

РАСЧЕТ СХЕМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ ОДНОФАЗНЫХ КЛ 6–500 кВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРАССЫ

ДМИТРИЕВ М.В., к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

В России более десяти лет массово применяются однофазные кабели классов 6–500 кВ, однако до сих пор нигде не приведена методика расчета наведенных в экранах токов и напряжений для случаев, когда на участках трассы используется различное взаимное расположение фаз друг относительно друга, а также не совпадают длины участков между узлами транспозиции экранов. Ниже дан простой способ учета всех перечисленных факторов.

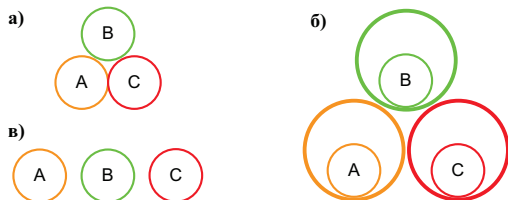


Рис. 1. Типовые варианты взаимного расположения однофазных кабелей 6–500 кВ: а) сомкнутым треугольником; б) в трубах, проложенных треугольником (пучком); в) в плоскости (в ряд)

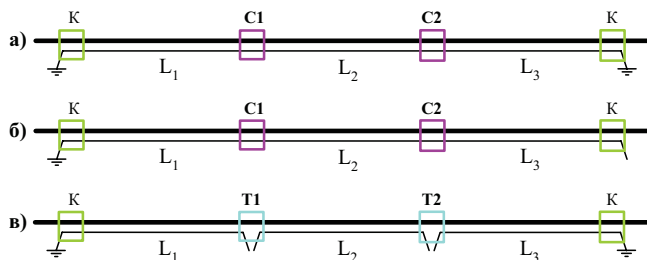


Рис. 2. Основные схемы заземления экранов однофазных кабелей 6–500 кВ: а) двустороннее заземление экранов; б) одностороннее заземление экранов; в) транспозиция экранов (один полный цикл)

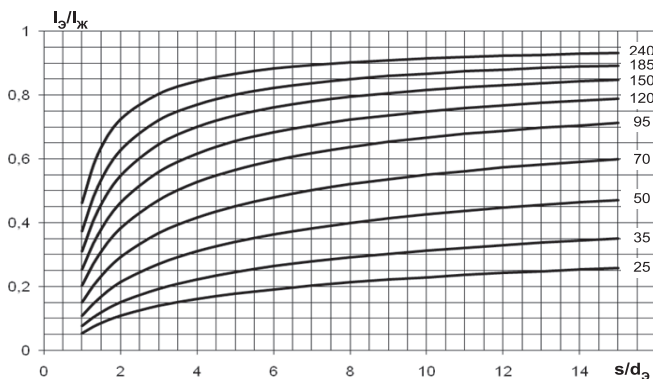


Рис. 3. Токи в заземленных по концам экранах трехфазной группы однофазных кабелей 6–500 кВ в зависимости от сечения экрана F_3 (мм²) и расстояния между фазами s/d_3

Однофазные кабели незаменимы в сетях 110–500 кВ, но и на классы 6–35 кВ их также применяют достаточно часто. Наиболее распространенные схемы взаимного расположения однофазных кабелей приведены на рис. 1.

Особенность однофазных кабелей 6–500 кВ – наличие в проводящих медных экранах наведенных токов и напряжений 50 Гц, величина которых зависит от схемы их соединения и заземления (рис. 2). Выбор оптимальной схемы заземления экранов является важнейшим разделом проектной документации, однако проектные организации сталкиваются с трудностями, когда им приходится проводить расчеты, учитывающие все особенности трассы, такие как многообразие вариантов взаимного расположения фаз, а также различие строительных длин между муфтами.

Положим (рис. 2), что каждая фаза имеет две концевых муфты (К), а также две соединительных муфты (С) или две транспозиционных (Т). Пусть длины трех участков между ними составляют L_1, L_2, L_3 , и по трассе встречаются различные варианты взаимного расположения кабелей (рис. 1). Проведем расчет схем рис. 2.

РАСЧЕТ ДВУСТОРОННЕГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ

На рис. 3 для любых однофазных кабелей 6–500 кВ, имеющих заземленные в обоих концах экраны (рис. 2, а), дано относительное значение наведенных в экранах токов $D_i = I_3/I_{ж}$. Расчеты выполнены по методике [1], в них варьируется:

F_3 – сечение медных экранов (от 35 до 240 мм²);

s – среднегеометрическое расстояние между осями трех фаз А, В, С;

$d_3 = d - 2\Delta_{об}$ – диаметр медного экрана;

d – диаметр кабеля по каталогу;

$\Delta_{об}$ – толщина оболочки кабеля по каталогу (почти всегда составляет 5 мм).

Для использования рис. 3 необходимо знать величину s , а она меняется по трассе кабеля. Ток I_3 зависит от площади контура, образованного парами экранов и протянувшегося вдоль всей трассы линии, эта площадь составляет:

$$П = s_T \cdot L_T + s_{ТТ} \cdot L_{ТТ} + s_P \cdot L_P,$$

где L_T, L_{TT}, L_P – суммарная протяженность участков трассы, где фазы проложены, соответственно, в виде сомкнутого треугольника (рис. 1, а), в трубах треугольником (рис. 1, б), в ряд (рис. 1, в); $s_T = d, s_{TT} = D, s_P = \sqrt[3]{s_{AB} \cdot s_{BC} \cdot s_{AC}} = 1,26 \cdot s_{AB}$ – средние геометрические расстояния между фазами для трех указанных случаев; D – внешний диаметр трубы; s_{AB} – расстояние между осями ближайших фаз.

Эту же площадь можно найти через усредненное расстояние s между фазами и длину всей трассы кабеля $L_K = L_1 + L_2 + L_3$ по формуле $\Pi = s \cdot L_K$. Тогда имеем:

$$s = \frac{s_T \cdot L_T + s_{TT} \cdot L_{TT} + s_P \cdot L_P}{L_K} \quad (1)$$

Это значение s и надо использовать при работе с рис. 3 для поиска $D_I = I_3/I_{ж}$. Далее вычисляются относительные потери:

$$D_P = P_3/P_{ж} = (I_3/I_{ж})^2 \cdot \frac{\rho_3}{\rho_{ж}} \cdot \frac{F_{ж}}{F_3}, \quad (2)$$

где $F_{ж}, F_3$ – сечения жилы и экрана; $\rho_{ж}, \rho_3$ – удельное сопротивление разогретого до 80–90 °С материала жилы и экрана (для меди $2 \cdot 10^{-8}$, для алюминия $3,2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м).

Коэффициент использования пропускной способности жилы по току:

$$K_{и} = \frac{1}{\sqrt{1 + P_3/P_{ж}}} \quad (3)$$

Абсолютные потери (Вт) в экранах одной фазы:

$$P_3 = (P_3/P_{ж}) \cdot \left(I_{ж}^2 \cdot \frac{\rho_{ж}}{F_{ж}} \cdot L_K \right), \quad (4)$$

где $I_{ж}$ – усредненный за год ток в жиле (А).

Годовая стоимость (руб.) потерь мощности в экранах трех фаз:

$$C_{1год} = \frac{3P_3}{1000} \cdot 8760 \cdot C, \quad (5)$$

где C – цена потерь электроэнергии руб/(кВт · час);

1000 – перевод Вт в кВт;

8760 – число часов в году.

Как правило, двустороннее заземление экранов считается допустимым, когда одновременно выполняются условия $K_{и} > 0,9$ о.е. и $C_{1год} < 50$ тыс. рублей. Если хотя бы одно из них нарушается, то целесообразно рассмотреть иные схемы заземления.

Итак, анализ двустороннего заземления экранов предполагает:

- расчет среднего расстояния по (1);
- поиск тока в экране по рис. 3;
- расчет по (2)–(5) потерь в экране и проч.;
- проверка допустимости найденных величин.

РАСЧЕТ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ

В [1] было показано, что напряжение на экране прямо пропорционально току в жиле $I_{ж}$ и длине кабеля L_K . Кроме того, напряжение на экране зависит от:

- расстояния между фазами s , диаметра экрана d_3 , соотношения s/d_3 ;
- эквивалентной глубины протекания тока в земле D_3 .

Глубина D_3 определяется или удельным сопротивлением грунта ρ_3 , или же глубиной находящегося в земле металло-

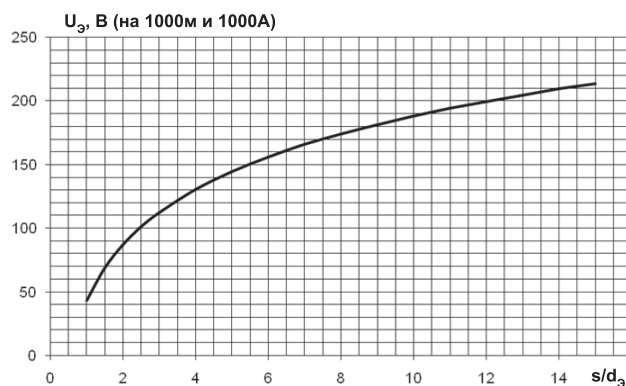


Рис. 4. Симметричный режим. Напряжение относительно земли на экране кабеля 6–500 кВ длиной 1000 м при токе жилы 1000 А в зависимости от соотношения s/d_3

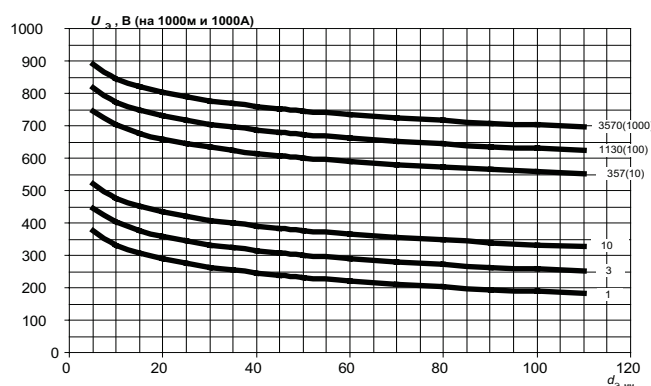


Рис. 5. Несимметричный режим. Напряжение относительно земли на экране кабеля 6–500 кВ длиной 1000 м при токе жилы 1000 А в зависимости от диаметра экрана d_3 и глубины D_3

конструкций (коммуникаций). Как правило, D_3 приходится задавать экспертно равной нескольким метрам (1, 3, 10 м).

На рис. 4–5 даны напряжения экрана $U_3^{PИС}$ по формулам из [1], определенные для тока в жиле $I_{ж} = 1000$ А и длины кабеля $L_K = 1000$ м. Для иных значений:

$$U_3 = U_3^{PИС} \cdot \frac{I_{ж}}{1000} \cdot \frac{L_K}{1000}, \quad (6)$$

где ток в жиле $I_{ж}$ – это или ток нормального режима, или ток, который идет по жиле в точку короткого замыкания, расположенную во внешней по отношению к кабелю сети.

В симметричном режиме (нормальный или трехфазное короткое замыкание) надо использовать рис. 4, тогда как в несимметричном режиме (однофазное короткое замыкание) – рис. 5. Для сетей 6–35 кВ с изолированной нейтралью рис. 5 не нужен.

Для использования рис. 4 необходимо знать величину s , а она изменяется вдоль трассы. Поэтому анализ одностороннего заземления экранов будет таким:

- расчет среднего расстояния по (1);
- поиск напряжения на экране по рис. 4 (и по рис. 5) на 1000 м и 1000 А;
- корректировка напряжения $U_3^{PИС}$ с помощью (6) к реальной длине кабеля L_K и току жилы $I_{ж}$;
- проверка допустимости найденных напряжений U_3 .

Допустимые напряжения $U_{доп}$ на экране относительно земли (на оболочке кабеля) составляют по [1]:

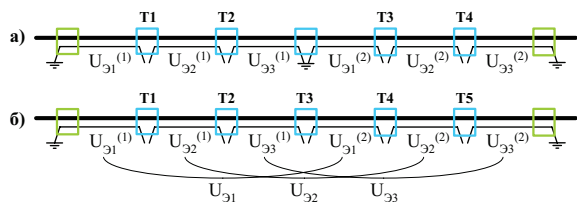


Рис. 6. Способы обустройства узла сопряжения соседних циклов: а) выполнено заземление экранов; б) установлена обычная коробка транспозиции

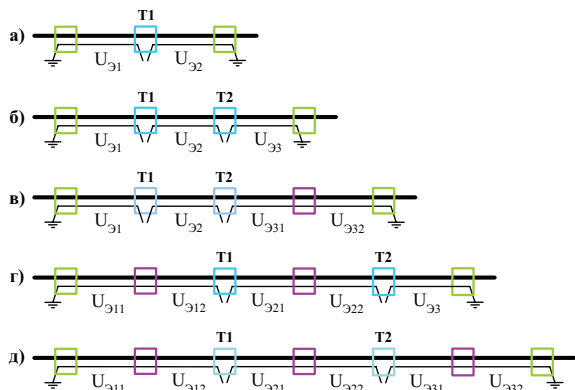


Рис. 7. Расстановка соединительных и транспозиционных муфт по трассе в зависимости от числа строительных длин: а) две; б) три; в) четыре; г) пять; д) шесть

- 100 В в нормальном симметричном режиме;
- 5–7 кВ при коротком замыкании в сети (трехфазном или однофазном).

Если $U_{\text{э}} > U_{\text{доп}}$, то тогда надо изменить схему заземления экранов – например, снизить напряжение в два раза за счет деления трассы кабеля на две части, каждая из которых имеет одностороннее заземление экранов (схема похожа на рис. 7, а). Еще один способ – перейти к рассмотрению транспозиции экранов.

РАСЧЕТ ИДЕАЛЬНОЙ ТРАНСПОЗИЦИИ ЭКРАНОВ

При транспозиции экранов, имеющей N полных циклов (для рис. 2, в $N = 1$), напряжение в узле транспозиции согласно [1] может быть найдено как:

$$U_{\text{э}} = \frac{U_{\text{э}}^{\text{РИС}}}{3N} \cdot \frac{I_{\text{ж}}}{1000} \cdot \frac{L_{\text{к}}}{1000}, \tag{7}$$

где всегда надо пользоваться исключительно рис. 4, так как в случае транспозиции экранов однофазное короткое замыкание сети не является расчетным случаем [1].

Если $U_{\text{э}} > U_{\text{доп}}$, то надо увеличивать число полных циклов N . Однако, к сожалению, расчет по (7) плохо применим для реальных кабельных линий, ведь для вычислений по (7) необходимо чтобы:

- все $3N$ участков кабельной линии имели одинаковую длину, равную $L_{\text{к}}/(3N)$;
- на каждом из $3N$ участков было одинаково наводимое напряжение $U_{\text{э}}^{\text{РИС}}$.

Предложим методику расчета транспозиции для реальных кабельных линий.

РАСЧЕТ НЕИДЕАЛЬНОЙ ТРАНСПОЗИЦИИ ЭКРАНОВ

Для кабельной линии, имеющей различные длины участков между муфтами и переменное по трассе расстояние

между фазами, расчет начинается с определения средних расстояний между осями фаз s_1, s_2, s_3 на трех участках экрана длиной L_1, L_2, L_3 соответственно (схема рис. 2, в):

$$s_j = \frac{s_T \cdot L_{Tj} + s_{TT} \cdot L_{TTj} + s_P \cdot L_{Pj}}{L_{Tj} + L_{TTj} + L_{Pj}}, \tag{8}$$

где j – номер участка (1,2,3) длиной $L_j = L_{Tj} + L_{TTj} + L_{Pj}$, L_{Tj}, L_{TTj}, L_{Pj} – на j участке длина отрезков каждого из трех видов прокладки (рис. 1).

На основе средних расстояний определяется продольное напряжение $U_{\text{э}1}, U_{\text{э}2}, U_{\text{э}3}$, наводимое на экраны на трех участках трассы ($j=1, 2, 3$):

$$U_{\text{э}j} = U_{\text{э}j}^{\text{РИС}} \cdot \frac{I_{\text{ж}}}{1000} \cdot \frac{L_j}{1000}, \tag{9}$$

где $U_{\text{э}j}^{\text{РИС}}$ найдено по рис. 4 с помощью s_j (напомним, что рис. 5 здесь не нужен).

Напряжения $U_{\text{э}1}, U_{\text{э}2}, U_{\text{э}3}$ по (9) вычисляются дважды – для токов нормального режима и затем для токов при трехфазном коротком замыкании.

В схеме рис. 2, в важно проверить уровни напряжений на экранах относительно земли в двух узлах транспозиции, в которых теперь напряжения различны. В первом узле напряжение равно продольному на 1-м участке $U_{\text{э}1}$; во втором узле напряжение равно продольному на 3-м участке $U_{\text{э}3}$. Если $U_{\text{э}1} > U_{\text{доп}}$ или $U_{\text{э}3} > U_{\text{доп}}$, то тогда надо увеличивать число полных циклов N .

Проверив допустимость напряжения на экране в узлах, следует определить $K_{\text{и}}$ и $C_{\text{1год}}$ в условиях, когда из-за неидеальной транспозиции в экранах есть не до конца скомпенсированные токи промышленной частоты. Расчеты базируются на понятии введенного в [1] коэффициента транспозиции:

$$K_T = \frac{\sqrt{[U_{\text{э}1} - 0,5(U_{\text{э}2} + U_{\text{э}3})]^2 + [0,5\sqrt{3}(U_{\text{э}2} - U_{\text{э}3})]^2}}{U_{\text{э}1} + U_{\text{э}2} + U_{\text{э}3}}, \tag{10}$$

$$P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = D_P \cdot K_T^2, \tag{11}$$

где D_P – исходные (без транспозиции) относительные потери в экранах по (2).

Коэффициент транспозиции всегда находится в диапазоне значений $0 \leq K_T \leq 1$, и поэтому $0 \leq P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} \leq D_P$, т.е. любая транспозиция снижает относительные потери в экранах по сравнению с исходным случаем двустороннего заземления.

С помощью (11) определяются величины $K_{\text{и}}$ и $C_{\text{э}1}$ по (3)–(5). Как правило, неидеальная транспозиция экранов считается допустимой, когда одновременно выполняются условия $K_{\text{и}} > 0,9$ о.е. и $C_{\text{1год}} < 50$ тыс. рублей. Напомним, что также должны выполняться условия $U_{\text{э}1} < U_{\text{доп}}$ и $U_{\text{э}3} < U_{\text{доп}}$.

Если какое-то из всех четырех условий не выполняется, то можно применить не $N = 1$, а сразу $N = 2$ полных цикла транспозиции экранов, рационально выбрав схему заземления средней точки линии.

РАСЧЕТ НЕСКОЛЬКИХ ЦИКЛОВ ТРАНСПОЗИЦИИ

Для большинства кабельных линий типовой длины (до 10 км) нужно не более двух циклов ($N = 2$). Чаще всего в проектах предусматривают глухое заземление экранов в месте сопряжения соседних циклов (рис. 6, а). В таком

случае линия делится на две, и для каждой из них вопросы неидеальной транспозиции анализируются отдельно от другой, т.е. тройка напряжений $U_{\varepsilon 1}^{(1)}, U_{\varepsilon 2}^{(1)}, U_{\varepsilon 3}^{(1)}$ и тройка напряжений $U_{\varepsilon 1}^{(2)}, U_{\varepsilon 2}^{(2)}, U_{\varepsilon 3}^{(2)}$ никак не связаны друг с другом.

Положим, что расчеты для 1-й и 2-й половины линии показали, что на каждой из них имеет место неидеальная транспозиция с неблагоприятными $K_{\text{и}}$ и $C_{1\text{год}}$. Тогда целесообразно рассмотреть альтернативный вариант – отказ от заземления средней точки и установку там обычного узла транспозиции (рис. 6, б). Подобное решение, если повезет, может улучшить $K_{\text{и}}$ и $C_{1\text{год}}$, т.е. сделать кабельную линию ближе к случаю идеальной транспозиции, когда $K_{\text{и}} = 1$ и $C_{1\text{год}} = 0$.

Дело в том, что в схеме рис. 6, б два цикла ведут себя как взаимосвязанные, и может случиться, что существенное различие напряжений в тройке $U_{\varepsilon 1}^{(1)}, U_{\varepsilon 2}^{(1)}, U_{\varepsilon 3}^{(1)}$ будет удачным образом скомпенсировано напряжениями $U_{\varepsilon 1}^{(2)}, U_{\varepsilon 2}^{(2)}, U_{\varepsilon 3}^{(2)}$. Чтобы проверить это, надо провести расчеты по формулам (10)–(11) как для обычной схемы с одним циклом транспозиции, где в качестве напряжений брать три следующих:

$$\begin{aligned} U_{\varepsilon 1} &= U_{\varepsilon 1}^{(1)} + U_{\varepsilon 1}^{(2)} \\ U_{\varepsilon 2} &= U_{\varepsilon 2}^{(1)} + U_{\varepsilon 2}^{(2)} \\ U_{\varepsilon 3} &= U_{\varepsilon 3}^{(1)} + U_{\varepsilon 3}^{(2)}. \end{aligned} \tag{12}$$

Пример 1. Пусть кабельная линия имеет шесть участков: длиной 500, 1000, 1500, 1500, 1000, 500 м, существенное различие длин которых обусловлено особенностями трассы и не может быть изменено. Для простоты положим, что способ прокладки одинаков вдоль всей трассы. Очевидно, что если принять $N = 2$ цикла и заземлить среднюю точку (рис. 6, а), то и первый, и второй циклы будут неидеальными. Если же применить рис. 6, б, то такая схема обеспечит равенство трех напряжений в формуле (12) и обеспечит $K_{\text{и}} = 1$ и $C_{1\text{год}} = 0$. Видно, что рациональный подход позволил довести сложную линию до состояния идеальной транспозиции.

НЕПОЛНАЯ ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ

Частным случаем рассмотренной ранее неидеальной транспозиции является так называемая неполная транспозиция – такая схема, у которой число участков не кратно трем. На практике это может стать следствием разных причин:

- поэтапный перевод воздушной линии в кабельную, когда с годами добавляются все новые и новые участки кабеля (рис. 7, а, б, в);
- линия короткая и у нее неудачное (не кратное трем) число строительных длин (рис. 7, а, в, г).

Пример 2. Пусть все строительные длины кабеля одинаковы и равны 500 м. Для простоты положим, что расстояние между фазами постоянно вдоль всей трассы – это позволит определить коэффициент транспозиции $K_{\text{т}}$, под-

Таблица 1. Расчет схем неидеальной транспозиции (расстояние между фазами постоянно вдоль всей трассы)

Схема	$L_{\varepsilon 1}$, м	$L_{\varepsilon 2}$, м	$L_{\varepsilon 3}$, м	$K_{\text{т}}$ о.е.	$K_{\text{т}}^2$ о.е.	$1/K_{\text{т}}^2$ о.е.
Рис. 7, а	500	500	0	0,5	0,25	4
Рис. 7, б	500	500	500	0	0	---
Рис. 7, в	500	500	1000	0,25	0,0625	16
Рис. 7, г	1000	1000	500	0,2	0,04	25
Рис. 7, д	1000	1000	1000	0	0	---

ставляя в формулу (10) не напряжения участков $U_{\varepsilon 1}, U_{\varepsilon 2}, U_{\varepsilon 3}$, а прямо их длины $L_{\varepsilon 1}, L_{\varepsilon 2}, L_{\varepsilon 3}$. Расчеты даны в таблице 1, где основное внимание уделим последнему столбцу, который в соответствии с (11) содержит информацию о том, во сколько раз снизились потери в экранах кабеля в сравнении с базовым случаем двустороннего заземления экранов. Ясно видно, что различные виды неполной транспозиции (рис. 7, а) или неидеальной транспозиции (рис. 7, в и рис. 7, г) можно считать достаточно эффективными и не бояться использовать на практике (потери снижены в 4–25 раз).

Пример 3. Пусть в схеме рис. 7, г все пять строительных длин кабеля одинаковы. Тогда справедливо $L_{\varepsilon 1} = L_{\varepsilon 2} = 2L_{\varepsilon 3}$. Пусть четыре первые строительные длины (считая слева направо) расположены сомкнутым треугольником, а последняя – иначе. Например, пусть ее фазы проложены на расстоянии друг от друга $s_1 = s_2 < s_3$. Тогда, в отличие от примера № 2, расчет по (10) нельзя вести в упрощенном порядке через длины $L_{\varepsilon 1}, L_{\varepsilon 2}, L_{\varepsilon 3}$, а надо использовать именно напряжения $U_{\varepsilon 1}, U_{\varepsilon 2}, U_{\varepsilon 3}$.

По формуле (8) находим конкретные значения усредненных расстояний s_1, s_2, s_3 для трех участков между узлами транспозиции. Затем по рис. 4 определяем три погонных наводимых напряжения $U_{\varepsilon 1}^{\text{РИС}}, U_{\varepsilon 2}^{\text{РИС}}, U_{\varepsilon 3}^{\text{РИС}}$. Предположим здесь, что получилось $U_{\varepsilon 1}^{\text{РИС}} = U_{\varepsilon 2}^{\text{РИС}} \approx 0,5U_{\varepsilon 3}^{\text{РИС}}$. Подставляем это и $L_{\varepsilon 1} = L_{\varepsilon 2} = 2L_{\varepsilon 3}$ в формулу (9) и замечаем, что выполняется $U_{\varepsilon 1} = U_{\varepsilon 2} \approx U_{\varepsilon 3}$, а значит – транспозиция поведет себя как идеальная, $K_{\text{и}} = 1$ и $C_{1\text{год}} = 0$.

Примеры № 2 и № 3 показали, что различие длин участков трассы между узлами транспозиции ни в коем случае не должно трактоваться как плохое техническое решение. Последствия различия длин участков следует анализировать только совместно с различием средних расстояний между фазами на этих участках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проектировании кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями выбор схемы заземления их экранов следует проводить с учетом меняющегося по трассе расстояния между фазами.

2. Нельзя судить об эффективности транспозиции только лишь на основе сравнения длин участков трассы между узлами транспозиции. Эффективность транспозиции ничуть не меньше зависит и от расстояния s между фазами на этих участках.

3. При проектировании кабельных линий 6–500 кВ для приближения транспозиции к состоянию «идеальной» целесообразно:

- расставлять транспозиционные муфты вдоль трассы таким образом, чтобы на участках с повышенным средним расстоянием s муфты транспозиции были ближе друг другу, а на участках с пониженным расстоянием s такие муфты были бы дальше друг от друга;
- при $N > 1$ рассмотреть возможность не заземлять экраны в узлах сопряжения соседних циклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриев М.В.* Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 152 с.