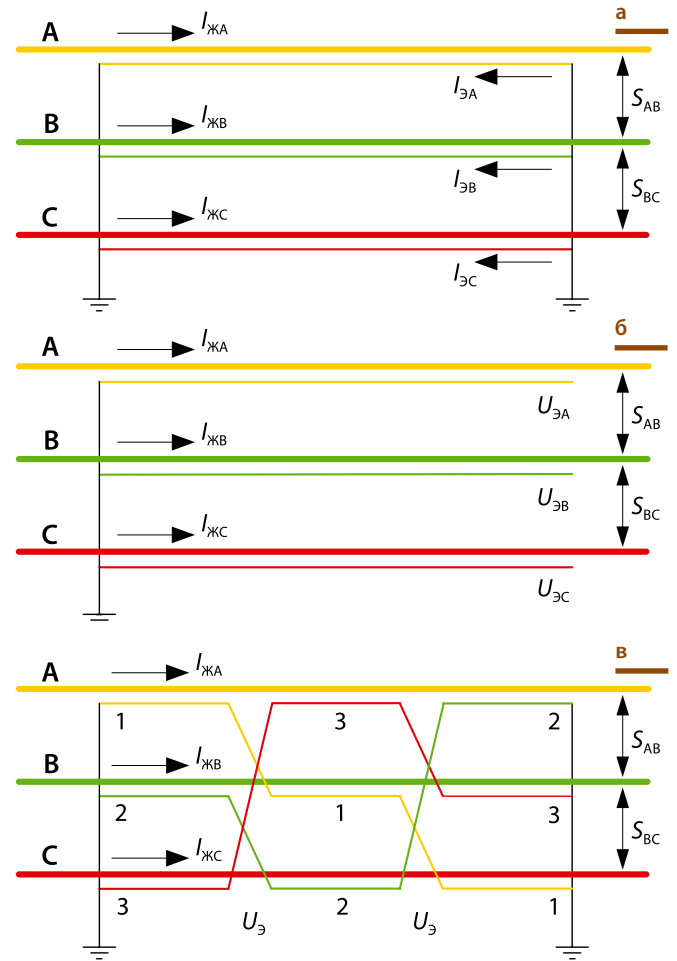
У двухцепных КЛ наличие магнитного поля находящейся под током цепи КЛ приводит к тому, что отключенная цепь оказывается под действием наведенного напряжения промышленной частоты 50 Гц. В качестве примера на рис. 4 показано, что наведенное напряжение возникает на ремонтируемой отключенной цепи КЛ в месте, подготовленном для установки соединительной муфты. Напряжение возникает как на жиле, так и на экране, причем невзирая на то, что на время проведения работ они (и жила, и экран) были заземлены одновременно в обоих концах.

Уровень напряжения, которое может наводиться на отключенную цепь КЛ, заимствован из [2] и показан на рис. 5. Здесь варьируется расстояние между цепями  $S_{12}$ , а также варианты расположения фаз (ряд, сомкнутый треугольник). Наведенное напряжение пропорционально длине КЛ и току жилы работающей цепи (на рис. 5 для удобства напряжение указано на 1000 м и 1000 А).

Например, при прокладке  $S_{AB} = 0,2$  м (кривая № 3) и  $S_{12} = 1$  м имеем наводку 22 В на 1000 м и 1000 А. Если длина КЛ составляет, скажем, 4000 м, а ток в жиле 500 А, то напряжение, действующее на персонал, составит  $22 \cdot (4000/1000) \cdot (500/1000) = 44$  В промышленной частоты.

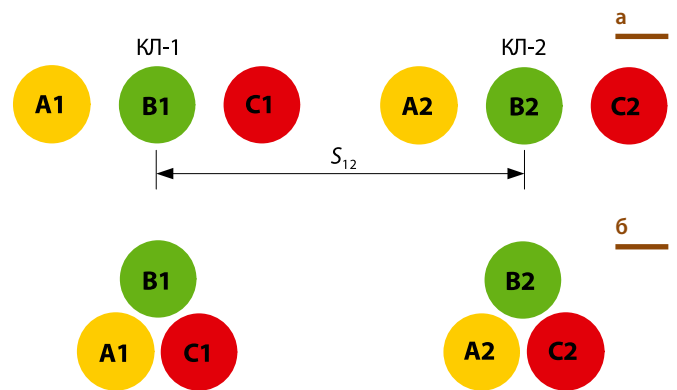
Схемы заземления экранов однофазных кабелей: а – двустороннее, б – одностороннее, в – транспозиция

• **Рис. 2**



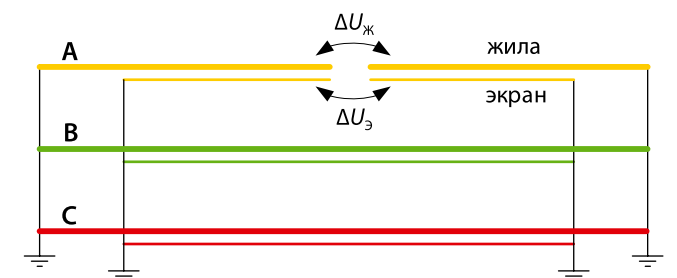
Основные варианты прокладки фаз двухцепной КЛ: а – в ряд, б – сомкнутым треугольником

• **Рис. 3**



Напряжение 50 Гц, наведенное на отключенную цепь двухцепной КЛ и воздействующее на персонал, осуществляющий монтаж соединительной муфты. Жилы и экраны КЛ заземлены на время работ

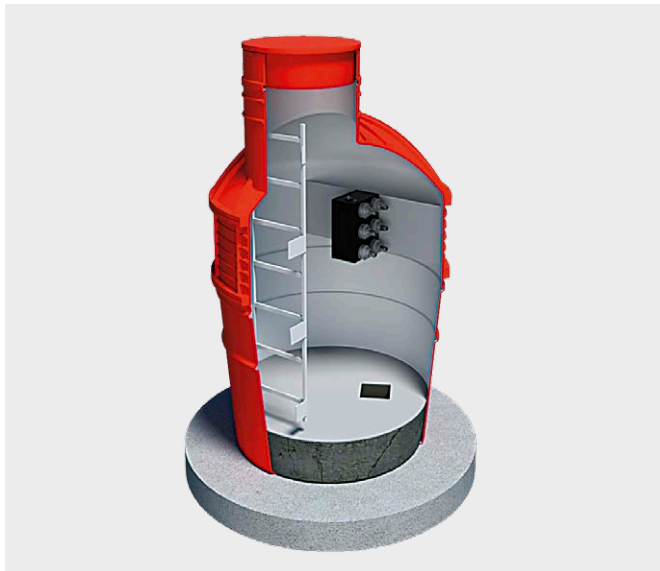
• **Рис. 4**



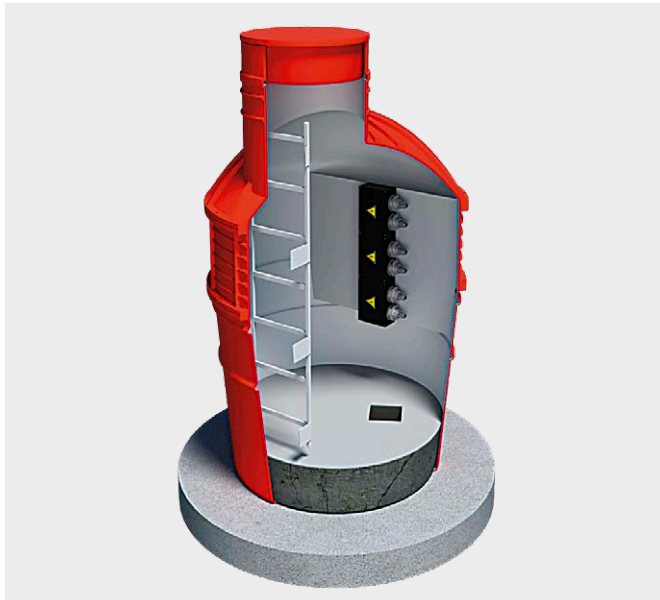
• Фото 1 Транспозиция самих однофазных кабелей



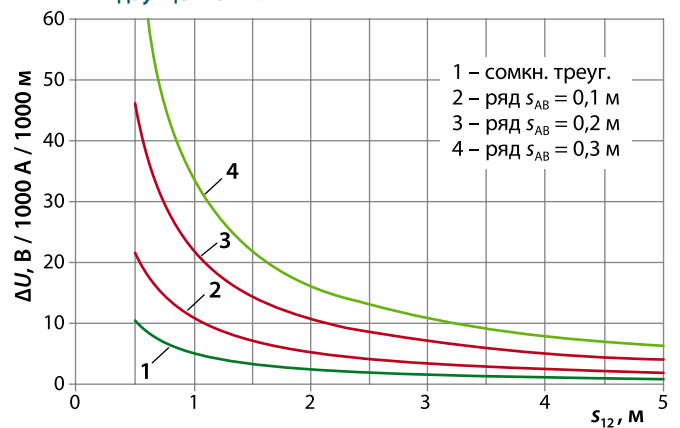
• Фото 2 Полимерный колодец транспозиции экранов с трехфазной пластиковой коробкой



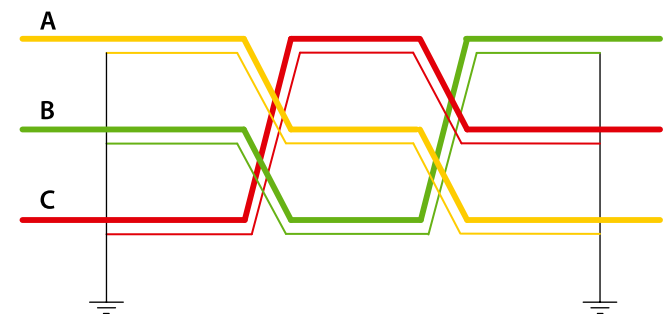
• Фото 3 Полимерный колодец транспозиции экранов с тремя однофазными пластиковыми коробками



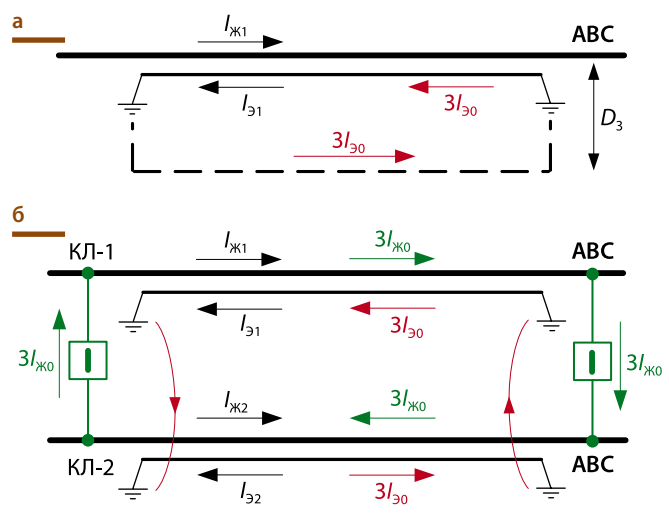
• Рис. 5 Напряжение 50 Гц, наведенное на отключенную цепь двухцепной КЛ



• Рис. 6 Транспозиция однофазных кабелей (на примере двустороннего заземления экранов)



• Рис. 7 Контуры для прохождения токов прямой и нулевой последовательности: а – одноцепная КЛ; б – двухцепная КЛ



Из рис. 5 следует, что ощутимого снижения наведенного напряжения можно достичь, если отказаться от рядной прокладки фаз, а располагать фазы сомкнутым треугольником. На участках, где устанавливаются концевые или соединительные муфты, фазы кабеля приходится разводить на расстояние друг от друга. Этого не стоит бояться, ведь наводки определяются средним расстоянием между фазами по трассе КЛ, а оно, несмотря на муфтовые участки, всё же будет диктоваться тем способом, который доминирует на КЛ, т.е. треугольником.

Если прокладка фаз треугольником вдоль значительной части трассы КЛ по каким-то причинам не представляется возможной, то для снижения наводок на отключенную цепь рекомендуется выполнять решение, называемое транспозицией самих однофазных кабелей. Схема укладки кабелей изображена на рис. 6 (в качестве примера экраны КЛ показаны двусторонне заземленными), а фотография с объекта – на фото 1.

### Конструкция узлов транспозиции экранов

Наведенное напряжение проявляет себя не только при ремонтах на трассе КЛ (монтаж муфт), но и в других ситуациях: например, с ним может столкнуться персонал, обслуживающий узлы транспозиции экранов отключенной цепи КЛ.

Для уменьшения рисков электротравматизма было бы полезно снизить число случаев, когда персонал спускается в колодцы транспозиции и вскрывает коробки транспозиции. Это оказалось возможно за счет оснащения коробок новыми ОПН, которые имеют наибольшее рабочее напряжение 8,2 кВ против распространенных ранее 7,2 кВ. Рост переменного рабочего напряжения ОПН до 8,2 кВ привел к тому, что при периодических испытаниях оболочки КЛ постоянным напряжением 10 кВ, предусмотренных нормативными документами, ОПН сохраняют непроводящее состояние. Иными словами, новые ОПН 8,2 кВ, в отличие от старых ОПН 7,2 кВ, не мешают проверке оболочки, а значит, теперь не требуется вскрытие коробок транспозиции и отключение установленных внутри ОПН. Более того, приложение постоянного напряжения 10 кВ к оболочке КЛ, если в узлах транспозиции стоят неотключенные ОПН 8,2 кВ, позволяет проверить не только саму оболочку КЛ, но и эти ОПН, ведь только исправные ОПН 8,2 кВ будут оставаться в непроводящем состоянии при воздействии постоянного напряжения 10 кВ.

Важно понимать, что незначительное повышение рабочего напряжения ОПН с 7,2 кВ до 8,2 кВ не приведет к ухудшению защищенности оболочек КЛ от перенапряжений, поскольку уровень напряжения на оболочке КЛ (между экраном и землей) определяется главным образом не характеристиками ОПН, а падением напряжения на контуре заземления, которое может достигать нескольких десятков киловольт.

Рекомендации по оснащению коробки транспозиции экранов КЛ 6–500 кВ новыми ОПН 8,2 кВ были приняты осенью 2018 г. на научно-техническом совете в ПАО «Россети» и распространяются на все филиалы, дочерние и зависимые общества (ДЗО) этой крупнейшей в России сетевой компании.

Переход на ОПН 8,2 кВ является важным шагом, однако полностью не может исключить необходимость вскрытия коробок транспозиции. Например, вскрытие коробок может потребоваться при поиске места повреждения оболочки КЛ, если оно было выявлено при испытаниях постоянным напряжением 10 кВ. Поэтому для персонала важно, чтобы спуск в колодец и работа с коробками были максимально безопасными. Для повышения безопасности персонала в последние годы в стране переходят на следующие технические решения:

- использование отдельного колодца транспозиции для каждой из цепей, чтобы персонал, обслуживая коробку отключенной цепи, не мог прикоснуться к коробке транспозиции работающей цепи;
- применение не железобетонных колодцев транспозиции, а диэлектрических полимерных типа ПКЭТ (фото 2, 3);
- применение не металлических коробок транспозиции, а диэлектрических пластиковых типа КТП (трехфазные коробки – фото 2, однофазные – фото 3).

### НЕСИММЕТРИЯ ПАРАМЕТРОВ ФАЗ И ТОКИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Прокладка однофазных кабелей в ряд приводит к тому, что фазы отличаются продольной индуктивностью. Это значит, что на трех фазах КЛ будет разное падение напряжения от тока нагрузки и уровни напряжения на конце КЛ (у потребителя) в трех фазах не будут одинаковы. Кроме описанной несимметрии, возможны и другие ее проявления. В частности, как было показано в статье [3], если фазы КЛ уложены в ряд, а экраны имеют двустороннее заземление (или транспозицию), то в экранах возникают токи нулевой последовательности.

Для одноцепных КЛ токи нулевой последовательности  $I_{\Sigma 0}$  замыкаются через землю (рис. 7а), приводя к коррозии контура заземления, а также к возникновению на нем потенциала промышленной частоты. Для двухцепных КЛ токи замыкаются иначе – они проходят в контуре, образованном экранами одной цепи КЛ и второй цепи КЛ (рис. 7б). Если при этом жилы цепей объединены на параллельную работу (секционные выключатели замкнуты), то ток нулевой последовательности экранов наводит ток нулевой последовательности в жилах  $I_{\Sigma 0}$ , что на некоторых объектах 6–35 кВ уже приводило к ложной работе защит от замыканий на землю.

Минимизировать токи нулевой последовательности в экранах и вызванные ими негативные последствия можно, если фазы цепей КЛ прокладывать не в ряд, а сомкнутым треугольником.

### РИСКИ РАЗВИТИЯ АВАРИИ

Выбор оптимального способа взаимного расположения фаз КЛ определяется в том числе и тем, является ли полезной или нежелательной ситуация, когда авария на одной из фаз распространяется на соседние фазы, изначально неповрежденные.

В сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью 6–35 кВ существует проблема поиска места возникновения в сети однофазного замыкания на землю. Релейная защита, в силу малой величины токов замыкания, не всегда способна определить поврежденный участок сети и вывести его из работы. Прокладка однофазных кабелей сомкнутым треугольником может быть полезна тем, что в этом случае повреждение одной из фаз с течением времени за счет действия дуги и выделяющегося тепла может вызвать в том же месте КЛ повреждение второй и третьей фаз (см. К(1) фазы В на рис. 1б), а это в свою очередь означает переход однофазного замыкания на землю в двухфазное или в трехфазное короткое замыкание, выявить и отключить которое защитам уже не составит труда.

В сетях с заземленной нейтралью 110–500 кВ проблемы поиска места аварии КЛ нет, но есть некоторые сложности с кабельно-воздушными линиями (КВЛ), где приходится налаживать цикл автоматического повторного включения (АПВ). Как показано в статье [4], для КВЛ есть три возможных варианта:

- АПВ всегда разрешено (вне зависимости от того, где было КЗ);
- АПВ всегда запрещено (вне зависимости от того, где было КЗ);
- АПВ селективное (повторное включение КВЛ разрешено, если КЗ случилось на участке ВЛ, и запрещено, если КЗ случилось на участке КЛ).

На КВЛ, где АПВ всегда запрещено или является селективным, повторное включение КВЛ под напряжение при аварии на кабельном участке невозможно, и поэтому не стоит опасаться за кабель. Если же АПВ всегда разрешено, то ситуация иная, ведь даже если КЗ произошло не на воздушном, а на кабельном участке, на КВЛ будет повторно подано напряжение и через место повреждения кабеля снова пройдет ток КЗ, снова возникнет дуга. Чтобы продукты горения дуги не повредили соседние фазы, они должны быть расположены на расстоянии друг от друга, т.е. скорее в ряд, нежели сомкнутым треугольником.

Как видно, в вопросах АПВ взаимное расположение фаз КЛ важно только в одном случае – если АПВ всегда разрешено, и здесь желательно, чтобы фазы КЛ были уложены в ряд (рис. 1а). Как отмечалось в [4], безусловное разрешение АПВ, допускается лишь тогда, когда кабельный участок КВЛ имеет небольшую длину и ремонт КЛ не составляет особого труда. В остальных вариантах исполнения АПВ (когда оно или запрещено, или сделано селективным) взаимное расположение фаз КЛ не имеет значения и, следовательно, можно прокладывать фазы сомкнутым треугольником.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимное расположение однофазных кабелей определяется отнюдь не только необходимостью достижения того или иного длительно допустимого тока КЛ. Есть целый перечень факторов, рассмотренных в статье, которые следует принимать во внимание при выборе расположения фаз. Анализ этих факторов приводит автора статьи к мнению, что в большинстве случаев целесообразно отдавать предпочтение прокладке однофазных кабелей сомкнутым треугольником.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 152 с.
2. Дмитриев М.В. Напряжения, наведенные на кабельные линии 6–500 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2017. № 6(45). С. 86–91.
3. Дмитриев М.В. Ложная работа защит на линиях 6–35 кВ с однофазными кабелями // Новости Электротехники. 2016. № 3(99). С. 38–41.
4. Дмитриев М.В. Кабельно-воздушные линии. Цикл АПВ и коммутационные перенапряжения // Новости Электротехники. 2017. № 5(107)–№ 6(108). С. 80–84. ■