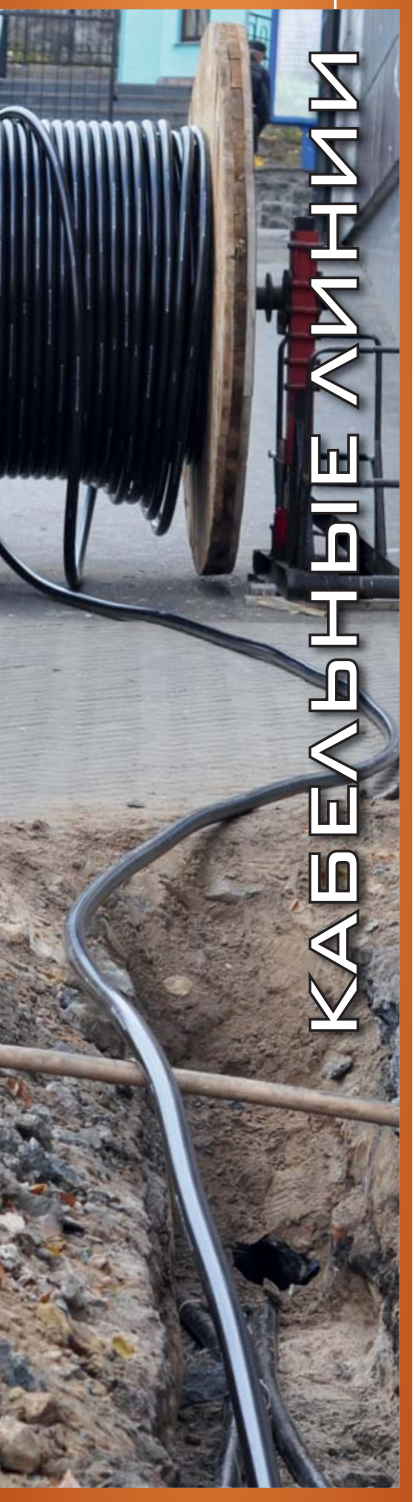


Выбор взаимного расположения кабелей 6–35 кВ

УДК 621.315.21

Настоящее и будущее энергетики страны невозможно без массового применения силовых кабелей среднего напряжения 6–35 кВ. Несмотря на высокое качество кабелей, выпускаемых промышленностью, сетевые компании и собственники электрических сетей, к сожалению, зачастую терпят значительный экономический ущерб, связанный с неверным выбором типа и сечения кабелей 6–35 кВ, а также неоптимальным выбором взаимного расположения соседних фаз. Рассмотрим некоторые из этих вопросов.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

В сетях среднего напряжения происходит постепенное вытеснение кабелей старого типа (с бумажно-пропитанной изоляцией) на современные кабели с твердой изоляцией, выполненной из сшитого полиэтилена (СПЭ) или этиленпропиленовой резины (ЭПР). Среди таких кабелей с твердой изоляцией встречаются:

– однофазные (одножильные) кабели (рисунок 1);
– трехфазные (трехжильные) кабели.

Однофазные кабели, пожалуй, получают наибольшее распространение, поскольку они обладают рядом преимуществ по сравнению с трехфазными:

– сечение жилы до 2500 мм^2 (у трехфазных — до 300 мм^2);
– любой класс напряжения до 500 кВ (у трехфазных — до 20 кВ и, в ряде случаев до 35 кВ);
– сниженный наружный радиус кабеля, а значит, меньше радиус изгиба и больше гибкость;
– сниженный вес, а значит, увеличенная строительная длина (до 1 км и более);
– удобный монтаж и ремонт.

Одним из немногих недостатков однофазных кабелей является наличие в экранах в нормальном режиме работы наведенных продольных переменных токов частоты 50 Гц и связанных с ними потерь активной мощности. Указанные токи и вызванные ими потери нагревают экраны по всей длине кабельной линии (КЛ), и, следовательно, приводят:

– к необходимости ежегодной оплаты этих потерь;
– к нагреву изоляции кабелей и поэтому к снижению допустимого тока жилы КЛ.

Ключевые слова:
однофазный кабель, сшитый полиэтилен, заземление экранов, сомкнутый треугольник, наведенный ток, потери мощности, температура кабеля

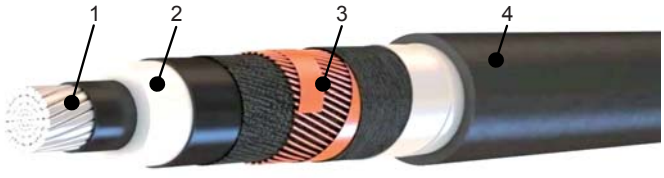


Рис. 1. Конструкция однофазного кабеля (1 — жила, 2 — твердая изоляция, 3 — экран, 4 — наружная оболочка)

Токи и потери в экранах возникают при двустороннем заземлении экранов кабелей (рисунок 2), и для их ограничения известны альтернативные схемы экранов [1–3]:

– одностороннее заземление экранов;
– транспозиция экранов.

Проблема токов и потерь в экранах связана с переменным магнитным полем тока жилы однофазных кабелей, и она не зависит от класса напряжения КЛ. Поэтому выбор схемы заземления экранов одинаково важен и для КЛ 6–35 кВ, и для 110–500 кВ. Несмотря на это, сетевые компании и собственники КЛ готовы заниматься оптимизацией схем заземления экранов прежде всего в сетях высокого напряжения 110–500 кВ, а для сетей среднего напряжения 6–35 кВ предпочитают иметь двустороннее заземление.

Отчасти такому положению дел способствует и тот факт, что имеющийся в нашей стране единственный стандарт по заземлению экранов кабелей [2] имеет в своем названии указание только на классы 110–500 кВ, создавая ложное впечатление, что для КЛ среднего напряжения 6–35 кВ проблема токов и потерь в экранах якобы не актуальна.

Причина наличия в названии стандарта [2] только классов 110–500 кВ, а не всех от 6 кВ до 500 кВ, заключается в том, что разработчик стандарта (компания ПАО «ФСК ЕЭС») исторически занималась преимущественно сетями высокого напряжения и старалась «не лезть» в сети среднего напряжения, за которые в те годы отвечал «Холдинг МРСК».

Сложившаяся в стране практика, по которой в сетях среднего напряжения 6–35 кВ практически все однофазные кабели без проведения расчетов и обоснования получают двустороннее заземление экранов, является не оптимальной и даже опасной. Хуже всего ситуация складывается в тех случаях, в которых однофазные кабели трех фаз А, В, С оказываются расположены не сомкнутым треугольником, а в ряд на расстоянии друг от друга. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ФАЗАМИ — КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР

Основные варианты взаимного расположения трех однофазных кабелей фаз А, В, С, каждый из которых имеет наружный диаметр d, показаны на рисунке 3 и отличаются друг от друга средним расстоянием s между центрами фаз А, В, С:

– для рисунка 3а расстояние $s = \sqrt[3]{s_{AB} \cdot s_{BC} \cdot s_{AC}} = d$;
– для рисунка 3б расстояние $s = \sqrt[3]{s_{AB} \cdot s_{BC} \cdot s_{AC}} = 1{,}26 \cdot d$;
– для рисунка 3в расстояние $s = \sqrt[3]{s_{AB} \cdot s_{BC} \cdot s_{AC}} = 1,26 \cdot s_{AB}$.

Предположим, что при проектировании или прокладке КЛ расстояние s по каким-то причинам было увеличено в два раза. Если расстояние s выросло 2 раза, то можно дать следующую приблизительную оценку последствий:

– в 2 раза возрастет площадь контуров «экран-экран», показанных на рисунке 2;
– в 2 раза возрастет переменное напряжение $U_Э$ частоты 50 Гц, наведенное в контурах за счет действия магнитного поля рабочих токов жил КЛ;

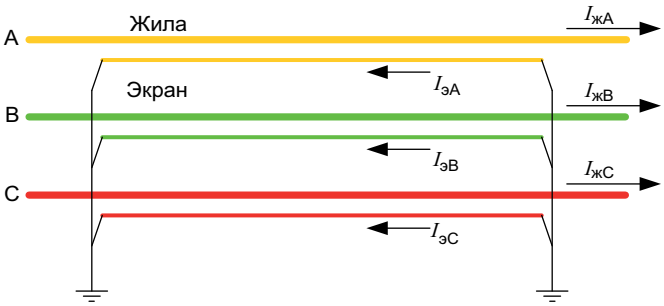


Рис. 2. Двустороннее заземление экранов кабелей

– в 2 раза возрастет наведенный ток $I_Э$ в экранах (ток определяется напряжением $U_Э$ и полным активно-индуктивным сопротивлением экранного контура $Z_Э$, зависящим, в том числе, от сечения экрана $F_Э$ и материала его проволок: Cu или Al);
– в 4 раза возрастут потери активной мощности в экранах $P_Э = I_Э^2 \cdot R_Э$, определяемые квадратом тока экрана $I_Э$ и активным сопротивлением экрана $R_Э$.

Итак, видно, что даже незначительное увеличение расстояния между однофазными кабелями фаз А, В, С может вызвать существенное повышение потерь активной мощности в экранах кабеля. Например, известны КЛ с однофазными кабелями, у которых прокладка кабелей фаз А, В, С в ряд привела к тому, что потери мощности в экранах $P_Э$ кабелей стали близки потерям в жилах $P_Ж$ или даже превосходили последние, причем в несколько раз. В частности, автору известны несколько КЛ 6–35 кВ с двусторонним заземлением экранов, у которых соотношение потерь в экранах и жилах достигало $P_Э/P_Ж = 2 \div 3$, то есть потери мощности в экранах были до 2–3 раз больше потерь мощности в жилах. Это значит:

– основным источником нагрева изоляции кабеля является вовсе не жила, на которой обычно со-

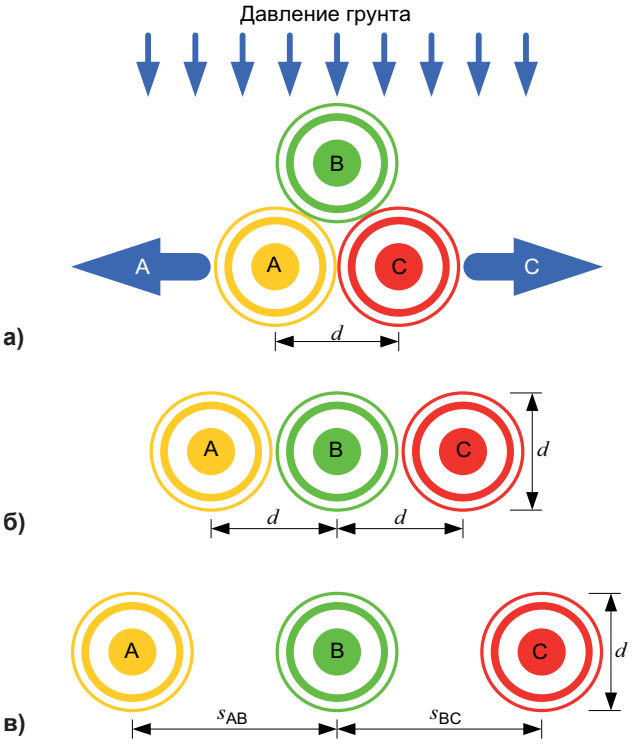


Рис. 3. Взаимное расположение трех однофазных кабелей: а) сомкнутый треугольник; б) деформированный треугольник; в) ряд/плоскость

средоточено основное внимание проектировщиков, а экран, выполняющий в конструкции кабеля весьма вспомогательную функцию;
– стоимость потерь в экранах КЛ может составлять сотни тысяч рублей ежегодно, что невозможно не учитывать.

Опыт расчетов по методикам [1–3], подтверждаемый также и опытом эксплуатации, показывает, что опасность токов и потерь мощности в экранах возрастает, если три фазы:
– расположены в ряд на расстоянии друг от друга;
– имеют повышенное сечение экранов, $F_Э \geq 50$ мм^2.

В указанных случаях использовать двустороннее заземление экранов однофазных кабелей КЛ не только не рекомендуется, но даже опасно, что будет дополнительно показано далее в серии примеров. Сказанное, в частности, означает, что если для КЛ хотят применить двустороннее заземление экранов, то однофазные кабели такой КЛ ни в коем случае нельзя прокладывать на расстоянии друг от друга, и единственный безопасный вариант их взаимного расположения — это сомкнутый треугольник (рисунок 3а).

Если по каким-то причинам прокладка однофазных кабелей фаз А, В, С сомкнутым треугольником выполнена не будет, то для такой КЛ следует отказаться от двустороннего заземления экранов и применять вместо него одну из альтернативных схем:
– одностороннее заземление (для коротких КЛ);
– транспозицию экранов (для протяженных КЛ).

Как правило, в сетях среднего напряжения классов 6–35 кВ специалисты не желают связываться с выбором оптимальной схемы заземления экранов однофазных кабелей (двустороннее, одностороннее, транспозиция) и хотят иметь простое заземление экранов с двух сторон КЛ. Это означает, что для таких КЛ 6–35 кВ без вариантов приходится идти на укладку однофазных кабелей сомкнутым треугольником (рисунок 3а).

СЕЧЕНИЕ ЭКРАНОВ — КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР

Кабели среднего напряжения, обычно имеющие двустороннее заземление экранов, должны прокладываться сомкнутым треугольником. Отказ от прокладки треугольником приведет к повышению токов/потерь в экранах настолько, что они могут превратиться из второстепенного в основной источник нагрева изоляции кабелей, тем самым произойдет не только ограничение допустимого тока жилы КЛ, но также и возникнет необходимость тратить ежегодно сотни тысяч рублей на оплату таких потерь в экранах (стоимость потерь пропорциональна длине КЛ).

Соотношение $P_Э/P_Ж$ и стоимость потерь в экранах зависят не только от расстояния между фазами А, В, С, но также и от сечения экрана кабеля. Ранее утверждалось, что чем больше сечение экрана, тем больше будут потери в экранах и их стоимость, однако такое утверждение, на первый взгляд, кажется ошибочным, ведь известно, что увеличение сечения проводника обычно вызывает снижение его нагрева и потерь, а не увеличение. Разъясним это, для чего дадим весьма приблизительные оценки эффектов, достигаемых в случае увеличения сечений жилы $F_Ж$ и экрана $F_Э$.

Предположим, что мы увеличили сечение жилы $F_Ж$ в 2 раза. Тогда:
– в 2 раза снизится активное сопротивление жилы, поскольку $R_Ж \sim 1/F_Ж$;
– не изменится ток в жиле $I_Ж$, определяемый нагрузкой на КЛ;
– в 2 раза *снизятся* потери мощности в жиле, поскольку $P_Ж = I_Ж^2 \cdot R_Ж$.

Предположим, что мы увеличили сечение экрана $F_Э$ в 2 раза. Тогда:
– в 2 раза снизится активное сопротивление экрана, поскольку $R_Э \sim 1/F_Э$;
– не изменится напряжение $U_Э$, наведенное на экраны и определяемое током жилы $I_Ж$;
– в 2 раза увеличится наведенный ток в экране, поскольку $I_Э \sim U_Э/R_Э$;
– в 2 раза *увеличатся* потери мощности в экране $P_Э = I_Э^2 \cdot R_Э$ (хотя сопротивление $R_Э$ снизилось в 2 раза, но ток в экране $I_Э$ при этом увеличился в 2 раза, и он в квадрате).

Итак, у однофазных кабелей КЛ для снижения суммарных потерь $P_{СУМ} = P_Ж + P_Э$, существующих в жилах и экранах в нормальном режиме работы, рекомендуется:
– повышать сечение жилы $F_Ж$;
– *снижать* сечение экрана $F_Э$ (именно снижать, и это не ошибка).

Таким образом, действительно, чем больше сечение $F_Э$ экрана однофазных кабелей, тем значительнее будут проблемы токов и потерь в экранах, связанные с их заземлением с двух сторон. Тут возникает известное противоречие при выборе сечения экрана:
– с точки зрения нормального режима, нужны кабели минимального сечения экрана $F_Э$ (скажем, 16 или 25 мм^2);
– с точки зрения аварийного режима (КЗ в кабеле) нужны кабели с тем сечением экрана, которое способно выдержать (без опасного перегрева изоляции кабелей) прохождение по экранам тока КЗ с учетом времени отключения КЗ защитой; выбранное для этого сечение экрана $F_Э$ может достигать значений 150 мм^2 и более.

Отметим: известен один случай, когда аварийный режим (КЗ в кабеле) не вызывает потребности повышать сечение экрана сверх минимальных значений – это сети среднего напряжения 6–35 кВ с нейтралью, заземленной через низкоомное сопротивление [3]. Такой режим нейтрали обеспечивает активный ток в месте повреждения на уровне до 1000 А, что еще не представляет опасности с точки значения нагрева экрана сечением 16–25 мм^2, но уже достаточно для быстрого селективного отключения поврежденной КЛ от сети действием защиты. Поэтому в сетях 6–35 кВ, имеющих низкоомное заземление нейтрали, по причине малого сечения экранов отступление от правила прокладывать однофазные кабели сомкнутым треугольником не дает опасных последствий.

ПРИМЕР 1 — СТОИМОСТЬ ПОТЕРЬ

Приведем пример, показывающий, к каким последствиям приведет прокладка трех фаз А, В, С не сомкнутым треугольником, а в ряд. Расчеты приведем для КЛ 10 кВ, которая выполнена тремя одно-

Табл. 1. Пример расчета токов/потерь в экранах для типовой КЛ 10 кВ длиной 5 км

Характеристики КЛ в нормальном режиме		Пункт [3]	Взаимное расположение кабелей А, В, С	
			Сомкн. треугольник ($s_{АВ} = d$ = 44,1 мм)	В плоскости ($s_{АВ}$ = 100 мм)
Наведенный ток 50 Гц в каждом экране	$I_Э$	3.3.4	22,7 А	44,6 А
Потери мощности в каждом экране	$P_Э$	3.4.1	1,47 кВт	5,68 кВт
Потери мощности в экранах трех фаз	$3P_Э$		4,41 кВт	17,02 кВт
Годовые потери энергии (8760 часов) в экранах трех фаз	$W_Г$	3.4.3	38 700 кВт·час	149 000 кВт·час
Годовая стоимость потерь энергии в экранах трех фаз	$C_Г$		154 800 рублей*	596 000 рублей*
Стоимость за 30 лет	$30C_Г$		4,64 млн рублей	17,9 млн рублей

* *стоимость потерь электроэнергии принята равной 4 рубля за 1 кВт·ч*

фазными кабелями с алюминиевой жилой сечением $F_Ж$ = 500 мм² и медным экраном сечением $F_Э$ = 35 мм². Рассматриваемая КЛ имеет длину 5 км, экраны заземлены с двух сторон, наружный диаметр кабеля согласно каталогу d = 44,1 мм, ток в жиле 250 А. Результаты расчета величин, характеризующих процессы в экранах КЛ, представлены в таблице 1, полученной по методике [3].

Сравнение двух последних столбцов таблицы 1 показывает, что прокладка трех фаз КЛ в ряд (вместо сомкнутого треугольника) привела к двухкратному росту наведенного тока экранов (с 22 А до 44 А). Как следствие, произошло увеличение в 4 раза:
- потерь мощности в экранах;
- потерь энергии в экранах (с 38,7 кВт·ч до 149 кВт·ч, то есть приблизительно на 110 кВт·ч ежегодно);
- стоимости потерь энергии в экранах (за срок службы КЛ: с 4,64 до 17,9 млн рублей, то есть приблизительно на 13 млн рублей).

Приведенные тут последствия отказа от прокладки КЛ сомкнутым треугольником являются весьма серьезными и еще раз показывают — если КЛ имеет заземление экранов с двух сторон, то ее прокладка в ряд не допускается! Этот вывод только усилится, если помимо процессов в экранах рассмотреть еще и вопросы нагрева изоляции кабелей.

ПРИМЕР 2 — ТЕМПЕРАТУРА КАБЕЛЕЙ

Суммарные потери в однофазном кабеле представляют собой сумму потерь в жиле и потерь в экране $P_{СУМ} = P_Ж + P_Э$. Если КЛ имеет двустороннее заземление экранов, то при увеличении расстояния между фазами потери в жиле не изменяются, тогда как потери в экране существенно возрастают, тем самым увеличивая и суммарные потери $P_{СУМ}$.

Таким образом, при увеличении расстояния между фазами (при замене сомкнутого треугольника на прокладку в ряд) одновременно происходят два процесса:
- увеличение суммарных потерь $P_{СУМ}$ (на сколько — зависит от сечения экрана $F_Э$);
- улучшение условий охлаждения кабелей.

Оба процесса следует учитывать при проведении теплового расчета КЛ, который позволяет найти допустимый ток жилы КЛ в нормальном режиме работы, то есть ток жилы, при котором температура жилы и примыкающей к ней изоляции (СПЭ или ЭПР) окажется равна предельно допустимому значению, составляющему 90°С. Без проведения расчетов сложно заранее однозначно утверждать, а приведет ли увеличение расстояния между фазами КЛ к росту допустимого тока жилы КЛ или же к его снижению. Однако накопленный опыт расчетов показывает, что при сечениях экрана $F_Э \geq 35$ мм² допустимый ток КЛ вероятнее всего снизится.

Итак, можно утверждать, что для КЛ среднего напряжения 6–35 кВ (именно для них характерно двустороннее заземление экранов) замена сомкнутого треугольника на ряд не только в разы повышает потери в экранах и их стоимость (было показано в примере 1), но и снижает допустимый ток КЛ, создавая риски перегрева изоляции кабелей и даже их повреждения вдоль всей трассы линии (покажем это, рассмотрев случай, представленный на рисунке 4).

Предположим, что КЛ имеет три однофазных кабеля на каждую из трех фаз А, В, С, как это порой встречается в сетях среднего напряжения 6–35 кВ. На практике возникает вопрос, а каким из двух вариантов лучше разместить однофазные кабели при условии характерного для сетей 6–35 кВ двустороннего заземления экранов:
- вариант рисунка 4а;
- вариант рисунка 4б.

Ранее в статье пояснялось, что разноименные фазы (А, В, С) в сетях 6–35 кВ следует размещать сомкнутым треугольником, и следовательно, предпочтителен вариант рисунка 4а. К сожалению, на практике можно встретить вариант рисунка 4б, и на рисунке 5 представлено фото последствия подобного неудачного технического решения.

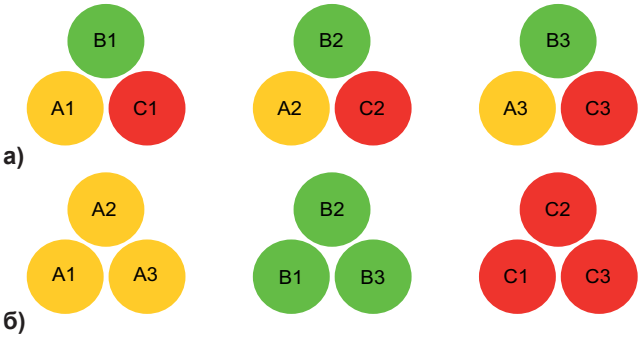


Рис. 4. Взаимное расположение КЛ, имеющих три кабеля на фазу: а) треугольник из кабелей разных фаз; б) треугольник из кабелей одной фазы



Рис 5. Последствия неверного выбора взаимного расположения кабелей



Рис. 6. Прокладка однофазных кабелей сомкнутым треугольником: а) скрепление кабелей хомутами; б) сплетение кабелей

На рисунке 5 показана КЛ 35 кВ, выполненная тремя однофазными кабелями на фазу, причем экраны кабелей двусторонне заземлены. Каждый однофазный кабель имел жилу из меди сечением $F_Ж$ = 400 мм^2 и экран из меди сечением $F_Э$ = 35 мм^2. Поскольку кабели были расположены неоптимально (вариант рисунка 4б), а процессы в экранах в проекте КЛ никак не учитывались, то на практике рассматриваемая КЛ 35 кВ оказалась значительно перегрета, и по сути загорелась. Развитие пожара было ограничено лишь тем, что:

– кабели снаружи были покрыты огнеупорным составом (бело-серого цвета);
– трубы изнутри имели слой, стойкий к воздействию открытого пламени;
– персонал вовремя заметил ситуацию и отключил КЛ.

СПОСОБЫ СОХРАНИТЬ СОМКНУТЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК

Примеры 1 и 2 показывают, как важно для КЛ среднего напряжения 6–35 кВ, имеющих обычно двустороннее заземление экранов, прокладывать разноименные фазы А, В, С вплотную друг к другу сомкнутым треугольником. К сожалению, на практике это не всегда удается, и одна из причин заключается в том, что кабели, уложенные в траншее сомкнутым треугольником, не были перед засыпкой траншеи скреплены хомутами.

На рисунке 3а кабели уложены сомкнутым треугольником, но при обратной засыпке траншеи может получиться, что под действием веса грунта верхняя фаза опустится между нижними (рисунок 3б), и тогда кабели окажутся расположены в виде «деформированного треугольника», то есть, по сути, станут расположены в ряд, чего ни в коем случае допускать не следует. Поэтому однофазные кабели 6–35 кВ перед их засыпкой следует скреплять стяжками, как это показано на рисунке 6а.

Если скрепление однофазных кабелей в треугольник кажется обременительным, то известно альтернативное решение — заказать сплетение кабелей в треугольник в условиях завода изготовителя, например, как это показано на рисунке 6б. Три сплетенных (свитых) вместе однофазных кабеля известны как Triplex, и находят свое применение только для тех КЛ, которые имеют сечение жилы, как правило, всего до 150 мм^2, так как иначе Triplex получается излишне массивным, неудобным для транспортировки и монтажа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, в сетях среднего напряжения 6–35 кВ экраны однофазных кабелей зачастую имеют двустороннее заземление, а одностороннее заземление и транспозиция почти не применяются. Это обстоятельство приводит к тому, что на практике приходится прокладывать однофазные кабели фаз А, В, С исключительно сомкнутым треугольником. Отказ от прокладки сомкнутым треугольником способен вызвать значительный ущерб.

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. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Изд-во Политех-ПРЕСС, 2021. 688 с. / Dmitriev M.V. High voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech-PRESS, 2021, 688 p.

REFERENCES

1. Dmitriev M.V. Bonding and grounding of power cable screens. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2010. 154 p.
2. STO 56947007-29.060.20.103-2011. Power cables. Calculation methods of bonding and grounding of 110-500 kV power cable screens, and surge protection of XLPE insulation. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200088441
3. Dmitriev M.V. High voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech PRESS Publishing House, 2021. 688 p.