

В последние годы всё активнее используются проекты кабельных линий с однофазными кабелями, где для борьбы с паразитными токами в экранах применяется транспозиция экранов.

Одновременно растет и число вопросов, которые требуют разъяснения. Наши петербургские авторы в своем материале дают ответы на некоторые из них.

ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ 6–500 кВ

Практические аспекты использования



Михаил Дмитриев,
к.т.н., начальник
отдела НТИ,
ЗАО «Завод
энергозащитных
устройств»



Маргарита Кияткина,
аспирант
СПбГПУ

г. Санкт-Петербург

В настоящее время подавляющее большинство кабельных линий 6–35 кВ и все кабельные линии 110–500 кВ выполняются однофазными кабелями, имеющими медные экраны. Основными схемами соединения и заземления экранов являются [1]:

- заземление экранов с двух сторон;
- заземление экранов с одной стороны;
- транспозиция экранов (один или несколько полных циклов).

Первая схема является самой простой, но зачастую не применяется из-за наведенных в экранах продольных токов промышленной частоты, создающих активные потери мощности в экранах, нагревающих кабель, снижающих его пропускную способность, требующих оплаты.

Для борьбы с токами и потерями в экранах одинаково эффективны заземление экранов с одной стороны и транспозиция экранов. Однако по условиям ограничения наводимого на экраны напряжения промышленной частоты, пропорционального длине кабеля, одностороннее заземление годится лишь для коротких кабелей (длиной до нескольких сотен метров), а в остальных случаях следует применять транспозицию экранов – один или несколько полных циклов транспозиции.

Необходимость увеличения числа циклов транспозиции сверх одного полного следует обосновывать расчетами напряжения на экране относительно земли в узлах транспозиции [1]: чем длиннее кабель и выше токи короткого замыкания (КЗ) сети, тем больше полных циклов требуется, но, как правило, достаточно одного-двух.

На рис. 1 в качестве примера показан один полный цикл транспозиции экранов однофазных кабелей. ОПН, устанавливаемые в узлах транспозиции для защиты оболочки кабеля от импульсных перенапряжений, условно не показаны. На практике соединение экранов друг с другом и размещение ОПН осуществляются в специальных металлических герметичных электромонтажных коробках – коробках транспозиции, расположенных в колодцах транспозиции.

В статье высказано мнение авторов по ряду вопросов, которые возникают в случае применения транспозиции экранов:

1. Эффективность в случае разной длины участков кабельной линии (рис. 1).
2. Эффективность в случае различающегося вдоль трассы способа прокладки фаз кабеля (например, на части трассы

сомкнутый треугольник, а на другой части – расположение в ряд, рис. 2).

3. Оптимальная схема соединения экранов в местах сопряжения соседних циклов транспозиции (рис. 3).

ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ С ДВУХ СТОРОН

Экономический ущерб от существования потерь в экранах можно оценить [1]:

- по степени использования пропускной способности кабеля $K_{\text{П}}$;
- по годовой стоимости потерь мощности в экранах кабеля $C_{\text{Э}}$ (в [1] – $C_{\text{Год}}$).

Степень использования пропускной способности кабеля и стоимость потерь в экранах удобно определять через величину $P_{\text{Э}}/P_{\text{Ж}}$ – отношение потерь мощности в экране к потерям мощности в жиле. При простом двустороннем заземлении экранов отношение $P_{\text{Э}}/P_{\text{Ж}}$ обозначим как $D_{\text{Р}}$. Соотношение потерь мощности [1]:

$$D_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{Э}}/R_{\text{Ж}}}{1 + \left(\frac{R_{\text{Э}}}{X}\right)^2} \quad (1)$$

где $R_{\text{Э}} = L_{\text{К}} \cdot \frac{\rho_{\text{Э}}}{F_{\text{Э}}}$ и $R_{\text{Ж}} = L_{\text{К}} \cdot \frac{\rho_{\text{Ж}}}{F_{\text{Ж}}}$ – активное сопротивление экрана и жилы, Ом;

$L_{\text{К}}$ – длина кабеля, м;

$\rho_{\text{Э}}$ и $\rho_{\text{Ж}}$ – удельное сопротивление экрана и жилы (для алюминия $\rho = 3,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, для меди $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м);

$F_{\text{Э}}$ и $F_{\text{Ж}}$ – поперечное сечение экрана и жилы, м²;

$X = \omega L_{\text{К}} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{d_{\text{Э}}}\right)$ – индуктивное сопротивление экрана, Ом;

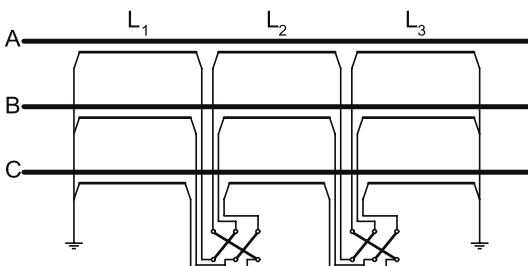
$d_{\text{Э}} = d - 2d_{\text{ОБ}}$ – диаметр экрана кабеля, м;

d – внешний диаметр фазы кабеля, м;

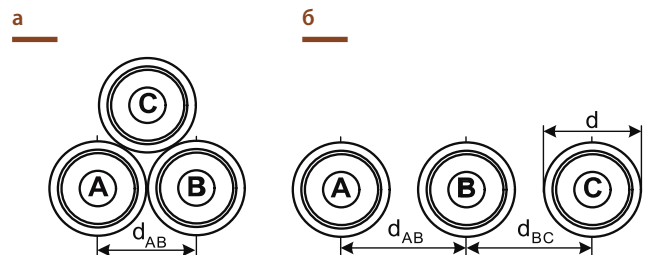
$d_{\text{ОБ}}$ – толщина оболочки кабеля (обычно $d_{\text{ОБ}} = 0,006$ м);

s – среднее расстояние между осями трех фаз кабеля (для сомкнутого треугольника $s = d_{\text{АВ}} = d$, в случае прокладки в ряд $s = 1,26 \cdot d_{\text{АВ}}$);

• Рис. 1. Один полный цикл транспозиции экранов однофазных кабелей



• Рис. 2. Основные способы прокладки однофазных кабелей: а – в треугольник; б – в ряд



d_{AB} – расстояние между осями соседних фаз кабеля, м;
 $\omega = 2\pi f$ рад/с; $f = 50$ Гц; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

На практике при простом заземлении экранов с двух сторон кабеля значение D_p как правило, лежит в диапазоне $0,1 < D_p < 3$. Причем минимальные значения D_p (и потери в экранах $P_{\text{Э}}$) достигаются для тех линий, у которых однофазные кабели проложены сомкнутым треугольником и имеют малое сечение экрана $F_{\text{Э}}$. Любая другая схема заземления экранов будет иметь меньшие потери, т.е. справедливо $0 \leq P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}} \leq D_p$.

Степень использования пропускной способности кабеля

Коэффициент использования пропускной способности кабеля, показывающий соотношение допустимого для кабеля тока нагрузки и того тока, который был бы допустим в некоем идеализированном случае (когда потери в экранах отсутствуют), можно найти следующим образом:

$$K_{\text{И}} = \frac{I_{\text{ДОП}}}{I_{\text{ДОП,ИД}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}}} \quad (2)$$

Как и относительные потери в экранах $P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}$, коэффициент использования $K_{\text{И}}$ не зависит от длины кабеля и тока в его жиле.

На практике встречается $1 \geq K_{\text{И}} \geq 0,5$, т.е. для некоторых кабельных линий пропускная способность кабеля составляет лишь 50% от возможной, что вызывает необходимость прокладки дополнительных линий для удовлетворения потребителя.

Годовая стоимость потерь мощности в экранах кабеля

Годовая стоимость потерь мощности в экранах трех фаз кабельной линии:

$$C_{\text{Э1}} = \frac{3P_{\text{Э}}}{1000} \cdot 8760 \cdot C, \quad (3)$$

где $P_{\text{Э}} = (P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}) \cdot (I_{\text{Ж}}^2 R_{\text{Ж}})$;

$3P_{\text{Э}} / 1000$ – потери в экранах трех фаз, кВт;

8760 – число часов в году;

C – цена потерь электроэнергии в сети, руб. / кВт·ч;

$I_{\text{Ж}}$ – среднегодовой ток в жиле, А.

Если относительные потери $P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}$ не зависят от длины кабеля $L_{\text{К}}$ и тока в его жиле $I_{\text{Ж}}$, то абсолютные потери $P_{\text{Э}}$ в экране (и их стоимость $C_{\text{Э1}}$) пропорциональны длине кабеля и квадрату тока. Поэтому при расчете $C_{\text{Э1}}$ будем указывать $L_{\text{К}}$ и $I_{\text{Ж}}$.

Для некоторых кабельных линий при больших $I_{\text{Ж}}$ годовая стоимость потерь в экранах каждого километра трассы может превосходить 300 тыс. рублей. За 40 лет эксплуатации для такой кабельной линии длиной, к примеру, 3 км, стоимость потерь превзойдет 36 млн рублей (в ценах года начала эксплуатации).

НЕИДЕАЛЬНАЯ ТРАНСПОЗИЦИЯ

Для повышения пропускной способности кабеля $K_{\text{И}} \rightarrow 1$ и снижения стоимости потерь в экранах $C_{\text{Э1}} \rightarrow 0$ в сетях 6–500 кВ универсальным техническим решением является транспозиция экранов, применимая для кабелей практически любой длины, за исключением самых коротких, где можно применить одностороннее заземление экранов.

Идеальной называется такая транспозиция экранов, когда вдоль трассы кабеля применен один и тот же способ прокладки фаз и одинаковая длина участков между узлами транспозиции $L_1 = L_2 = L_3 = L_{\text{К}}/3$ (рис. 1). В этом случае $K_{\text{И}} = 1$, $C_{\text{Э1}} = 0$.

Проведем расчеты $K_{\text{И}}$ и $C_{\text{Э1}}$ для двух вариантов неидеальной транспозиции:

1. Один и тот же способ прокладки фаз вдоль всей трассы кабельной линии, но разная длина участков между узлами транспозиции.
2. Одинаковая длина участков между узлами транспозиции, но на этих участках разные способы прокладки.

Если в первом варианте потери в экранах одинаковы для каждой из фаз кабельной линии, то для второго они будут различаться по фазам.

Вариант 1

На практике нередко возникают определенные ограничения на выбор мест установки транспозиционных муфт и коробок транспозиции и транспозиция получается неидеальной, т.е. $L_1 \neq L_2 \neq L_3$.

• **Таблица 1.** Эффективность неидеальной транспозиции при разных длинах участков. Расчет для кабеля 110 кВ, 1000/240 мм². Длина кабеля 3000 м, ток в жилах 1000 А. Способ прокладки фаз кабеля одинаков вдоль всей трассы – треугольник

Величина	Без трансп.	Одна коробка	Две коробки	Идеальная
	$L_1 = 3000$ м $L_2 = 0$ $L_3 = 0$	$L_1 = 0$ $L_2 = 1500$ м $L_3 = 1500$ м	$L_1 = 1500$ м $L_2 = 750$ м $L_3 = 750$ м	$L_1 = 1000$ м $L_2 = 1000$ м $L_3 = 1000$ м
K_T , о.е., по (4)	1	0,5	0,25	0
$P_{\Sigma} / P_{Ж}$, о.е., по (5)	1,22	0,31	0,08	0
$K_{И}$, о.е., по (2)	0,67	0,87	0,96	1
$C_{\Sigma 1}$, тыс. руб., по (3)	1924	488	126	0

• **Таблица 2.** Эффективность неидеальной транспозиции при разных способах прокладки. Расчет для кабеля 110 кВ, 1000/240 мм². Длина кабеля 3000 м (2000 м – треугольник, 1000 м – в ряд), ток в жилах 1000 А. Длины участков равны

Расчет для фаз А/В/С	Без транспозиции, $d_{AB} = 0,5$	d_{AB} , м			Идеальная трансп.
		1,0	0,5	0,2	
$P_{\Sigma} = I_{\Sigma}^2 R_{\Sigma}$, кВт	67,9/65,5/80,2	25,2/22,3/16,7	17,8/15,5/9,73	8,32/7,38/2,31	0
$P_{\Sigma} / P_{Ж}$, о.е.	2,26/2,18/2,67	0,84/0,74/0,56	0,59/0,52/0,32	0,28/0,25/0,08	0
Среднее $P_{\Sigma} / P_{Ж}$	2,37	0,71	0,48	0,20	0
Среднее $K_{И}$, о.е., по (2)	0,54	0,76	0,82	0,91	1
$C_{\Sigma 1}$, тыс. руб., по (3)	3738	1120	756	316	0

Если способ прокладки фаз кабеля по трассе не меняется (везде треугольник или рядное расположение), то можно ввести коэффициент транспозиции:

$$K_T = \frac{\sqrt{[L_1 - 0,5(L_2 + L_3)]^2 + [0,5\sqrt{3}(L_2 - L_3)]^2}}{L_K} \quad (4)$$

Для определения $K_{И}$ и $C_{\Sigma 1}$ в формулы (2) и (3) надо подставить соотношение потерь $P_{\Sigma} / P_{Ж}$, которое вычисляется через коэффициент транспозиции K_T как:

$$\frac{P_{\Sigma}}{P_{Ж}} = D_P \cdot K_T^2 \quad (5)$$

Коэффициент транспозиции может быть $0 \leq K_T \leq 1$, а относительные потери в экранах всегда принимают значения из диапазона $0 \leq P_{\Sigma} / P_{Ж} \leq D_P$

Для примера рассмотрим кабельную линию 110 кВ, кабеля типа 1000/240 мм², имеющие медные жилу и экран. Фазы кабеля проложены сомкнутым треугольником. Длина трассы 3000 м, среднегодовой ток в жиле $I_{Ж} = 1000$ А, цена потерь $C = 1$ руб. / (кВт · ч). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Оценив величины $P_{\Sigma} / P_{Ж}$, $K_{И}$, $C_{\Sigma 1}$ для различных вариантов, выясняем, что в сравнении с простым двусторонним заземлением экранов любая транспозиция экранов обеспечивает существенную выгоду: $K_{И} \rightarrow 1$, $C_{\Sigma 1} \rightarrow 0$. Даже одна транспозиционная муфта и коробка, размещенные в середине трассы кабеля, по сравнению со случаем вообще без транспозиции позволяют снизить потери в экранах в 4 раза и повысить пропускную способность кабеля на 20% (с 0,67 до 0,87).

Вариант 2

В последнее время при строительстве кабельных линий всё более широкое распространение получает технология, называемая «горизонтально-направленным бурением» (ГНБ). В результате «проколов» грунта каждая фаза кабеля оказывается размещенной в отдельной полиэтиленовой трубе (протащить через грунт трубу, в которой уместилась бы сразу три фазы кабеля, не представляется возможным).

Взаимное расположение труб (фаз) – в ряд, а расстояние между ними может достигать полуметра и более (чем длиннее прокол, тем больше должно быть это расстояние, чтобы при бурении новых проколов не повредить уже имеющиеся).

Следовательно, хотя при прокладке однофазных кабелей предпочтением отдадут расположению фаз сомкнутым треугольником, на участках ГНБ фазы кабеля будут проложены в ряд. Если по трассе такого кабеля выполнена транспозиция экранов, то она не будет идеальной даже при $L_1 = L_2 = L_3 = L_K/3$.

Различные способы прокладки не позволяют использовать понятие K_T или его аналоги, поскольку формулы оказываются слишком громоздкими. Поэтому здесь приведем лишь результаты компьютерного моделирования.

В условиях предыдущего примера для кабельной линии 110 кВ положим $L_1 = L_2 = L_3 = L_K/3 = 1000$ м. Пусть на первом и втором участках фазы проложены сомкнутым треугольником, на 3-м участке фазы проложены в ряд с расстоянием между осями соседних фаз d_{AB} , которое варьируется.

Результаты расчета сведены в табл. 2. Добавлен и случай без транспозиции, когда экраны имеют простое двустороннее заземление, причем фазы кабеля лежат треугольником на первых 2000 м трассы, а последние 1000 м фазы кабеля лежат в ряд с расстоянием между осями соседних фаз $d_{AB} = 0,5$ м.

Видно, что эффективность транспозиции ухудшается, если разнятся способы прокладки фаз кабеля вдоль его трассы: потери $C_{\Sigma 1}$ растут, $K_{И}$ падает.

ОБУСТРОЙСТВО УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ

На рис. 3 изображены два полных цикла транспозиции экранов однофазных кабелей при разном обустройстве узла сопряжения соседних циклов. ОПН условно не показаны. На практике, как правило, применяют схему рис. 3а, но, по мнению авторов, следует шире применять схему рис. 3б.

На каждом из циклов транспозиция может быть неидеальной из-за разной длины участков и/или из-за разных способов прокладки. Если не заземлять экраны в узле сопряжения соседних полных циклов (схема рис. 3б), то зачастую этим можно сделать транспозицию экранов «равномернее», приблизить ее к идеальному случаю, не имеющему потерь в экранах.

Стоимость реализации двух схем не отличается одна от другой: в обоих случаях в узле сопряжения циклов необходимо обустроить кабельные колодцы и делать их заземляющие устройства, устанавливать электромонтажные коробки (заземления – рис. 3а; транспозиции – рис. 3б). Однако названные схемы будут отличаться друг от друга прежде всего:

- потерями мощности в нормальном режиме работы;
- токами и напряжениями в экранах при КЗ.

НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ

Проведем расчеты $K_{И}$ и $C_{\Sigma 1}$ для двух вариантов неидеальной транспозиции:

1. Один и тот же способ прокладки фаз вдоль всей трассы кабельной линии, но разная длина участков между узлами транспозиции.
2. Одинаковая длина участков между узлами транспозиции, но на этих участках разные способы прокладки.

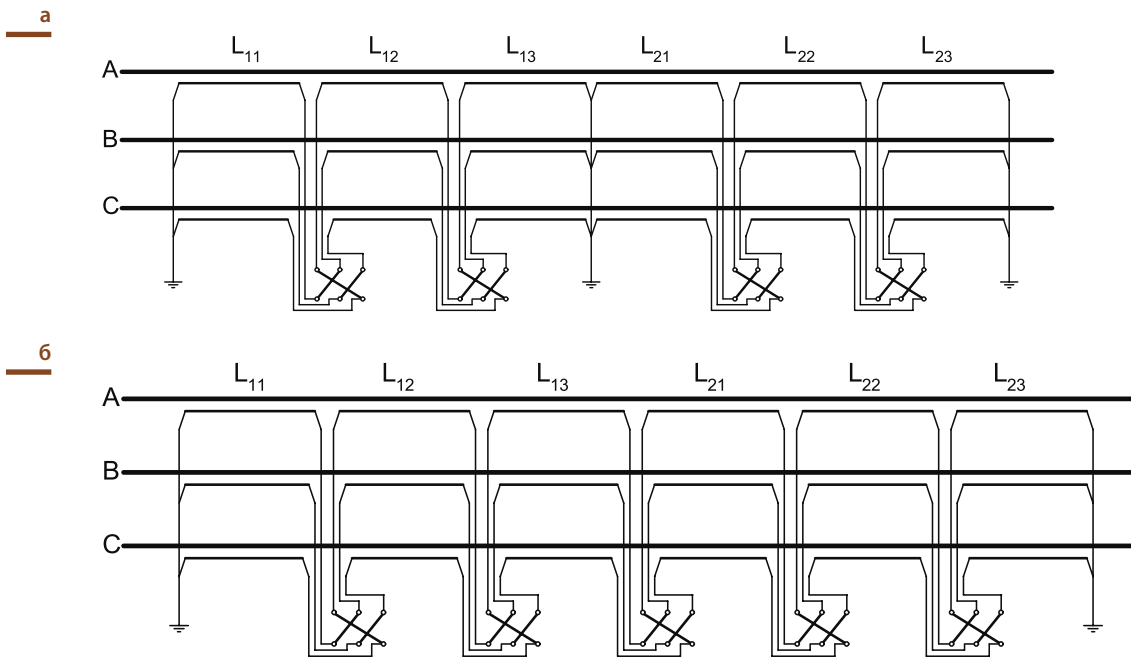


Рис. 3 •

Два полных цикла транспозиции экранов однофазных кабелей:
 а) с заземлением средней точки;
 б) без заземления средней точки

Вариант 1

Предположим, что вдоль всей трассы кабеля имеет место одинаковый способ прокладки фаз кабеля, однако пусть длины участков различны:

- для 1-го цикла транспозиции $L_{11} \neq L_{12} \neq L_{13} \neq L_K / 6$;
- для 2-го цикла транспозиции $L_{21} \neq L_{22} \neq L_{23} \neq L_K / 6$.

1-й и 2-й цикл для рис. 3а не зависят друг от друга, имеют свои $K_{T1} = f(L_{11}, L_{12}, L_{13})$, $K_{T2} = f(L_{21}, L_{22}, L_{23})$, которые вычисляются по (4). Суммарные потери 1-го и 2-го цикла будут:

$$\frac{P_{\Sigma}}{P_{Ж}} = D_P \cdot (K_{T1}^2 + K_{T2}^2). \tag{6}$$

Потери в экранах для рис. 3б определяются одновременно для всего кабеля, имеющего коэффициент $K_{T12} = f(L_1, L_2, L_3)$, где $L_1 = L_{11} + L_{21}$, $L_2 = L_{12} + L_{22}$, $L_3 = L_{13} + L_{23}$:

$$\frac{P_{\Sigma}}{P_{Ж}} = K_{T12}^2. \tag{7}$$

В схеме на рис. 3б, в отличие от схемы на рис. 3а, неравномерность длин участков на 1-м цикле может быть скомпенсирована неравномерностью длин участков на 2-м цикле. Иными словами, несмотря на $L_{11} \neq L_{12} \neq L_{13} \neq L_K / 6$ и $L_{21} \neq L_{22} \neq L_{23} \neq L_K / 6$, может сложиться, что: $L_{11} + L_{21} \approx L_{12} + L_{22} \approx L_{13} + L_{23}$, откуда $K_{T12} \approx 0$ и $P_{\Sigma} / P_{Ж} \approx 0$.

В условиях рассмотренного примера пусть длина кабельной линии 110 кВ равна 6000 м: $L_{11} = 1000$ м, $L_{12} = 600$ м, $L_{13} = 400$ м, $L_{21} = 1000$ м, $L_{22} = 1400$ м, $L_{23} = 1600$ м. Большая

разница длин могла получиться, например, при поэтапном строительстве кабельной линии. Скажем, сначала ввели в работу участок длиной 2000 м с одним циклом транспозиции, а затем второй участок длиной 4000 м со своим циклом транспозиции.

Результаты расчетов сведены в табл. 3, откуда видно, что отказ от заземления узла сопряжения соседних циклов повысил эффективность транспозиции: снизились потери в экранах $S_{Э1}$, выросла пропускная способность $K_{И}$ (на 4%, или с 0,96 до 1).

Вариант 2

Предположим, что вдоль трассы кабеля разный способ прокладки фаз кабеля, но при этом длина шести участков одинакова: $L_{11} = L_{12} = L_{13} = L_{21} = L_{22} = L_{23} = L_K / 6$.

Различные способы прокладки не позволяют использовать понятие K_T или его аналоги, поскольку формулы оказываются слишком громоздкими. Поэтому здесь приведем лишь результаты компьютерного моделирования.

В условиях рассмотренного примера пусть длина кабельной линии 110 кВ равна 6000 м – шесть участков по 1000 метров каждый. Положим, что на протяжении 5000 метров фазы проложены сомкнутым треугольником, а на последнем участке длиной 1000 м фазы кабеля лежат в ряд с расстоянием между осями соседних фаз $d_{AB} = 0,5$ м.

Результаты расчетов сведены в табл. 4, откуда видно, что отказ от заземления узла сопряжения соседних циклов повысил

• **Таблица 3** Эффективность неидеальной транспозиции при разных длинах участков. Расчет для кабеля 110 кВ, 1000/240 мм². Длина кабеля 6000 м, ток в жилах 1000 А. Способ прокладки фаз кабеля одинаков вдоль всей трассы – треугольник

Величина	Без транспозиции	Схема рис. 3а (с заземлением)		Схема рис. 3б (два цикла вместе)
		1-й цикл	2-й цикл	
K_T , о.е., по (4)	$K_T = 1$	$K_{T1} = 0,26$	$K_{T2} = 0,13$	$K_{T12} = 0$
$P_{\Sigma} / P_{Ж}$, о.е., по (6), (7)	1,22	0,08	0,02	0
$K_{И}$, о.е., по (2)	0,67	0,96	0,99	1
$C_{\Sigma 1}$, тыс. руб., по (3)	3848	126	32	0

• **Таблица 4** Эффективность неидеальной транспозиции при разных способах прокладки. Расчет для кабеля 110 кВ, 1000/240 мм². Длина кабеля 6000 м (5000 м – треугольник, 1000 м – в ряд), ток в жилах 1000 А. Длины участков равны

Расчет для фаз А/В/С	Без транспозиции $d_{ЛВ} = 0,5$ м	Схема рис. 3а (с заземлением)		Схема рис. 3б (два цикла вместе)
		1-й цикл	2-й цикл	
$P_{\Sigma} = I_{\Sigma}^2 R_{\Sigma}$, кВт	108/103/121	0/0/0	17,8/15,5/9,73	11,8/10,8/6,08
$P_{\Sigma} / P_{Ж}$, о.е.	1,80/1,72/2,02	0/0/0	0,59/0,52/0,32	0,20/0,18/0,10
Среднее $P_{\Sigma} / P_{Ж}$	1,84	0	0,48	0,16
Среднее $K_{И}$, о.е., по (2)	0,59	1	0,82	0,93
$C_{\Sigma 1}$, тыс. руб., по (3)	5816	0	756	502

эффективность транспозиции: снизились потери в экранах $C_{\Sigma 1}$, выросла пропускная способность $K_{И}$ (на 11% – с 0,82 до 0,93).

В табл. 4 добавлен и случай без транспозиции, когда при таком же смешанном способе прокладки экраны заземлены с двух сторон.

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

Рассмотрим токи и напряжения в экранах при КЗ, которые можно условно разделить по отношению к кабелю на внешние и внутренние.

Внешние КЗ «фаза–земля» являются основой для выбора числа полных циклов транспозиции [1], но не влияют на решение вопросов заземления экранов в узлах сопряжения полных циклов транспозиции.

Внутренние КЗ «жила–экран» рассмотрены в [2, 3].

В [2] было показано, что периодическое объединение экранов позволяет изменить пути растекания тока КЗ от места, где он из жилы попал в экран, до заземляющего устройства экранов. В результате объединения экранов (рис. 3а) уменьшается длина участка кабеля, по экрану которого протекает весь ток КЗ. Это может быть важно для локализации последствий КЗ, когда сечение экрана не вполне соответствует току КЗ и времени его протекания, т.е. для кабелей с малыми сечениями экранов.

В настоящее время сечение экранов однофазных кабелей выбирается на весь ток КЗ с учетом времени его протекания (расчетными являются ток двойного КЗ для сетей 6–35 кВ и ток однофазного КЗ для сетей 110–500 кВ). Поэтому периодическое объединение экранов для указанных целей не нужно.

В [3] периодическое объединение экранов потребовалось не для обеспечения термической стойкости, а для снижения напряжения на оболочке универсального самонесущего кабеля при протекании по экранам токов замыкания на землю и токов КЗ. Такой кабель, называемый MULTI-WISKI, имеет достаточно тонкую оболочку «экран–земля», но при этом прокладывается открытым способом. Следовательно, если в кабеле возникло повреждение «жила–экран» и появилось напряжение на экране, то случайное или преднамеренное прикосновение людей и животных к кабелю может закончиться пробоем оболочка кабеля в месте прикосновения и летальным исходом. Именно поэтому следовало снизить напряжение на экране при повреждении «жила–экран», для чего периодически по трассе кабеля его экраны объединялись и заземлялись.

Силовые однофазные кабели 6–500 кВ, в отличие от кабелей MULTI-WISKI, имеют более толстую оболочку и прокладываются в местах, недоступных для людей и животных (как правило,

в грунте). В такой ситуации ограничение напряжения «экран–земля» при повреждении изоляции «жила–экран» кабеля представляется излишним, а все возможные повреждения оболочки будут выявлены в процессе проверки качества ремонта кабеля, предполагающей в том числе испытания его оболочки.

Исключение составляют кабели, проложенные в обслуживаемых тоннелях (коллекторах). Для них задача ограничения напряжения «экран–земля» может быть актуальна, а схема рис. 3а при наличии расчетов напряжения – предпочтительна, хотя такая схема в сравнении с рис. 3б будет иметь повышенные потери и меньшую пропускную способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Транспозиция экранов однофазных кабелей 6–500 кВ повышает их пропускную способность и снижает стоимость потерь в экранах.
2. Необходимость транспозиции экранов следует обосновывать результатами расчетов коэффициента использования пропускной способности кабеля, а также стоимости потерь в экранах.
3. Необходимость увеличения числа циклов транспозиции сверх одного полного следует обосновывать расчетами напряжения на экране относительно земли в узлах транспозиции при внешних КЗ [1].
4. Эффективность транспозиции экранов ухудшается:
 - при различной длине участков кабеля между узлами транспозиции;
 - при различных способах прокладки фаз (в треугольник или в ряд).
5. В случае нескольких полных циклов транспозиции эффективность транспозиции может быть повышена за счет отказа от заземления экранов в узлах сопряжения соседних циклов.

В следующей статье предполагается обосновать требования к сопротивлению заземления коробок транспозиции, проанализировать проблему выноса потенциала по экранам однофазных кабелей.

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., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ: расчет термической стойкости экранов при КЗ // Новости ЭлектроТехники. 2008. № 2(50).
3. Дмитриев М.В. Универсальный самонесущий кабель среднего напряжения // Новости ЭлектроТехники. 2010. № 1(61).