

## **Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения**

к.т.н. Дмитриев М.В. (ЗАО «Завод энергозащитных устройств»)

д.т.н. Евдокунин Г.А (СПбГПУ)

### **1. Введение**

В последнее время силовые кабели высокого напряжения 110-500 кВ современных конструкций все более широко используются для передачи и распределения электроэнергии, особенно в крупных городах и на промышленных предприятиях, где уровень электропотребления и плотность нагрузки весьма значительны. Наибольшее распространение получают силовые однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Высокий уровень напряжения токопроводящей жилы кабеля приводит к необходимости использования металлического экрана. Основным назначением металлического экрана является устранение электрического поля на поверхности кабеля. Для снижения напряжения на экране выполняется его заземление в одной или нескольких точках. Способ заземления экрана кабеля влияет:

- на электрические потери в кабеле (в экране), а значит на его тепловой режим и пропускную способность;
- на величину напряжения на экране в нормальных и аварийных режимах, т.е. на надежность работы кабеля и безопасность его обслуживания;
- на основные электрические параметры кабеля (активное и индуктивное сопротивление).

Экраны кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена выполнены из хорошо проводящего материала (алюминия или меди); их заземление более чем в одной точке ведет к появлению значительных токов, сопоставимых с током жилы кабеля. Если по условиям ограничения напряжения на экране обязательно его заземление в нескольких точках, то для снижения токов в экранах трехфазной группы однофазных кабелей может быть применена транспозиция экранов.

В статье рассмотрены вопросы заземления экранов таких однофазных кабелей; получены аналитические выражения для токов и напряжений на экранах кабеля, позволяющие обосновать необходимость транспозиции экранов и выбрать число циклов транспозиции. Кроме того, здесь представлены формулы для определения продольных активных и индуктивных сопротивлений кабелей (прямой и нулевой последовательностей), которые необходимы в расчетах нормальных режимов и при анализе токов короткого замыкания в сети.

Существуют достаточно точные формулы для расчета погонных параметров кабелей, конструкция которых приведена на рис.1, в том числе с учетом взаимного пофазного влияния при их трехфазном исполнении и при прокладке в земле, а также с учетом частотных зависимостей этих параметров. Точные формулы впервые приведены в зарубежной публикации [1] (кроме

того, их можно найти в отечественной монографии [2]). Формулы достаточно сложны и без специальных компьютерных программ по их расчету неудобны в использовании.

В статье приведены формулы для погонных параметров кабелей при их упрощенном определении, а также дана методика расчета токов и напряжений в установившихся и квазиустановившихся режимах. Аналитические расчеты с использованием предлагаемых упрощений дают хорошее совпадение с результатами, использующими точные параметры, кроме того, они подтверждаются расчетами, полученными при подробном компьютерном моделировании процессов в известном канадско-американском программном комплексе EMTP-ATP (Electromagnetic Transients Program [3]).

Важным является вопрос обеспечения защиты изоляции кабеля от грозовых и иных перенапряжений. Для защиты изоляции «жила-экран» применяются типовые ОПН соответствующего класса напряжения сети, а для защиты изоляции «экран-земля» применяются ОПН специального типа, устанавливаемые в незаземленных концах экранов и в узлах транспозиции. Выбор характеристик перечисленных ОПН, в частности, базируется на результатах расчетов напряжений промышленной частоты на изоляции экрана, которые можно выполнить по предлагаемой в статье методике или с использованием EMTP. Однако, в полном объеме вопросы определения характеристик ОПН здесь не рассматриваются, их предполагается обсудить в специальной статье.

## 2. Упрощенная расчетная методика

Получим расчетные выражения для параметров кабелей, основываясь на известных формулах для собственных и взаимных погонных активно-индуктивных сопротивлений многопроводной системы провода-земля, расположенной над поверхностью земли. В этом случае расстояние до земли не имеет значения, т.к. для расчетов режимов на промышленной частоте 50 Гц «обратные провода» находятся в земле на глубине  $D_3$ , составляющей сотни метров.

Расстояние  $D_3$ , а также активное сопротивление земли  $R_3$ , можно определять упрощенно (например, по Рюденбергу, табл.2, см.[4]). При вычислении емкостных параметров кабелей они предполагаются, как это имеет место, находящимися под землей (глубина залегания здесь не имеет значения).

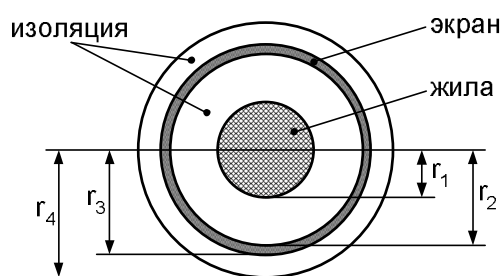


Рис.1. Однофазный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Табл.1. Основные используемые обозначения.

Величина	Обозначение
Внешний радиус жилы ( <i>м</i> )	$r_1$
Внутренний радиус экрана ( <i>м</i> )	$r_2$
Внешний радиус экрана ( <i>м</i> )	$r_3$
Внешний радиус кабеля ( <i>м</i> )	$r_4$
Сечение жилы ( $м^2$ )	$F_{ж} = \pi \cdot r_1^2$
Сечение экрана ( $м^2$ )	$F_{э} = \pi \cdot (r_3^2 - r_2^2)$
Длина кабеля ( <i>м</i> )	$l$
Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции между жилой и экраном ( <i>о.е.</i> )	$\varepsilon_1$
Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции экрана ( <i>о.е.</i> )	$\varepsilon_2$
Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ( $\Phi / м$ )	$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$
Абсолютная магнитная проницаемость вакуума ( $Гн / м$ )	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
Удельное сопротивление материала жилы ( $Ом \cdot м$ )	$\rho_{ж}$
Удельное сопротивление материала экрана ( $Ом \cdot м$ )	$\rho_{э}$
Удельное сопротивление грунта $Ом \cdot м$	$\rho_3$
Расстояние между осями соседних фаз в случае расположения в вершинах равностороннего треугольника ( <i>м</i> )	$s$
Глубина заложения кабеля ( <i>м</i> )	$h$
Круговая частота напряжений и токов ( $рад / с$ )	$\omega = 2\pi f$
Частота напряжений и токов ( $Гц$ )	$f$
Мнимая единица	$j = \sqrt{-1}$

При определении параметров кабеля (табл.2-3) были сделаны следующие допущения:

1. геометрия расположения в пространстве трехфазной системы кабелей такова, что  $s \gg r_3$ ;
2. если фазы кабеля расположены в вершинах равностороннего треугольника, т.е. в виде «трилистника», то  $s = d_{AB} = d_{BC} = d_{AC}$ ; если фазы кабеля расположены на одном уровне («flat-расположение»  $d_{AC} = 2d_{AB} = 2d_{BC}$ ), то при транспозиции **жил** кабеля  $s = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}} = 1.26 \cdot d_{AB}$ .
3. экран кабеля упрощенно считаем таким, что  $r_3 \gg (r_3 - r_2)$ ; это позволяет пренебречь конечной толщиной экрана и в расчетах использовать лишь его внутренний радиус;
4. пренебрегаем токами смещения в земле;
5. пренебрегаем эффектом близости на промышленной частоте, считая активные сопротивления жил и экранов как на постоянном токе.

Табл.2. Основные электрические параметры кабеля.

Активное сопротивление жилы (Ом/м)	$R_{ж}^* = \rho_{ж} \frac{1}{F_{ж}}$
Активное сопротивление экрана (Ом/м)	$R_{э}^* = \rho_{э} \frac{1}{F_{э}}$
Активное сопротивление земли (Ом/м)	$R_3^* = \frac{\pi}{4} \mu_0 f$
Эквивалентная глубина (м)	$D_3 = 2.24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}}$
Собственная индуктивность жилы (Гн/м)	$L_{ж}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D_3}{r_1} \right)$
Собственная индуктивность экрана (Гн/м)	$L_{э}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D_3}{r_2} \right)$
Взаимная индуктивность между жилой (экраном) и соседним кабелем (Гн/м)	$M_K^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D_3}{s} \right)$
Взаимная индуктивность между жилой и экраном одного и того же кабеля (Гн/м)	$M_{жэ}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{D_3}{r_2} \right)$
Емкость между жилой и экраном (Ф/м)	$C_{жэ}^* = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$
Емкость между экраном и землей (Ф/м)	$C_э^* = \frac{2\pi\epsilon_2\epsilon_0}{\ln \frac{r_4}{r_3}}$

Табл.3. Собственные и взаимные погонные сопротивления кабеля.

Собственное сопротивление жилы (Ом/м)	$\dot{Z}_{ж}^* = R_3^* + R_{ж}^* + j\omega L_{ж}^*$
Собственное сопротивление экрана (Ом/м)	$\dot{Z}_{э}^* = R_3^* + R_{э}^* + j\omega L_{э}^*$
Взаимное сопротивление жилы (экрана) и соседнего кабеля (Ом/м)	$\dot{Z}_K^* = R_3^* + j\omega M_K^*$
Взаимное сопротивление между жилой и экраном одного и того же кабеля (Ом/м)	$\dot{Z}_{жэ}^* = R_3^* + j\omega M_{жэ}^*$

Падения напряжений вдоль жил и экранов кабелей связаны с токами в них следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{U}_{жА} &= \dot{Z}_{ж} \dot{I}_{жА} + \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_{эА} + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жВ} + \dot{I}_{эВ}) + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}) \\
 \Delta \dot{U}_{жВ} &= \dot{Z}_{ж} \dot{I}_{жВ} + \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_{эВ} + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жА} + \dot{I}_{эА}) + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}) \\
 \Delta \dot{U}_{жС} &= \dot{Z}_{ж} \dot{I}_{жС} + \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_{эС} + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жА} + \dot{I}_{эА}) + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жВ} + \dot{I}_{эВ}) \\
 \Delta \dot{U}_{эА} &= \dot{Z}_{э} \dot{I}_{эА} + \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_{жА} + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жВ} + \dot{I}_{эВ}) + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}) \\
 \Delta \dot{U}_{эВ} &= \dot{Z}_{э} \dot{I}_{эВ} + \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_{жВ} + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жА} + \dot{I}_{эА}) + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жС} + \dot{I}_{эС}) \\
 \Delta \dot{U}_{эС} &= \dot{Z}_{э} \dot{I}_{эС} + \dot{Z}_{жэ} \dot{I}_{жС} + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жА} + \dot{I}_{эА}) + \dot{Z}_K (\dot{I}_{жВ} + \dot{I}_{эВ})
 \end{aligned} \tag{1}$$

В системе всего 6 уравнений относительно 6-ти напряжений и 6-ти токов, следовательно, необходимо задать дополнительно еще 6 величин: падения напряжений (или токи) и (или) граничные условия. В правой части системы (1) сомножителями у токов выступают полные сопротивления кабеля, определяемые произведением соответствующих погонных сопротивлений (по табл.3) на длину кабеля  $l$ .

Для определения погонных продольных активно-индуктивных сопротивлений трехфазной системы однофазных кабелей токам прямой и нулевой последовательностей, которые используются в расчетах нормальных и аварийных режимов работы сети, необходимо указать состояние экрана кабеля (граничные условия), от которого эти параметры зависят (табл.4):

Табл.4. Состояние экрана и граничные условия.

№	Состояние экрана	Схема	Граничные условия
1	Разземлен		$\dot{i}_{ЭА} = 0$ $\dot{i}_{ЭВ} = 0$ $\dot{i}_{ЭС} = 0$
2	Заземлен с одной стороны		$\dot{i}_{ЭА} = 0$ $\dot{i}_{ЭВ} = 0$ $\dot{i}_{ЭС} = 0$
3	Заземлен с двух сторон		$\Delta \dot{U}_{ЭА} = 0$ $\Delta \dot{U}_{ЭВ} = 0$ $\Delta \dot{U}_{ЭС} = 0$
4	Применена транспозиция экранов ( $N$ полных циклов, на рис. показано $N = 1$ )		$\Delta \dot{U}_{ЭА} = 0$ $\Delta \dot{U}_{ЭВ} = 0$ $\Delta \dot{U}_{ЭС} = 0$ <p>См. примеч.3</p>

Примечания.

1. В п.2 таблицы пренебрегаем емкостными токами в начале кабеля.
2. В п.3,4 пренебрегаем сопротивлениями заземления экрана.

3. В п.4 необходимо учесть граничные условия для токов в узлах транспозиции, для чего система (1) записывается для каждого участка между узлами транспозиции (т.е. 3 раза при  $N = 1$ ), и токи в экранах (а также напряжения) в конце участка приравниваются токам (и напряжениям) в начале другого участка в соответствии с рисунком.

После задания граничных условий искомые параметры из (1) находятся путем указания некоторых дополнительных условий, характеризующих решаемую задачу. Так, например, если трехфазная система падений напряжений, приложенных к жилам, образует систему прямой последовательности, то при оговоренных условиях имеем полное основание считать, что токи в жилах и экранах также образуют системы прямой последовательности, а тогда дополнительные условия будут выглядеть так, как показано в первой строке табл. 5. Так как искомые сопротивления прямой последовательности находятся путем деления падения напряжения в фазе А на ток в этой фазе, то двух указанных условий достаточно. Аналогичные рассуждения приводят к формулировкам дополнительных условий во 2-3-ей строках табл.5.

Окончательные формулы для расчетов продольных активно-индуктивных параметров трехфазного кабеля по прямой и нулевой последовательностям приведены в табл.6.

Табл.5. Дополнительные условия для нахождения параметров трехфазного кабеля и расчетов некоторых режимов с помощью системы (1).

Решаемая задача	Дополнительные условия
Определение сопротивления прямой последовательности кабеля	$\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЖС} = 0$ $\dot{I}_{ЭА} + \dot{I}_{ЭВ} + \dot{I}_{ЭС} = 0$
Определение сопротивления нулевой последовательности кабеля	$\dot{I}_{ЖА} = \dot{I}_{ЖВ} = \dot{I}_{ЖС}$ $\dot{I}_{ЭА} = \dot{I}_{ЭВ} = \dot{I}_{ЭС}$
Определение токов и напряжений в экране кабеля в нормальном режиме	$\dot{I}_{ЖА} + \dot{I}_{ЖВ} + \dot{I}_{ЖС} = 0$ $\dot{I}_{ЭА} + \dot{I}_{ЭВ} + \dot{I}_{ЭС} = 0$
Определение токов и напряжений в экране кабеля в аварийном режиме (внешнее по отношению к кабелю короткое замыкание фазы А на землю)	$\dot{I}_{ЖА} \gg \dot{I}_{ЖВ} \text{ и } \dot{I}_{ЖА} \gg \dot{I}_{ЖС}$ <p style="text-align: center;">или</p> $\dot{I}_{ЖВ} = 0 \text{ и } \dot{I}_{ЖС} = 0$

Табл.6. Формулы для расчетов продольных параметров кабеля по прямой и нулевой последовательностям.

№	Состояние экрана	Сопротивление прямой последовательности	Сопротивление нулевой последовательности
1	Разземлен	$\dot{Z}_1^* = \dot{Z}_{Ж}^* - \dot{Z}_К^*$	$\dot{Z}_0^* = \dot{Z}_{Ж}^* + 2\dot{Z}_К^*$
2	Заземлен с одной стороны	$\dot{Z}_1^* = \dot{Z}_{Ж}^* - \dot{Z}_К^*$	$\dot{Z}_0^* = \dot{Z}_{Ж}^* + 2\dot{Z}_К^*$
3	Заземлен с двух сторон	$\dot{Z}_1^* = (\dot{Z}_{Ж}^* - \dot{Z}_К^*) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_К^*)^2}{\dot{Z}_Э^* - \dot{Z}_К^*}$	$\dot{Z}_0^* = (\dot{Z}_{Ж}^* + 2\dot{Z}_К^*) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_К^*)^2}{\dot{Z}_Э^* + 2\dot{Z}_К^*}$
4	Применена транспозиция экранов ( $N$ полных циклов)	$\dot{Z}_1^* = \dot{Z}_{Ж}^* - \dot{Z}_К^*$	$\dot{Z}_0^* = (\dot{Z}_{Ж}^* + 2\dot{Z}_К^*) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_К^*)^2}{\dot{Z}_Э^* + 2\dot{Z}_К^*}$

Напряжения (табл.7) и токи (табл.8) в экранах кабеля определены в двух расчетных случаях: в нормальном симметричном установившемся режиме работы и в аварийном квазиустановившемся режиме однофазного короткого замыкания в сети вне кабеля.

С помощью табл.7 можно вычислить напряжение на экране кабеля относительно земли, для чего:

- коэффициент в строке 1 надо умножить на фазное значение напряжения сети, питающей кабель ( $U_{Ж}$ );
- коэффициенты в строках 2-4 надо умножить на длину кабеля  $l$  и ток  $I_{Ж}$ , протекающий в его жиле (в нормальном режиме – это ток нагрузки, а в аварийном режиме – ток однофазного короткого замыкания сети).

Табл.7а. Напряжение (В), наводимое на экран кабеля относительно земли в нормальном режиме работы.

№	Состояние экрана	Нормальный режим работы	
		коэффициент	сомножитель
1	Разземлен	$\frac{C_{ЖЭ}^*}{C_{ЖЭ}^* + C_{Э}^*}$	$U_{Ж}$
2	Заземлен с одной стороны	$\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_К^*$	$I_{Ж} \cdot l$
3	Заземлен с двух сторон	$\approx 0$	
4	Применена транспозиция экранов ( $N$ полных циклов)	$\frac{1}{3N}(\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_К^*)$	

Табл.7б. Напряжение (В), наводимое на экран кабеля относительно земли в аварийном режиме однофазного короткого замыкания вне кабеля.

№	Состояние экрана	Режим однофазного короткого замыкания	
		коэффициент	сомножитель
1	Разземлен	$\frac{C_{ЖЭ}^*}{C_{ЖЭ}^* + C_{Э}^*}$	$U_{Ж}$
2	Заземлен с одной стороны	$\dot{Z}_{ЖЭ}^*$	$I_{Ж} \cdot l$
3	Заземлен с двух сторон	$\approx 0$	
4	Применена транспозиция экранов ( $N$ полных циклов)	$\frac{2}{9N} (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_{К}^*)$	

Табл.8. Токи в экранах фаз кабеля.

№	Состояние экрана	Нормальный режим работы	Режим однофазного короткого замыкания вне кабеля
1	Разземлен	$\approx 0$	$\approx 0$
2	Заземлен с одной стороны	$\dot{i}_{ЭА} = j\omega(C_{ЖЭ}^* \cdot l) \cdot \dot{U}_{ЖА}$ $\dot{i}_{ЭВ} = j\omega(C_{ЖЭ}^* \cdot l) \cdot \dot{U}_{ЖВ}$ $\dot{i}_{ЭС} = j\omega(C_{ЖЭ}^* \cdot l) \cdot \dot{U}_{ЖС}$	$\dot{i}_{ЭА} = j\omega(C_{ЖЭ}^* \cdot l) \cdot \dot{U}_{ЖА}$ $\dot{i}_{ЭВ} = j\omega(C_{ЖЭ}^* \cdot l) \cdot \dot{U}_{ЖВ}$ $\dot{i}_{ЭС} = j\omega(C_{ЖЭ}^* \cdot l) \cdot \dot{U}_{ЖС}$
3	Заземлен с двух сторон	$\dot{i}_{ЭА} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{К}^*} \dot{i}_{ЖА}$ $\dot{i}_{ЭВ} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{К}^*} \dot{i}_{ЖВ}$ $\dot{i}_{ЭС} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{К}^*} \dot{i}_{ЖС}$	$\dot{i}_{ЭА} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_{К}^* \frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* + 2\dot{Z}_{К}^*}}{\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{К}^*} \dot{i}_{ЖА}$ $\dot{i}_{ЭВ} = -\frac{\dot{Z}_{К}^* (\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{ЖЭ}^*)}{(\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{К}^*) (\dot{Z}_{Э}^* + 2\dot{Z}_{К}^*)} \dot{i}_{ЖА}$ $\dot{i}_{ЭС} = -\frac{\dot{Z}_{К}^* (\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{ЖЭ}^*)}{(\dot{Z}_{Э}^* - \dot{Z}_{К}^*) (\dot{Z}_{Э}^* + 2\dot{Z}_{К}^*)} \dot{i}_{ЖА}$
4	Применена транспозиция экранов ( $N$ полных циклов)	$\dot{i}_{ЭА} = j\omega \cdot \frac{C_{ЖЭ}^* l}{3N} \cdot U_{ЖА} \cdot \left( \frac{3}{4} - j \frac{\sqrt{3}}{4} \right)$ $I_{ЭА} =  \dot{i}_{ЭА}  = \omega \cdot \frac{C_{ЖЭ}^* l}{2N\sqrt{3}} \cdot U_{ЖА}$	$\dot{i}_{ЭА} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* + 2\dot{Z}_{К}^*} \cdot \frac{\dot{i}_{ЖА}}{3}$ $\dot{i}_{ЭВ} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* + 2\dot{Z}_{К}^*} \cdot \frac{\dot{i}_{ЖА}}{3}$ $\dot{i}_{ЭС} = -\frac{\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_{К}^*}{\dot{Z}_{Э}^* + 2\dot{Z}_{К}^*} \cdot \frac{\dot{i}_{ЖА}}{3}$

В качестве примера рассмотрим определение требуемого числа циклов транспозиции экранов для системы из трех однофазных кабелей 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена марки 2×S(FL)2Y1×1000 RMS/185+FO64/110/123kV длиной 8.1 км.

Параметры кабеля:  $r_1 = 20.6 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_2 = 38.3 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_3 = 39.3 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_4 = 46 \cdot 10^{-3}$  м,  $\varepsilon_1 = 2.4$  о.е.,  $\varepsilon_2 = 2.4$  о.е. (данные [5]),  $s = 0.22$  м,  $h = 1.4$  м,  $l = 8100$



$m$ ,  $f = 50$  Гц,  $\rho_{ж} = 2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (жила сделана из меди),  $\rho_{э} = 2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (экран сделан из меди),  $\rho_{з} = 1000$  Ом·м.

Если экран не заземлять, то по формулам табл.7 на нем относительно земли будет 20% фазного напряжения сети, что недопустимо.

Если экран заземлить только на одном из концов кабеля, то:

- в нормальном режиме (по формулам табл.7а) на разомкнутом конце получим напряжение 0.88 В на один Ампер тока в жиле; при токе в жиле 1000 А получим напряжение на экране 880 В, что допустимо для изоляции экрана (но недопустимо для персонала в случае возможности прикосновения к экрану);
- в аварийном режиме (по формулам табл.7б) на разомкнутом конце получим напряжение 5.8 В на один Ампер тока в жиле; даже при токе короткого замыкания всего 10 кА имеем напряжение около 58 кВ, что недопустимо для изоляции экрана, т.е., очевидно, требуется заземление экрана на обоих концах кабеля.

Если экран кабеля заземлен на обоих его концах, то (по формулам табл.8) получим ток в экране кабеля  $|\dot{I}_{ЭА}| = 0.8 \cdot |\dot{I}_{ЖА}|$ , т.е. в экране кабеля протекает ток, сопоставимый с током жилы, что недопустимо, учитывая малое сечение экрана (185 мм<sup>2</sup>) по сравнению с сечением жилы (1000 мм<sup>2</sup>). Следовательно, для рассматриваемого кабеля необходима транспозиция экранов.

Согласно табл.8 в случае транспозиции экранов в нормальном режиме работы тока в экране нет (есть емкостный ток, составляющий единицы ампер). При внешнем однофазном коротком замыкании (согласно табл.8) в экранах трех фаз кабеля протекают равные токи, каждый из которых составляет приблизительно треть от тока короткого замыкания, протекающего в жиле кабеля аварийной фазы сети.

Из табл.7а,б следует, что напряжение на экране относительно земли в узле транспозиции:

- в нормальном режиме составляет 0.292 В на один Ампер тока жилы; при токе 1000 А получим напряжение 292 В, которое допустимо для изоляции экрана;
- в аварийном режиме составляет 0.195 В на один Ампер тока жилы; при токе короткого замыкания 20 кА получим напряжение 3.8 кВ, которое допустимо для изоляции экрана и допустимо для ОПН, установленных между экраном и землей в узлах транспозиции для защиты изоляции экран-земля от перенапряжений.

Полученные результаты хорошо согласуются с расчетами, выполненными при подробном моделировании процессов в программном комплексе ЕМТР. Учитывая результаты аналитических и компьютерных расчетов, требуемая схема соединения экранов рассмотренного кабеля длиной 8.1 км приведена на рис.2.

В том случае, если бы ток короткого замыкания составлял, например, 40 кА, напряжение в узле транспозиции в аварийном режиме было бы 7.6 кВ, что недопустимо для ОПН, характеристики которого согласованы с прочностью

изоляции экрана и не могут быть изменены. Поэтому потребовался бы не один, а два цикла транспозиции.

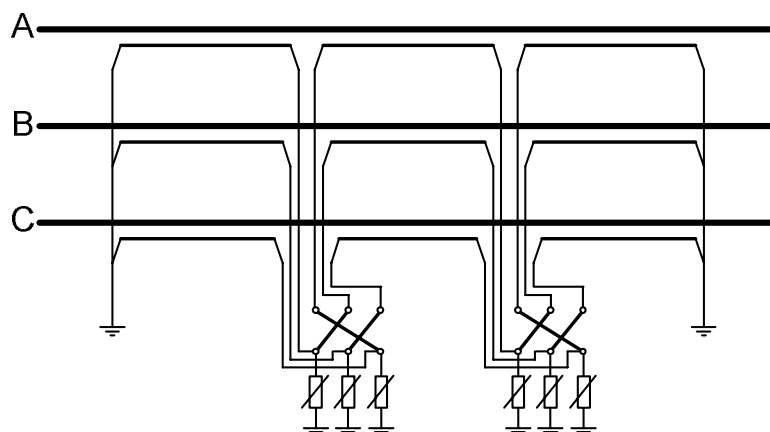


Рис.2. Схема соединения экранов группы из трех однофазных кабелей 110 кВ длиной 8.1 км с изоляцией из сшитого полиэтилена.

### 3. Выводы

Результаты расчетов сопротивлений прямой и нулевой последовательностей трехфазной группы однофазных кабелей, а также токов и напряжений в их экранах на промышленной частоте не отличаются друг от друга более, чем на 10% при использовании упрощенных формул для погонных параметров по сравнению с более точными. Расчеты, проведенные в программном комплексе EMTP при подробном моделировании условий прокладки и конструкции кабеля и использовании уравнений кабеля с частотно-зависимыми параметрами, также подтвердили возможность проведения подобных расчетов с использованием упрощенных формул для первичных параметров однофазных кабелей.

Приведенная методика расчета параметров и режимов однофазных кабелей высших классов напряжений может быть применена для аналогичных расчетов в случае однофазных кабелей средних классов напряжений 6-35 кВ.

### Список использованных источников

1. Wedepohl L.M., Welcox D.J. Transient analysis of underground power transmission systems. Proc. Inst. El. Eng., 1973, vol.120, N2, pp.253-260.
2. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов Н.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. –Л.: Наука, 1988, –302 с.
3. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, USA,1986 ([www.emtp.org](http://www.emtp.org)).
4. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети. – СПб.: Издательство Сизова М.П., 2004, –304 с.
5. Power cables and their application/ ed.: Lothar Heinhold. –Berlin; Munchen: Siemens-Aktienges./ Part 1, 3<sup>rd</sup> revised edition, 1990.