

Кабельные линии с однофазными кабелями нашли применение в сетях всех классов напряжения от 6 до 500 кВ. Одной из серьезных проблем, которая до сих пор не решена, является определение достаточной величины сопротивления заземления коробок (колодцев) транспозиции экранов кабельных линий.

Новый метод расчета этой величины, по мнению Михаила Викторовича Дмитриева, позволит рационально решить существующую проблему.

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ 6–500 кВ С ОДНОФАЗНЫМИ КАБЕЛЯМИ

Требования к заземлению узлов транспозиции экранов

Существует несколько схем соединения и заземления экранов кабельных линий [1]:

- заземление с двух сторон;
- заземление с одной стороны;
- заземление с двух сторон и транспозиция экранов по трассе кабеля (рис. 1).

Недостатком заземления с двух сторон являются наведенные в экранах токи промышленной частоты и вызванные ими потери активной мощности, которые приводят к:

- к необходимости снижать токовую нагрузку на кабель для исключения перегрева его изоляции, т.е. порой имеет место существенное недоиспользование пропускной способности кабеля, крайне нежелательное из-за высокой стоимости кабельных линий;
- к прямому экономическому ущербу из-за необходимости оплаты этих потерь мощности, стоимость которых пропорциональна длине кабеля (хотя сам ток в экране не зависит от длины линии).

Во многих случаях два перечисленных фактора вместе или раздельно таковы, что простое двустороннее заземление экранов недопустимо [1]. Тогда следует применять или одностороннее заземление экранов, или же их транспозицию. Обе эти схемы заземления позволяют достичь одного и того же результата – исключить потери в экранах и повысить пропускную способность кабеля, порой на 30–40%.

Отказ от двустороннего заземления экранов приводит к появлению на экране относительно земли напряжения промышленной частоты. Его величина такова, что одностороннее заземление экранов, являющееся самым простым способом борьбы с токами и потерями в экранах, оказывается применимо лишь для кабелей длиной до нескольких сотен метров. Для более протяженных кабелей приходится применять транспозицию экранов, при которой погонное наводимое на экраны напряжение меньше, чем при одностороннем заземлении. Увеличение числа циклов транспозиции сверх одного полного цикла бесполезно для борьбы с токами и потерями в экранах (ведь их нет даже при одном полном цикле), но бывает необходимо для дополнительного снижения напряжения на экранах.

Транспозиция экранов является сложным техническим решением, поскольку требуется применение специальных транспозиционных муфт с выводами экранов наружу. Экраны кабеля выводятся из муфт при помощи «провода с полиэтиленовой изоляцией соединительного» (ППС), имеющего медную жилу и изоляцию класса 10 кВ. Провода ППС заводятся в специальные коробки транспозиции, где они снабжаются наконечниками, осуществляется их перекрестное соединение друг с другом, а также устанавливаются ОПН для защиты оболочки кабеля (изоляция экрана) от наведенных с жилы импульсных перенапряжений.

Коробки транспозиции размещаются в доступных для персонала местах – в специальных подземных колодцах транспозиции. Корпус коробки транспозиции должен быть механически прочным и герметичным, он выполняется из металла и требует присоединения к контуру заземления, который приходится

преднамеренно создавать, поскольку места транспозиции экранов расположены по трассе кабеля на удалении от конечных распределительных устройств и имеющих там контуров.

Требования к заземляющему устройству коробок (колодцев) транспозиции до сих пор не предъявлялись. В отсутствие как требований, так и методик расчета проектировщики и экспертные организации вынуждены опираться на ПУЭ [2], где для электроустановок высокого напряжения указана необходимость иметь сопротивление заземления не более 0,5 Ом.

Но, как правило, кабельные линии прокладывают в стесненных условиях, и рядом с колодцами транспозиции экранов нет возможности обустроить контур заземления со столь малым сопротивлением как 0,5 Ом. Поэтому для кабельных сетей 6–500 кВ крайне важно создание методики расчета достаточного сопротивления заземления коробок (колодцев) транспозиции экранов, и, желательно, чтобы требования к нему не были столь жесткими, как это диктует ПУЭ.

РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ

Конструкция коробки транспозиции схематично показана на рис. 1 и включает в себя три переемычки, смонтированные на опорных изоляторах, и три ограничителя перенапряжений ОПН, включенные между экранами и землей.

Назначение заземляющего устройства, имеющего сопротивление $R_{зз}$, в узле транспозиции следующее:

- защитное заземление металлического корпуса коробки транспозиции на случай нарушения ее внутренней изоляции (см. красную стрелку на рис. 1);
- рабочее заземление ОПН для отведения импульсных токов в землю.

Толщина оболочки кабельных линий 6–500 кВ составляет примерно 5 мм, что отвечает изоляции класса 6–10 кВ, поэтому почти всегда вне зависимости от номинального напряжения кабеля в коробках транспозиции применяют одни и те же ОПН класса напряжения 6 кВ [1].

В экранах кабелей нет собственных источников импульсных перенапряжений, они наводятся с жилы кабеля и ограничены взаимным сопротивлением между жилой и экраном. Как следствие – в экранных ОПН не бывает импульсных токов значительной величины, а суммарное падение напряжения на ОПН 6 кВ и цепи его заземления даже при сопротивлениях заземления 10–20 Ом с достаточным запасом меньше напряжений, допустимых для оболочки кабеля.

Иными словами, ОПН выполняет свои защитные функции в широком диапазоне значений сопротивления заземления коробки (колодца) транспозиции, и работа ОПН не предъявляет особых требований к контуру заземления.

Требования к контуру заземления определяются прежде всего вопросами обеспечения безопасности людей и животных в случае нарушения изоляции внутри коробки транспозиции. Опасность существует:

- для персонала, который выполняет работы внутри колодца транспозиции и может попасть под напряжение прикосновения;



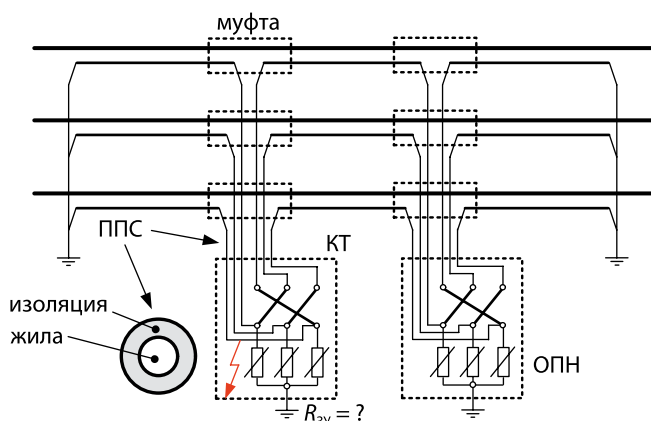
Михаил Дмитриев,

к.т.н., ЗАО «Завод энергозащитных устройств»,

г. Санкт-Петербург

Один полный цикл транспозиции экранов однофазных кабелей

Рис. 1 •



– для случайных прохожих, которые могут попасть под шаговое напряжение, находясь рядом с колодцем транспозиции.

Оболочка кабельных линий 6–500 кВ с периодичностью один раз в год (или в несколько лет) эксплуатации проверяется на целостность путем измерения её сопротивления при постоянном напряжении 10 кВ, прикладываемом на 1 (или 10) мин. между экраном кабеля и землей. На время этих испытаний ОПН 6 кВ, размещенные в коробках транспозиции, следует отсоединять от экранов кабеля с целью предотвращения повреждения ОПН повышенным напряжением «экран-земля», а также для проверки исправности самих ОПН. Таким образом, вскрытие коробки транспозиции, осмотр ее содержимого, испытания изоляции и ОПН происходят с достаточно большой периодичностью, а между такими осмотрами состояние коробки не контролируется. Следовательно, возникшее по каким-то причинам нарушение изоляции внутри такой коробки и появившееся напряжение прикосновения и шаговое напряжение могут существовать несколько месяцев или даже лет, создавая реальную угрозу людям.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В [1] было показано, что в узле транспозиции на экране кабеля относительно земли существует напряжение промышленной частоты $\dot{U}_Э$.

В случае нарушения изоляции внутри коробки экран кабеля оказывается соединенным с корпусом коробки и через него с заземляющим устройством R_{3y} . Коэффициент, учитывающий снижение напряжения на экране после его глухого соединения с заземленным корпусом коробки транспозиции («металлическое» повреждение внутри коробки), обозначим как \dot{K}_{3y} (комплексная величина):

$$\dot{U}_К = \dot{K}_{3y} \cdot \dot{U}_Э .$$

Потенциал корпуса коробки $\dot{U}_К$ вызывает напряжение прикосновения в колодце и шаговое напряжение вблизи от колодца за его пределами. Поскольку колодцы, как правило, выполняются железобетонными, то в них есть возможность выполнить систему уравнивания потенциалов и снизить напряжение прикосновения до безопасного. Тогда основное внимание следует сосредоточить на расчете шагового напряжения на поверхности земли вокруг колодца, которое связано с потенциалом корпуса коробки через коэффициент шага K_{III} (вещественная величина):

$$\dot{U}_{III} = K_{III} \cdot \dot{U}_К .$$

Методика расчета достаточной величины сопротивления заземления коробок транспозиции, таким образом, может быть построена на расчете шагового напряжения $\dot{U}_{III} = K_{III} \cdot \dot{K}_{3y} \cdot \dot{U}_Э$, и сравнении его модуля с допустимым значением:

$$U_{III} = K_{III} \cdot K_{3y} \cdot U_Э . \quad (1)$$

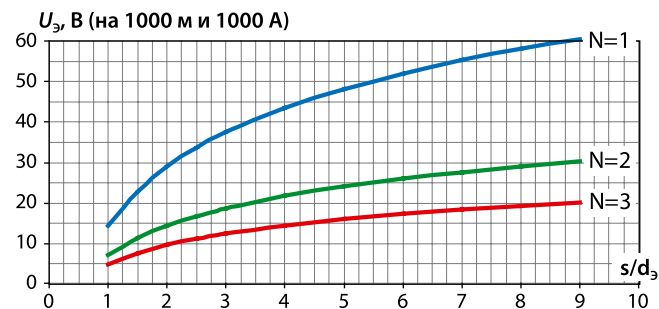
Шаговое напряжение (1) можно рассчитывать:

- в нормальном режиме;
- при коротких замыканиях.

• Таблица 1. Расчетные случаи

Сеть	Расчетный случай	Формула для $\dot{U}_Э$
6–35 и 110–500 кВ	Нормальный режим	$\frac{1}{3N} \cdot (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot I_{Ж} \cdot L_K$
6–35 кВ	Внешнее К(1,1)	$\frac{\sqrt{3}}{6N} \cdot (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot I_{K(3)} \cdot L_K$
110–500 кВ	Внешнее К(1)	$\frac{2}{9N} \cdot (\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_K^*) \cdot I_{K(1)} \cdot L_K$

• Рис. 2. Напряжение $U_Э$ на экране относительно земли по (2) на 1000 м длины кабеля при токе жилы 1000 А



В качестве допустимого значения напряжения шага принимают напряжение прикосновения. Согласно [3] оно составляет:

- до 20 В неограниченно долго;
- до 200 В при времени воздействия 0,5 с;
- до 500 В при времени воздействия 0,1 с.

Шаговое напряжение в нормальном режиме работы должно сравниваться с допустимым значением 20 В. Шаговое напряжение при КЗ в зависимости от времени его отключения должно сравниваться со значениями 200 или 500 В.

КЗ могут быть как в самом кабеле (повреждение изоляции «жила-экран»), так и во внешней по отношению к нему сети. При внутреннем повреждении ток КЗ из жилы через место повреждения попадает на экран и далее в его заземляющие устройства, расположенные по концам кабеля. Напряжение на экране относительно земли при этом может достигать единиц-десятков кВ и совместно с термическим воздействием тока КЗ (и его дуги) приводит к множественным повреждениям оболочки кабеля. Рассчитать напряжение U_{III} в такой ситуации не представляется возможным. Поэтому основное внимание следует сосредоточить на КЗ во внешней по отношению к кабелю сети, а не в самом кабеле.

КЗ вне кабеля могут быть однофазные К(1), двойные К(1,1), двухфазные К(2) на землю и без земли, трехфазные К(3). Сложно представить такое стечение обстоятельств, когда люди оказались бы рядом с колодцем транспозиции, в котором расположена коробка с металлическим соединением экрана с корпусом, а во внешней сети при этом произошло многофазное КЗ. Очевидно, из всех видов КЗ расчет U_{III} достаточно проводить лишь при однофазном КЗ с током $I_{K(1)}$.

В сетях 6–35 кВ однофазное повреждение не сопровождается появлением токов КЗ, поэтому для этих сетей КЗ можно не рассматривать вовсе. Однако известны случаи, когда первое замыкание на землю в сети 6–35 кВ не отключается, и под действием перенапряжений на здоровых фазах в каком-то другом месте сети возникает второе замыкание на землю – в итоге в сети имеет место двойное повреждение изоляции. Наибольшее значение тока двойного КЗ $I_{K(1,1)}$ может быть оценено как $\sqrt{3}/2$ от тока трехфазного $I_{K(3)}$.

Расчет напряжения на экране $U_Э$

В [1] было показано, что напряжение промышленной частоты $U_Э$ «экран-земля» в узле транспозиции экранов зависит от тока в жиле кабеля $I_{Ж}$, от длины кабеля L_K и числа полных циклов транспозиции экранов N , а также от собственных и взаимных активно-индуктивных сопротивлений Z .

Расчетные случаи и формулы [1] приведены в табл. 1. Формулы табл. 1 можно упростить. Например, для нормального режима:

$$U_Э = \frac{1}{3N} \cdot X^* \cdot I_{Ж} \cdot L_K, \tag{2}$$

где $X^* = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{s}{r_2}\right) = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2s}{d_Э}\right);$

s – среднегеометрическое расстояние между осями трех фаз кабельной линии; $d_Э$ – диаметр экрана. Диаметр экрана можно оценить как $d_Э = d - 2\Delta_{ОБ}$, где d – внешний диаметр кабеля (по каталогу), $\Delta_{ОБ}$ – толщина его оболочки (можно принять равной 5 мм). При прокладке фаз кабеля вплотную друг к другу сомкнутым треугольником $s/d = 1$, что с учетом $d > d_Э$ дает соотношение $s/d_Э \approx (1 \div 1,5)$.

На практике как правило имеет место «неидеальная» транспозиция, при которой отличаются и длины участков кабеля между узлами транспозиции, и способ прокладки фаз кабеля (в треугольник, в ряд). Чтобы не усложнять расчета $U_Э$, будем считать транспозицию идеальной, при которой расстояние между фазами по трассе кабеля одинаково на всем ее протяжении и равно некому среднему s :

$$s = \frac{s_T L_T + s_P L_P}{L_K},$$

где фазы кабеля проложены треугольником (Т) и в ряд (Р) соответственно на протяжении участков длиной L_T и L_P , причем $L_T + L_P = L_K$.

Напомним, что если при прокладке сомкнутым треугольником $s_T = d$, то при прокладке в ряд (например, прокол под дорогой или рекой) $s_P = \sqrt[3]{d_{AB} d_{BC} d_{CA}} = 1,26 \cdot d_{AB}$, где d_{AB} – расстояние между осями ближайших фаз [1].

Результаты обобщающих расчетов по (2) приведены на рис. 2. Для кабельной линии произвольной длины L_K (м) и тока в жиле $I_{Ж}$ (А), напряжение на экране может быть найдено с помощью выражения:

$$U_Э = U_Э^{PIS} \cdot \frac{I_{Ж}}{1000} \cdot \frac{L_K}{1000}. \tag{3}$$

Использовать рис. 2 и выражение (3) можно не только для нормального режима, но и для других расчетных случаев из табл. 1. Для этого в качестве тока $I_{Ж}$ в (3) надо подставлять $\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K(3)}$ для сети 6–35 кВ и $\frac{2}{3} \cdot I_{K(1)}$ для сети 110–500 кВ.

Расчет коэффициента $K_{3У}$

В случае нарушения изоляции внутри коробки экран кабеля оказывается соединенным с корпусом коробки и через него с заземляющим устройством $R_{3У}$. При металлическом повреждении внутри коробки напряжение на ее корпусе составит $U_K = K_{3У} \cdot U_Э$. Можно показать, что:

$$K_{3У} = \frac{1}{1 + \frac{2}{9} \cdot \frac{\dot{Z}_Э^* \cdot L_K}{R_{3У}}} = \frac{1}{a + jb},$$

где в соответствии с [1] продольное сопротивление экрана $\dot{Z}_Э^* L_K = \dot{Z}_Э = (R_3 + R_Э) + jX_Э$ имеет вещественную часть (рис. 3):

$$R_3 + R_Э = \left[\frac{\pi}{4} \mu_0 f + \rho_Э \frac{1}{F_Э} \right] \cdot L_K, \tag{4}$$

и мнимую часть (рис. 4):

$$X_Э = \omega L_Э = \left[\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2D_3}{d_Э}\right) \right] \cdot L_K, \tag{5}$$

D_3 – эквивалентная глубина тока в земле.

Определив по рис. 3 и 4 сопротивления R и X для линии длиной 1000 м, можно далее их пересчитать на любую другую длину L_K (м) с помощью выражений:

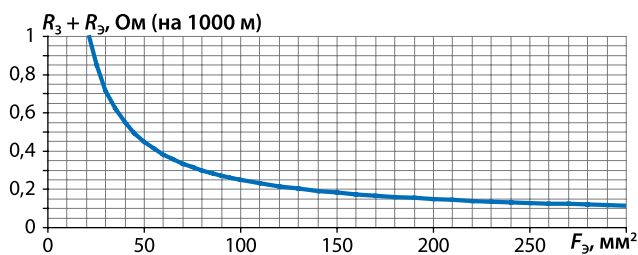
$$R_3 + R_Э = (R_3 + R_Э)^{PIS} \cdot \frac{L_K}{1000}, X_Э = X_Э^{PIS} \cdot \frac{L_K}{1000}. \tag{6}$$

С учетом изложенного модуль коэффициента $K_{3У}$ будет:

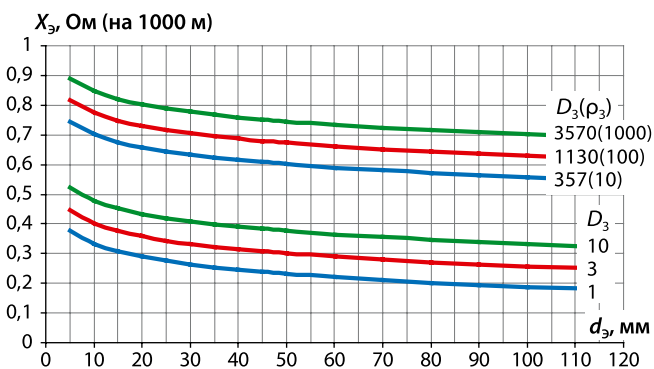
$$K_{3У} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}}, a = 1 + \frac{2}{9} \cdot \frac{(R_3 + R_Э)}{R_{3У}}, b = \frac{2}{9} \cdot \frac{X_Э}{R_{3У}}. \tag{7}$$

Понятие D_3 , используемое в теории воздушных линий, в формуле (5) следует применять достаточно осторожно. Во-первых, воздушные линии в большинстве случаев проходят

Вещественная часть сопротивления медного экрана по (4) на 1000 м длины кабеля **Рис. 3 •**



Мнимая часть сопротивления экрана по (5) на 1000 м длины кабеля **Рис. 4 •**



за пределами городов, т.е. там, где глубина залегания тока в земле определяется только свойствами грунта. Кабели же, напротив, главным образом находят применение в городах и на промышленных предприятиях, на территории которых в земле находится много металлоконструкций, снижающих эквивалентное значение D_3 . Кроме того, следует учитывать заземленные экраны соседних цепей.

Во-вторых, при вычислении D_3 пренебрегают концевыми эффектами, т.е. считают, что длина линии в разы больше, чем глубина D_3 . Для воздушных линий это предположение вполне справедливо, поскольку их длина составляет десятки километров, тогда как глубина D_3 – это несколько сотен или тысяч метров. Для кабельных линий пренебрегать концевыми эффектами уже нельзя. Иными словами, для кабелей ток вряд ли сможет проникнуть в землю на глубину D_3 , на которую он проник бы для протяженных воздушных линий.

Учитывая изложенное, в ряде случаев расчет D_3 предпочтительнее вести не по известной [1] формуле $D_3 = 2,24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}}$ с учетом данных об удельном сопротивлении грунта ρ_3 , а просто принимать глубину D_3 равной нескольким метрам (рис. 4).

Расчет коэффициента $K_{ш}$

После выполнения в колодце системы уравнивания потенциалов потенциал коробки будет передан всему колодцу транспозиции. Для определения шагового напряжения на поверхности земли заменим колодец высотой H и стенами a и b полушаровым эквивалентом радиуса r . Потенциал точек на поверхности земли на разных расстояниях от такого колодца в соответствии с [4] будет:

$$U(x) = U_K \frac{r}{x} .$$

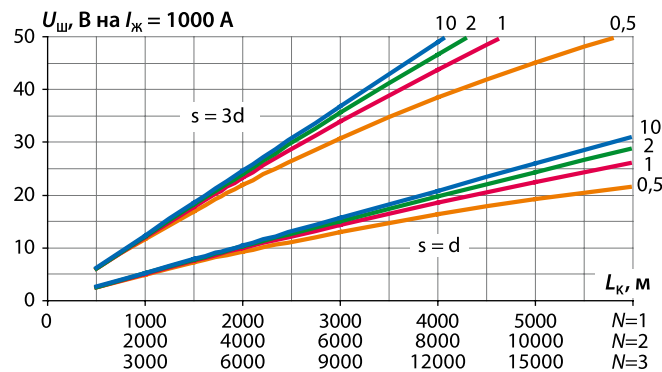
Приняв глубину шага человека равной 0,8 м, получим максимальное шаговое напряжение вблизи от колодца и коэффициент шага:

$$U_{ш} = U_K \left(1 - \frac{r}{r + 0,8} \right),$$

$$K_{ш} = 1 - \frac{r}{r + 0,8}, \tag{8}$$

где $r = \sqrt{\frac{a \cdot b + 2 \cdot H \cdot a + 2 \cdot H \cdot b}{2 \cdot \pi}}$ – эквивалентный радиус колодца.

Рис. 5. Шаговое напряжение вблизи от колодца транспозиции экранов кабеля 110 кВ 1000/240 мм² в зависимости от сопротивления заземления 0,5–10 Ом и других влияющих факторов



Например, по (8):

- если колодец имеет высоту $H = 2$ м и размер пола $a = 2$ м, $b = 2$ м, то эквивалент колодца обладает радиусом $r = 1,78$ м; коэффициент шага $K_{III} = 0,31$;
- если колодец имеет высоту $H = 2$ м и размер пола $a = 1$ м, $b = 1$ м, то эквивалент колодца обладает радиусом $r = 1,19$ м; коэффициент шага $K_{III} = 0,4$.

Указанные коэффициенты получены в предположении однородности грунта вокруг колодца. На самом деле земля вокруг колодца может быть заасфальтирована, в земле могут находиться всевозможные металлоконструкции – все это изменяет распределение поля и коэффициент шага. Поскольку в общем случае учесть такие факторы сложно, то методика вынужденно строится на простой формуле (8).

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДЛЯ КАБЕЛЯ 110 кВ

Согласно (1) наибольшее шаговое напряжение U_{III} достигается при высоких значениях коэффициента K_{3y} , что по (4), (5), (7) имеет место для кабелей с большим сечением экрана F_3 и диаметром экрана d_3 (большой d_3 характерен для кабелей с жилой высокого сечения и толстой изоляцией). Поэтому в качестве примера рассмотрим кабель 110 кВ 1000/240 мм² (внешний диаметр такого кабеля $d = 85$ мм), вычисления для которого будут оценками сверху для всех других кабелей меньшего номинального напряжения, меньших сечений жилы и экрана. Также для получения завышенных значений K_{3y} и U_{III} положим минимальную глубину $D_3 = 1$ м, входящую в (5) и далее в (7).

По методике [1] можно показать, что для рассматриваемого кабеля 110 кВ простое заземление экранов с двух сторон недопустимо, требуется транспозиция экранов. Пусть для практической реализации транспозиции будут использованы железобетонные колодцы размера $2 \times 2 \times 2$ м, внутри которых выполнена система уравнивания потенциалов. Определим достаточное сопротивление R_{3y} заземляющего устройства коробок (колодцев) транспозиции.

На рис. 5 представлены результаты расчетов (1) шагового напряжения U_{III} в зависимости от сопротивления заземления коробок $R_{3y} = 0,5 \div 10$ Ом, длины кабеля L_K , числа полных циклов транспозиции N , среднего по трассе расстояния между фазами s . Результаты получены путем перемножения коэффициентов (7) и (8) на напряжение экрана (2).

Согласно табл. 1 в сети 110 кВ расчеты шагового напряжения следует проводить как в нормальном режиме, так и при внешнем по отношению к кабелю однофазном коротком замыкании К(1). Здесь для упрощения рассмотрим лишь нормальный режим с током 1000 А (по каталожным данным такой ток отвечает принятому сечению жилы 1000 мм²).

По рис. 5 при токе в жиле 1000 А, опираясь на допустимое шаговое напряжение 20 В, можно сделать следующие обобщающие выводы, справедливые вне зависимости от конкретного значения сопротивления заземления 0,5–10 Ом:

- при прокладке треугольником ($s = d$) следует выполнять один полный цикл транспозиции не реже, чем каждые 4–5 км трассы кабеля;

- при прокладке в ряд ($s = 3d$) следует выполнять один полный цикл транспозиции не реже, чем каждые 1,5–2 км.

По [1] число циклов транспозиции экранов определяется в результате расчета напряжения «экран-земля» в узле транспозиции при внешнем по отношению к кабелю трехфазном КЗ – это напряжение не должно было превосходить 5–7 кВ, безопасных для оболочки кабеля. Теперь, как следует из рис. 5, для ограничения шагового напряжения для некоторых кабельных линий потребуется увеличение числа циклов транспозиции сверх того значения, которое найдено по [1].

Можно показать, что если в нормальном режиме напряжение «экран-земля» в узле транспозиции экранов составляет $U_3 = 100$ В, то по (1) шаговое напряжение составит не более 20–30 В, т.е. будет на уровне допустимого значения, причем вне зависимости от конкретной величины 0,5–10 Ом сопротивления заземляющего устройства коробок (колодцев) транспозиции. Как видно, «правило 100 В» можно использовать в качестве упрощенного правила проверки безопасности линий с транспозицией экранов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для железобетонных колодцев транспозиции экранов следует выполнять систему уравнивания потенциалов – она должна обеспечить возможность безопасного прикосновения персонала к корпусу коробки транспозиции. При этом проверке подлежит лишь шаговое напряжение на поверхности земли рядом с колодцем.
2. Шаговое напряжение вблизи от колодца существенно зависит от длины кабеля, от числа полных циклов транспозиции экранов, от среднего по трассе расстояния между фазами, но почти не зависит от конкретной величины сопротивления заземляющего устройства коробок (колодцев) транспозиции. Поэтому вопрос о выборе достаточной величины этого сопротивления должен быть заменен вопросом грамотного выбора числа циклов транспозиции экранов кабеля при известной его длине и среднем по трассе расстоянии между фазами.
3. Ранее в [1] число полных циклов транспозиции определялось так, чтобы при внешнем трехфазном коротком замыкании напряжение «экран-земля» в узле транспозиции, приложенное к оболочке кабеля, было не более 5–7 кВ. Теперь же оказалось, что может потребоваться дополнительное увеличение числа циклов с целью ограничения шагового напряжения до безопасных значений.
4. Для каждой кабельной линии 6–500 кВ, для которой обоснована необходимость транспозиции экранов, требуются расчеты шагового напряжения по формуле (1) статьи. Однако для экспресс-оценок можно сформулировать обобщенное правило безопасности КЛ: если в нормальном режиме работы напряжение промышленной частоты «экран-земля» в узле транспозиции не превосходит 80–100 В, то даже в случае металлического повреждения внутри коробки транспозиции шаговое напряжение вблизи от колодца вряд ли будет опасно для людей и животных вне зависимости от того, с каким именно сопротивлением (из диапазона 0,5–10 Ом) выполнен контур заземления коробки (колодца).
5. Если придерживаться «правила 100 В», то выбор сопротивления заземления коробок будет определяться уже не вопросами безопасности людей, а условиями работы ОПН: суммарное падение напряжения на защитном ОПН, установленном в коробке транспозиции, и на цепи его заземления не должно превосходить допустимых для оболочки кабеля значений. В случае использования в коробках транспозиции ОПН класса напряжения 6 кВ защита оболочки однофазных кабелей 6–500 кВ, по всей видимости, будет обеспечена при сопротивлениях не более 10–20 Ом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 154 с.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е издание, переработанное и дополненное. М., 2003.
3. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
4. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. 2-е изд. М.: Энергосервис, 2006. 520 с.