

В настоящее время при строительстве кабельных сетей 6-500 кВ активно используют однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Наличие медных экранов в конструкции однофазных кабелей приводит к необходимости анализа токов и напряжений в этих экранах.

Сегодня наши петербургские авторы рассматривают область возможного применения транспозиции кабелей, а также ее связь с уже широко известной транспозицией экранов.

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ 6–500 кВ Транспозиция однофазных кабелей и их экранов

Простое двустороннее заземление экранов (рис. 1а) приводит к появлению в нормальном режиме паразитных токов I_3 промышленной частоты, вызывающих потери мощности P_3 в экранах, снижающих пропускную способность кабеля и увеличивающих ежегодные потери активной мощности в кабельной сети. Одностороннее заземление экранов (рис. 2а) или транспозиция экранов (рис. 3) позволяют исключить паразитные токи в экранах, но дают напряжение на экранах относительно земли.

До сих пор в [1, 2] понятие «транспозиция» вводилось только для экранов кабелей. Однако после серии расчетов токов и напряжений в экранах стало ясно, что иногда целесообразно делать транспозицию самих однофазных кабелей (рис. 1б; рис. 2б), необходимость которой находит различное объяснение в зависимости от числа цепей кабельной передачи.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Токи и напряжения в экранах трехфазных групп однофазных кабелей зависят от схемы соединения их экранов (рис. 1–3), а также от расстояния между фазами и их взаимного расположения (рис. 4–5). Ранее в [1, 2] расчеты токов и напряжений в экранах проводились с использованием среднего геометрического расстояния $s = \sqrt[3]{s_{AB} \cdot s_{BC} \cdot s_{AC}}$ между осями кабелей А, В, С, так как это позволяло получить сравнительно простые аналитические выражения для токов и напряжений. Прокладка в ряд давала $s = 1,26 \cdot s_{AB}$, а в треугольник $s = s_{AB}$, где s_{AB} – расстояние между осями соседних фаз.

Очевидно, что в случае расположения однофазных кабелей А, В, С в ряд использование среднего геометрического расстояния между фазами приводит к потере специфических особенностей, присущих крайним и средней фазам.

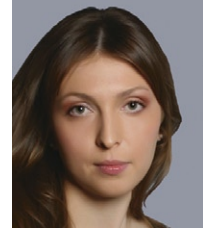
Уравнения системы (1), приведенной в [1], для одноцепной кабельной линии (КЛ), несложно скорректировать с учетом уникальности взаимных сопротивлений $Z_{КАВ}$, $Z_{КВС}$, $Z_{КАС}$ для каждой пары однофазных кабелей (ранее $Z_{КАВ} = Z_{КВС} = Z_{КАС} = Z_{К}$):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{ЭА} &= \dot{Z}_{Э} \dot{I}_{ЭА} + \dot{Z}_{ЖЭ} \dot{I}_{ЖА} + \dot{Z}_{КАВ} (\dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЭВ}) + \dot{Z}_{КАС} (\dot{I}_{ЖС} + \dot{I}_{ЭС}) \\ \Delta \dot{U}_{ЭВ} &= \dot{Z}_{Э} \dot{I}_{ЭВ} + \dot{Z}_{ЖЭ} \dot{I}_{ЖВ} + \dot{Z}_{КАВ} (\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЭА}) + \dot{Z}_{КВС} (\dot{I}_{ЖС} + \dot{I}_{ЭС}), \quad (1) \end{aligned}$$



Михаил Дмитриев,
ЗАО «Завод
энергозащитных
устройств»,

г. Санкт-Петербург.



**Маргарита
Кияткина,**
аспирант
СПбГПУ,

$$\Delta \dot{U}_{ЭС} = \dot{Z}_{Э} \dot{I}_{ЭС} + \dot{Z}_{ЖЭ} \dot{I}_{ЖС} + \dot{Z}_{КАС} (\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЭА}) + \dot{Z}_{КВС} (\dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЭВ}),$$

где $\dot{Z}_{Э}$ – собственное сопротивление экрана;

$\dot{Z}_{ЖЭ}$ – взаимное сопротивление между жилой и экраном одного и того же кабеля;

$\dot{Z}_{КАВ}$, $\dot{Z}_{КВС}$, $\dot{Z}_{КАС}$ – взаимные сопротивления жил и экранов кабелей фаз А, В, С, которые в общем случае различны.

Для расчета напряжений в экранах при их транспозиции (схема рис. 3) систему (1) следует записать три раза – по числу участков трассы кабеля между узлами транспозиции.

Для расчета токов и напряжений в экранах при транспозиции самих кабелей (схемы рис. 1,б и рис. 2,б) система уравнений (1) заметно упрощается, поскольку взаимные сопротивления оказываются равны друг другу $\dot{Z}_{КАВ} = \dot{Z}_{КВС} = \dot{Z}_{КАС} = \dot{Z}_{К}$.

В случае многоцепных кабельных линий число уравнений в системе (1) возрастает соразмерно числу цепей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Проведем расчеты токов и напряжений экранов в нормальном симметричном установившемся режиме работы для одноцепной и двухцепной кабельных линий. Для определенности положим, что линии выполнены кабелями 500/95 мм² напряжением 110 кВ с медной жилой и медным экраном.

Рассмотрим два способа расположения кабелей:

– прокладка в ряд с расстоянием $\Delta s = 0,1$ м в свету между кабелями цепи (рис. 4);

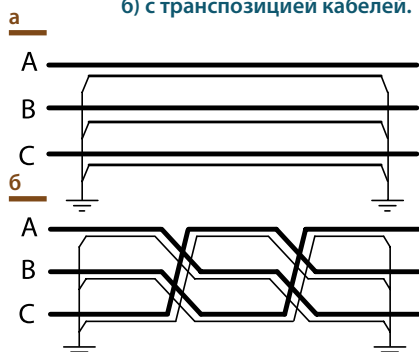
– прокладка сомкнутым треугольником (рис. 5).

Для двухцепных линий расстояние в свету между цепями обозначено Δs_{12} и в расчетах варьируется от 0,2 до 0,6 м.

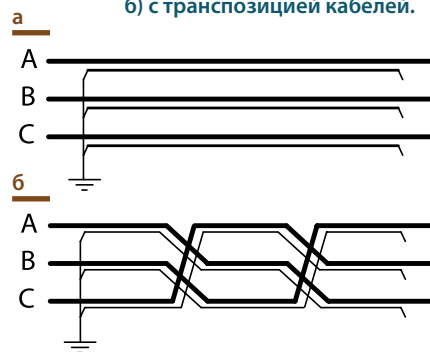
Результаты расчетов для схем соединения экранов рис. 1–3 и взаимного расположения кабелей рис. 4–5 приведены в табл. 1–3. У двухцепных линий схемы соединения экранов принимались одинаковыми для работающей и отключенной цепей, хотя на практике это не обязательно будет так.

Токи (потери) в экранах прямо пропорциональны токам (потерям) в жилах, и для удобства в табл. 1 они даны в соответствующих относительных единицах, но при известных токах (потерях) в жилах могут быть пересчитаны в А (Вт).

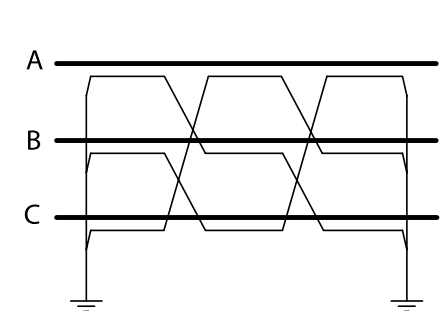
• **Рис. 1.** Двустороннее заземление экранов:
а) без транспозиции кабелей;
б) с транспозицией кабелей.



• **Рис. 2.** Одностороннее заземление экранов:
а) без транспозиции кабелей;
б) с транспозицией кабелей.



• **Рис. 3.** Транспозиция экранов кабелей без транспозиции кабелей



Токи в экранах $I_3 / I_{ж}$ при их двустороннем заземлении (рис. 1).

Таблица 1а •

Взаимное расположение фаз	Δs_{12} , м	Работающая цепь			Отключенная цепь		
		А, левая	В, средняя	С, правая	А, левая	В, средняя	С, правая
Сомкнутый треугольник	—	0,246	0,248	0,246	—	—	—
	0,2	0,247	0,259	0,236	0,021	0,009	0,014
	0,4	0,247	0,254	0,242	0,010	0,006	0,008
	0,6	0,247	0,252	0,244	0,006	0,004	0,005
Сомкнутый треугольник, транспозиция кабелей	—	0,244	0,244	0,244	—	—	—
	0,2	0,244	0,244	0,244	0,001	0,001	0,001
	0,4	0,244	0,244	0,244	0,000	0,000	0,000
	0,6	0,244	0,244	0,244	0,000	0,000	0,000
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м	—	0,502	0,415	0,592	—	—	—
	0,2	0,495	0,454	0,554	0,091	0,042	0,027
	0,4	0,495	0,440	0,574	0,053	0,030	0,023
	0,6	0,495	0,434	0,582	0,037	0,024	0,020
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м, транспозиция кабелей	—	0,505	0,505	0,505	—	—	—
	0,2	0,505	0,505	0,505	0,020	0,020	0,020
	0,4	0,505	0,505	0,505	0,010	0,010	0,010
	0,6	0,505	0,505	0,505	0,006	0,006	0,006

Потери в экранах $P_3 / P_{ж}$ при их двустороннем заземлении (рис. 1).

Таблица 1б •

Взаимное расположение фаз	Δs_{12} , м	Работающая цепь			Отключенная цепь		
		А, левая	В, средняя	С, правая	А, левая	В, средняя	С, правая
Сомкнутый треугольник	—	0,318	0,323	0,318	—	—	—
	0,2	0,321	0,353	0,293	0,002	0,001	0,001
	0,4	0,321	0,340	0,308	0,001	0,000	0,000
	0,6	0,321	0,334	0,313	0,000	0,000	0,000
Сомкнутый треугольник, транспозиция кабелей	—	0,313	0,313	0,313	—	—	—
	0,2	0,313	0,313	0,313	0,000	0,000	0,000
	0,4	0,313	0,313	0,313	0,000	0,000	0,000
	0,6	0,313	0,313	0,313	0,000	0,000	0,000
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м	—	1,325	0,908	1,845	—	—	—
	0,2	1,290	1,085	1,615	0,044	0,009	0,004
	0,4	1,290	1,019	1,734	0,015	0,005	0,003
	0,6	1,290	0,991	1,783	0,007	0,003	0,002
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м, транспозиция кабелей	—	1,343	1,343	1,343	—	—	—
	0,2	1,343	1,343	1,343	0,002	0,002	0,002
	0,4	1,343	1,343	1,343	0,001	0,001	0,001
	0,6	1,343	1,343	1,343	0,000	0,000	0,000

Напряжение на экранах U_3 (на 1000 м / 1000 А) при их одностороннем заземлении (рис. 2).

Таблица 2 •

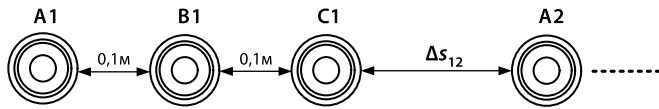
Взаимное расположение фаз	Δs_{12} , м	Работающая цепь			Отключенная цепь		
		А, левая	В, средняя	С, правая	А, левая	В, средняя	С, правая
Сомкнутый треугольник	—	54,1	54,3	54,1	—	—	—
	0,2	54,1	54,3	54,1	12,2	10,6	9,9
	0,4	54,1	54,3	54,1	7,3	6,7	6,4
	0,6	54,1	54,3	54,1	5,2	4,9	4,7
Сомкнутый треугольник, транспозиция кабелей	—	54,2	54,2	54,2	—	—	—
	0,2	54,2	54,2	54,2	0,291	0,292	0,291
	0,4	54,2	54,2	54,2	0,071	0,071	0,071
	0,6	54,2	54,2	54,2	0,027	0,028	0,027
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м	—	138	111	139	—	—	—
	0,2	138	111	139	44,6	31,3	24,3
	0,4	138	111	139	29,6	23,2	19,1
	0,6	138	111	139	22,3	18,5	15,8
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м, транспозиция кабелей	—	126	126	126	—	—	—
	0,2	126	126	126	5,89	5,89	5,89
	0,4	126	126	126	3,01	3,01	3,01
	0,6	126	126	126	1,85	1,85	1,85

Напряжение U_3 (на 1000 м / 1000 А) в первом узле транспозиции экранов (рис. 3).

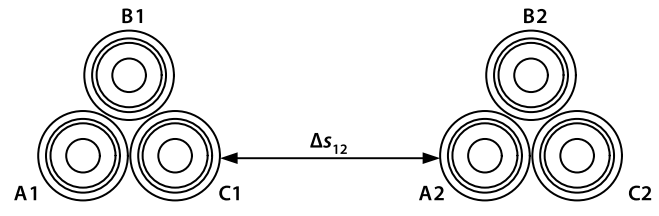
Таблица 3 •

Взаимное расположение фаз	Δs_{12} , м	Работающая цепь			Отключенная цепь		
		А, левая	В, средняя	С, правая	А, левая	В, средняя	С, правая
Сомкнутый треугольник	—	18,3	18,2	18,2	—	—	—
	0,2	18,3	18,2	18,1	0,46	0,41	0,54
	0,4	18,3	18,2	18,2	0,18	0,16	0,19
	0,6	18,3	18,2	18,2	0,09	0,09	0,10
В ряд, $\Delta s = 0,1$ м	—	32,5	47,8	47,8	—	—	—
	0,2	32,6	46,6	47,0	1,29	3,58	4,85
	0,4	32,5	47,1	47,5	0,64	1,83	2,47
	0,6	32,4	47,3	47,6	0,41	1,12	1,53

• Рис. 4. Двухцепная кабельная линия с фазами, проложенными в ряд (расстояние в свету между фазными кабелями одной цепи принято равным 0,1 м)



• Рис. 5. Двухцепная кабельная линия с фазами, проложенными треугольником



Напряжения в экранах прямо пропорциональны токам в жилах и длине кабеля – в табл. 2–3 для удобства они даны в расчете на ток жилы 1000 А и длину кабеля 1000 м, но при известных токах и длине могут быть пересчитаны.

ОДНОЦЕПНАЯ КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ

Рассмотрим выделенные цветом в табл. 1–3 цифры, относящиеся к случаю «рабочая цепь» при отсутствии второй цепи (когда не задано Δs_{12}).

Согласно табл. 1,а для одноцепной КЛ при заземлении экранов с двух сторон:

- токи в экранах возрастают при увеличении расстояния между фазами (прокладка в ряд вместо сомкнутого треугольника), что пояснено в [2];
- при прокладке в ряд токи в экранах различных фаз могут заметно отличаться (здесь – $0,592 / 0,415 \approx 1,5$);
- в случае прокладки в ряд имеет смысл выполнять транспозицию кабелей, так как это выравнивает величины токов в экранах до некоторого среднего значения (здесь – 0, 505), снижает токи в экранах по сравнению со случаем, когда нет транспозиции кабелей (0,505 вместо 0,592).

Выводы, которые можно сделать по потерям из табл. 1,б, аналогичны выводам по токам из табл. 1,а. Дополнительно следует отметить лишь то, что при прокладке в ряд потери в экранах, зависящие от квадрата тока, отличаются между фазами А, В, С сильнее, чем отличались токи из табл. 1,а: при прокладке в ряд потери в экранах средней фазы В почти в $1,845 / 0,908 \approx 2$ раза меньше, чем в самой нагруженной из крайних фаз С.

Само по себе соотношение потерь $P_{\Sigma} / P_{\text{ж}} = 0,908 \div 1,845$ является, согласно [2], достаточно большим и свидетельствует о недопустимости простого двустороннего заземления экранов. Если по каким-то причинам все же принято именно двустороннее заземление экранов, и при этом фазы проложены в ряд (а не треугольником), то согласно табл. 1,а транспозиция кабелей будет полезна. Она выравнивает потери в экранах до некоторого среднего значения (здесь – до 1,343), позволив уйти от повышенных потерь (здесь – 1,845) в одной из крайних фаз, и, как следствие, снизит ежегодные потери в кабельной линии, а также, теоретически, продлит срок службы ее изоляции.

Согласно табл. 2 для одноцепной КЛ при заземлении экранов с одной из сторон:

- напряжения в экранах возрастают при увеличении расстояния между фазами (прокладка в ряд вместо сомкнутого треугольника), что пояснено в [2];
- при прокладке в ряд напряжения на экранах могут отличаться друг от друга (здесь – в $139 / 111 \approx 1,25$ раза), однако такое отличие не имеет значения, поскольку напряжения в десятисотни В не представляют опасности для оболочки кабеля;
- по этим же причинам нет особого смысла выполнять транспозицию кабелей, хотя она и выравнивает напряжения в экранах до некоторого среднего значения (здесь – 126 В) по сравнению со случаем без транспозиции кабелей.

Транспозиция экранов и одновременно транспозиция самих кабелей – это сложное решение, затрудняющее обслуживание КЛ, идентификацию фаз и экранов. Поэтому в табл. 3 не

рассмотрена транспозиция кабелей. Напряжения на экранах в узлах транспозиции возрастают при увеличении расстояния между фазами (прокладка в ряд вместо сомкнутого треугольника), что пояснено в [2], являются различными по фазам, однако остаются неопасными для оболочки кабеля.

Как видно из табл. 1–3, для одноцепных КЛ транспозиция фазных кабелей имеет смысл лишь при расположении кабелей в ряд, причем только в случае простого заземления их экранов с двух сторон, где за счет транспозиции кабелей достигается снижение тепловыделения в самой нагруженной (крайней) фазе.

ДВУХЦЕПНАЯ КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ

В двухцепных (многоцепных) КЛ при определении токов и напряжений в экранах следует учитывать взаимное влияние цепей друг на друга, которое зависит от Δs_{12} между цепями.

Рассмотрим такой режим двухцепной кабельной линии, когда одна из цепей находится под током и напряжением, а другая отключена от сети, и на ней персонал выполняет работы (монтаж, испытания, диагностика, поиск повреждений, ремонт).

Важность задачи в том, что в двухцепных (многоцепных) КЛ токи и напряжения наводятся не только в экранах работающей цепи, но и в экранах отключенной цепи. Иными словами, для обслуживающего персонала существует риск поражения током. Именно для его минимизации и требуется транспозиция кабелей внутри каждой из цепей. Поясним это.

Согласно табл. 1–3 для двухцепной КЛ в экранах отключенной цепи наводятся токи и напряжения. Наиболее заметны они в случае расположения кабелей в ряд, но легко могут быть минимизированы транспозицией кабелей внутри каждой из цепей.

Напряжение (табл. 2) фактически позволяет оценить степень опасности при работе на отключенной цепи многоцепных кабельных линий, так как представляет собой ЭДС, наводимую от работающей цепи на отключенную. Например, даже если экраны кабеля были заземлены с двух сторон (табл. 1), но по трассе кабеля идут ремонтные работы (установка соединительной муфты, предполагающая разрезание экрана), то напряжение в месте разрыва экрана видно в табл. 2.

Из данных табл. 2 ясно, что для многоцепных КЛ:

- самая большая опасность для персонала будет в случае прокладки фазных кабелей в ряд; здесь транспозиция фазных кабелей оказывается незаменима.
- минимальная опасность будет при прокладке фазных кабелей сомкнутым треугольником; здесь транспозиция фазных кабелей не столь необходима.

Расчеты из табл. 3 показывают, что при наличии транспозиции экранов нет особых проблем с безопасностью работ на отключенной цепи многоцепных линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помимо транспозиции экранов в сетях, построенных с помощью однофазных кабелей, имеет смысл обсудить целесообразность транспозиции самих кабелей.

Транспозиция экранов кабелей – это способ радикальной борьбы с токами в экранах той цепи, для которой эта транспозиция сделана [1, 2].

Транспозиция фазных кабелей – это способ снижения:

- температуры наиболее нагретой фазы (крайней) одноцепной кабельной линии, что может быть полезно при прокладке фазных кабелей в ряд и простом двустороннем заземлении их экранов;
- наведенных токов и напряжений на экраны соседних цепей многоцепной кабельной линии, что весьма важно для безопасного монтажа, обслуживания, ремонта, особенно при прокладке фазных кабелей в ряд.

Необходимость в транспозиции фазных кабелей может быть подтверждена расчетами, аналогичными табл. 1–3, и зависит от взаимного расположения кабелей и схемы заземления их экранов, числа цепей и расстояния между ними, от длины кабеля и токов нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 2(44).
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 152 с.