

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ЗАМЫКАНИИ СОБСТВЕННЫХ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

**В.Ю. Розов**, чл.-корр. НАН Украины, **А.О. Ткаченко**, **А.В. Ерисов**, **В.С. Гринченко**, канд.техн.наук  
 ГУ “Институт технических проблем магнетизма НАН Украины”,  
 ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

*Предложена аналитическая модель магнитного поля высоковольтной трехфазной кабельной линии, состоящей из одножильных кабелей, для случая двухстороннего замыкания их экранов. Модель позволяет рассчитывать величины токов, индуцированных в экранах кабелей, и распределение магнитной индукции при произвольном расположении кабелей в пространстве. Получено точное компактное выражение для определения эффективности экранирования магнитного поля кабельной линии при двухстороннем замыкании экранов в случае прокладки кабелей треугольником. Теоретически и экспериментально обосновано упрощенное компактное выражение для определения эффективности экранирования магнитного поля кабельной линии при прокладке кабелей в плоскости, погрешность которого не превышает 5%. Библ. 15, рис. 7.*

**Ключевые слова:** кабельная линия, магнитное поле, экран кабеля, заземление экранов, эффективность экранирования.

**Введение.** Исследования, проведенные Всемирной организацией здравоохранения в рамках программы «*The International EMF Project*», выявили высокую опасность магнитного поля (МП) промышленной частоты для здоровья людей. Наиболее интенсивным источником МП являются воздушные линии электропередачи. Однако кабельные линии электропередачи (КЛ), выполненные из одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, также могут создавать на поверхности земли МП, превышающее предельно-допустимый уровень [10, С. 277]. Для его снижения применяют электромагнитные, магнитные (магнитоэлектрические) и контурные экраны различных конфигураций. Другой подход к снижению МП КЛ, не требующий установки дополнительных экранов, заключается в замыкании собственных экранов кабелей КЛ (рис. 1, а) при их двухстороннем заземлении на краях зоны экранирования [10, С. 297]. В этом случае суперпозиция МП токов в экранах и жилах КЛ оказывается меньшей МП КЛ с разомкнутыми экранами кабелей.

При двухстороннем замыкании экранов кабелей КЛ возникает задача расчета результирующего МП и связанная с ней задача расчета индуцированных токов в экранах, для решения которых в настоящее время отсутствует корректная и удобная для практического применения аналитическая модель. Так, в [12-14] расчеты токов в экранах кабелей выполнены при помощи математического аппарата матричного исчисления, что создает трудности при их практической реализации. В [5] предложена расчетная модель токов в экранах кабелей КЛ, которая предполагает не всегда корректную замену экрана проводником эквивалентного сечения, удаленного от жилы кабеля на расстояние, равное радиусу экрана. В работе получены аналитические выражения для токов в экранах, однако не указаны условия применимости рассмотренной модели. В [6] представлена корректная аналитическая модель КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами, которая позволяет рассчитать индуцированные в них токи. Однако она применима только для КЛ с кабелями, уложенными в вершинах равностороннего треугольника. В [2,7,9] представлены результаты численного моделирования МП КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами в программной среде *COMSOL Multiphysics*. Однако численные методы менее удобны для широкого практического применения в сравнении с аналитическими. Отсутствие аналитических методов расчета МП КЛ с замкнутыми экранами кабелей, применимых в случае произвольного расположения кабелей, создает трудности при проектировании КЛ.

**Целью** работы является разработка аналитической модели магнитного поля трехфазной кабельной линии с двухсторонне замкнутыми экранами одножильных кабелей при их произвольном расположении в пространстве, и получение компактных выражений для расчета эффективности экранирования магнитного поля.

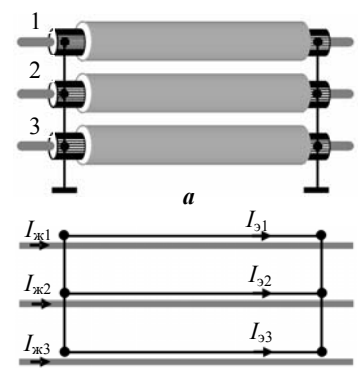


Рис. 1

**Аналитическая модель МП КЛ.** Рассмотрим трехфазную КЛ, токи в жилах которой образуют симметричную систему. Будем полагать, что экраны кабелей замкнуты с обоих концов КЛ и в них, соответственно, индуцируются продольные токи. Выберем положительные направления токов в экранах и жилах как показано на рис. 1, б. Тогда потоки самоиндукции и взаимной индукции будут направлены согласно.

Воспользуемся методом комплексных амплитуд и запишем выражения для падения напряжения  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$  на каждом из экранов кабелей

$$\begin{cases} \dot{I}_{\varepsilon 1}(R + j\omega L) + \dot{I}_{ж1}j\omega M_{ж\varepsilon} + (\dot{I}_{ж2} + \dot{I}_{\varepsilon 2})j\omega M_{12} + (\dot{I}_{ж3} + \dot{I}_{\varepsilon 3})j\omega M_{13} = \dot{U}_1, \\ \dot{I}_{\varepsilon 2}(R + j\omega L) + \dot{I}_{ж2}j\omega M_{ж\varepsilon} + (\dot{I}_{ж1} + \dot{I}_{\varepsilon 1})j\omega M_{21} + (\dot{I}_{ж3} + \dot{I}_{\varepsilon 3})j\omega M_{23} = \dot{U}_2, \\ \dot{I}_{\varepsilon 3}(R + j\omega L) + \dot{I}_{ж3}j\omega M_{ж\varepsilon} + (\dot{I}_{ж1} + \dot{I}_{\varepsilon 1})j\omega M_{31} + (\dot{I}_{ж2} + \dot{I}_{\varepsilon 2})j\omega M_{32} = \dot{U}_3, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{I}_{жk}$  и  $\dot{I}_{\varepsilon k}$  – соответственно комплексные амплитуды токов в жиле и экране  $k$ -го кабеля;  $R$  – активное сопротивление экрана участка кабеля длиной  $l$ ;  $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ с}^{-1}$  – угловая частота тока;  $L$  – собственная внешняя индуктивность экрана;  $M_{ж\varepsilon}$  – коэффициент взаимной индукции между жилой и экраном одного кабеля;  $M_{ik}$  – коэффициент взаимной индукции между экраном  $i$ -го и жилой  $k$ -го кабелей;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;  $j$  – мнимая единица.

Предполагая распределение индуцированного тока в экране каждого кабеля равномерным и принимая во внимание малую толщину экрана по сравнению с его радиусом, собственная индуктивность  $L$  может быть найдена из [4, С. 92], а коэффициенты взаимной индукции могут быть рассчитаны при помощи общих выражений, приведенных в [4, С. 13]

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad M_{ж\varepsilon} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad M_{ik} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{s_{ik}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $r$  – радиус сечения экрана;  $s_{ik}$  – расстояние между осями  $i$ -го и  $k$ -го кабелей.

При двухстороннем замыкании экранов падение напряжения на каждом из них равны, а для токов в экранах выполняется 1-й закон Кирхгофа

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \dot{U}, \quad \dot{I}_{\varepsilon 1} + \dot{I}_{\varepsilon 2} + \dot{I}_{\varepsilon 3} = 0. \quad (3)$$

Выражения (1)–(3) образуют систему четырех уравнений относительно неизвестных  $\dot{I}_{\varepsilon 1}, \dot{I}_{\varepsilon 2}, \dot{I}_{\varepsilon 3}$  и  $\dot{U}$ . При двухстороннем замыкании экранов МП КЛ определяется токами и в жилах, и в экранах кабелей. Если величины этих токов известны, то, используя метод комплексных амплитуд, закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции, комплексную амплитуду магнитной индукции можно записать в следующем виде:

$$\dot{\vec{B}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^3 (\dot{I}_{жk} + \dot{I}_{\varepsilon k}) \left( -\frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right), \quad (4)$$

где  $(x, y)$  – координаты точки, в которой вычисляется МП;  $(x_k, y_k)$  – координаты оси  $k$ -го кабеля; ось  $x$  направлена параллельно уровню земли, а ось  $y$  направлена вверх.

Таким образом, выражения (1)–(4) представляют собой аналитическую модель МП КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами ее кабелей и позволяют определять величины токов в экранах, а также находить распределение МП трехфазной КЛ независимо от способа прокладки ее кабелей.

Достоверность разработанной модели подтверждается результатами экспериментальных исследований [8, 9], которые были проведены на лабораторной модели КЛ, выполненной из кабелей типа АПвЭгаПу-110 1×240/70. При этом измерялось распределение магнитной индукции над КЛ при прокладке кабелей треугольником и в плоскости. Расстояние между кабелями варьировалось. Разброс результатов расчета магнитной индукции и экспериментальных данных не превышает 5%.

Воспользуемся разработанной аналитической моделью для определения эффективности экранирования МП КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами ее кабелей для наиболее распространенных случаев прокладки: треугольником (в вершинах равностороннего треугольника) и в плоскости [10, С. 289]. Эффективность экранирования МП КЛ ( $SF$ ) определим как отношение действующего значения магнитной индукции поля КЛ до двухстороннего замыкания экранов к действующему значению магнитной индукции после замыкания экранов

$$SF = \left| \dot{\vec{B}}_0 \right| / \left| \dot{\vec{B}} \right|. \quad (5)$$

**Эффективность экранирования МП КЛ при прокладке кабелей треугольником.** Если кабели уложены в соответствии с рис. 2, то коэффициенты взаимной индукции между экранами и жилами соседних кабелей равны между собой, т.е.  $\forall i \neq k M_{ik} = M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{s} - 1 \right)$ , где  $s$  – расстояние между осями кабелей. В этом случае решение системы (1)–(3) имеет вид

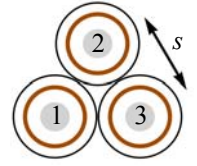


Рис. 2

$$i_{\text{эк}k} = -i_{\text{ж}k} \cdot \frac{j\omega(M_{\text{жэк}} - M)}{R + j\omega(L - M)} = -i_{\text{ж}k} \cdot \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \alpha \cdot i_{\text{ж}k}, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad (6)$$

где  $k = \overline{1,3}$  – номер кабеля;  $M^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{s}{r}$  – удельная эквивалентная индуктивность экрана, Гн/м;  $R^*$  – сопротивление единицы длины экрана кабеля, Ом/м.

Из (6) следует, что ток в экране прямо пропорционален току в жиле кабеля, причем коэффициенты пропорциональности  $\alpha$  для всех трех кабелей равны. Поскольку  $\alpha = \text{const}$ , то (4) может быть упрощено

$$\dot{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot (1 + \alpha) \cdot \sum_{k=1}^3 i_{\text{ж}k} \left( -\frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right). \quad (7)$$

При разомкнутых экранах кабелей МП КЛ определяется только токами в жилах кабелей

$$\dot{B}_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^3 i_{\text{ж}k} \left( -\frac{y - y_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_x + \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \cdot \vec{e}_y \right). \quad (8)$$

Используя (5)–(8), окончательно получаем  $SF = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{s}{r} \right|$ .

**Эффективность экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости.** Если кабели уложены в одной плоскости (рис. 3), то коэффициенты взаимной индукции крайних и соседних кабелей будут различны

$$M_{12} = M_{23} \neq M_{31}, \quad \text{где } M_{12} = M_{23} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{s} - 1 \right), \quad M_{31} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{l}{s} - 1 \right).$$

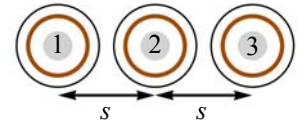


Рис. 3

Токи в жилах кабелей образуют либо систему прямой последовательности, либо систему обратной последовательности. В первом случае решение системы (1)–(3) принимает следующий вид:

$$i_{\text{ж}1} = -i_{\text{ж}1} \cdot \frac{Q \cdot (\ln^2 2 - 3 \ln^2 \Delta - 2 \ln 2 \cdot \ln \Delta) + \ln 2 \cdot \frac{3\sqrt{3} + j}{2} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + 3j \ln \Delta}{Q \cdot (\ln^2 2 - 3 \ln^2 \Delta - 2 \ln 2 \cdot \ln \Delta) + \frac{3}{Q} + 2j (\ln 2 + 3 \ln \Delta)},$$

$$i_{\text{ж}2} = -i_{\text{ж}2} \cdot \frac{jQ(3 \ln \Delta - \ln 2)}{3 + jQ(3 \ln \Delta - \ln 2)}, \quad (9)$$

$$i_{\text{ж}3} = -i_{\text{ж}3} \cdot \frac{Q \cdot (\ln^2 2 - 3 \ln^2 \Delta - 2 \ln 2 \cdot \ln \Delta) - \ln 2 \cdot \frac{3\sqrt{3} - j}{2} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} + 3j \ln \Delta}{Q \cdot (\ln^2 2 - 3 \ln^2 \Delta - 2 \ln 2 \cdot \ln \Delta) + \frac{3}{Q} + 2j (\ln 2 + 3 \ln \Delta)},$$

где  $Q = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*}$ ,  $\Delta = \frac{s}{r}$  – производные безразмерные параметры КЛ.

Если токи в жилах образуют систему обратной последовательности, то в (8) коэффициент пропорциональности при  $i_{\text{ж}2}$  не изменится, а коэффициенты при  $i_{\text{ж}1}$  и  $i_{\text{ж}3}$  поменяются местами.

При прокладке кабелей в плоскости магнитная индукция поля КЛ может быть рассчитана при помощи (4) и (9), а эффективность экранирования  $SF$  может быть найдена при помощи (4), (5), (8) и (9). Поскольку в (9) коэффициенты пропорциональности между токами в экранах и жилах кабелей различны, то выражение для  $SF$  для этого случая будет иметь достаточно громоздкий вид. Поэтому для практического применения целесообразно использовать упрощенные расчетные соотношения.

**Упрощенное выражение для расчета эффективности экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости.** Для получения упрощенного аналитического выражения эффективности экранирования при прокладке кабелей в плоскости воспользуемся подходом, который основывается на альфа-бета преобразовании токов, протекающих в жилах кабелей. Этот подход применялся в [1, 15] для анализа эффективности экранирования МП трехфазных линий электропередачи при помощи контурных экранов. Поскольку токи в жилах кабелей образуют симметричную систему, то они могут быть представлены как суперпозиция  $\alpha$ - и  $\beta$ -компонент следующим образом:

$$\dot{i}_{ж1} = -\frac{\dot{I}_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}\dot{I}_\beta}{2}, \quad \dot{i}_{ж2} = \dot{I}_\alpha, \quad \dot{i}_{ж3} = -\frac{\dot{I}_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}\dot{I}_\beta}{2},$$

где  $\dot{I}_\alpha = I$ ,  $\dot{I}_\beta = -j \cdot I$ ,  $I$  – амплитуда тока в жилах кабелей.

Как следует из [1, 15], при удалении от КЛ на расстояние, превышающее расстояние между фазными кабелями, МП КЛ в основном определяется его дипольной составляющей, формируемой  $\beta$ -компонентами токов. Поэтому МП рассматриваемой КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами кабелей будет определяться  $\beta$ -компонентами токов в жилах  $\dot{i}_{ж1}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{ж2}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{ж3}^{(\beta)}$  и индуцированными ними токами в экранах  $\dot{i}_{\alpha 1}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{\alpha 2}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{\alpha 3}^{(\beta)}$ . Для нахождения  $\dot{i}_{\alpha 1}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{\alpha 2}^{(\beta)}$  и  $\dot{i}_{\alpha 3}^{(\beta)}$  достаточно в систему (1)–(3) вместо

$$\dot{i}_{ж1}, \dot{i}_{ж2}, \dot{i}_{ж3} \text{ подставить } \dot{i}_{ж1}^{(\beta)} = \frac{\sqrt{3}\dot{I}_\beta}{2}, \quad \dot{i}_{ж2}^{(\beta)} = 0, \quad \dot{i}_{ж3}^{(\beta)} = -\frac{\sqrt{3}\dot{I}_\beta}{2}.$$

Далее, подставляя значения  $\dot{i}_{ж1}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{ж2}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{ж3}^{(\beta)}$  и  $\dot{i}_{\alpha 1}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{\alpha 2}^{(\beta)}$ ,  $\dot{i}_{\alpha 3}^{(\beta)}$  в (4) и (8) и используя (5), получаем искомое упрощенное выражение для расчета эффективности экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости

$$SF^{(\beta)} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{2s}{r} \right|. \quad (10)$$

Погрешность расчета при помощи (10) определим как

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{SF^{(\beta)}}{SF} \right| \cdot 100\%, \quad (11)$$

где  $SF$  – точное значение эффективности экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости, вычисленное при помощи (4), (5), (8) и (9).

Определим значения погрешности  $\varepsilon$  с учетом реального разброса технических характеристик КЛ и технических параметров кабелей, определенных в соответствии с [3, 10, 11]. Для этого исследуем зависимость  $\varepsilon$  от активного сопротивления экранов  $R^*$  кабелей КЛ и расстояния между ее кабелями  $s$ , полагая, что точка наблюдения находится над центральным кабелем на высоте 0,5 м от уровня земли [10, С. 276]. Сопротивление  $R^*$  будем варьировать от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  Ом/м до  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Ом/м, характерных для медных экранов с поперечными сечениями от 200 мм<sup>2</sup> до 40 мм<sup>2</sup> соответственно [11, С. 23-24]. Расстояние между кабелями  $s$  будем варьировать от 0,1 м до 1 м. Значения  $s$ , превышающие 0,5 м, возможны в зонах муфтовых соединений КЛ [10, С. 301]. Минимальная глубина прокладки кабелей составляет  $h=0,7$  м для КЛ напряжением до 20 кВ [10, С. 280]. Характерное значение радиуса экрана одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 20 кВ составляет  $r=15$  мм [3, С. 39]. Для КЛ напряжением более 110 кВ минимальная глубина прокладки КЛ составляет  $h=1,5$  м [10, С. 280]. При этом характерный радиус экрана составляет  $r=30$  мм [3, С. 52].

Зависимости  $\varepsilon(R^*)$  и  $\varepsilon(s)$ , рассчитанные при глубине прокладки КЛ 0,7 м, представлены соответственно на рис. 4 и рис. 5, а при глубине прокладки 1,5 м – на рис. 6 и рис. 7.

Анализ представленных на рис. 4–7 зависимостей показывает, что с учетом разброса значений параметров реальных КЛ (глубины прокладки кабелей, расстояния между ними и характеристик экранов кабелей) погрешность применения (10) при расчете эффективности экранирования МП КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами кабелей при их прокладке в плоскости не превышает 5%, что позволяет рекомендовать полученное упрощенное расчетное соотношение (10) для практического применения.

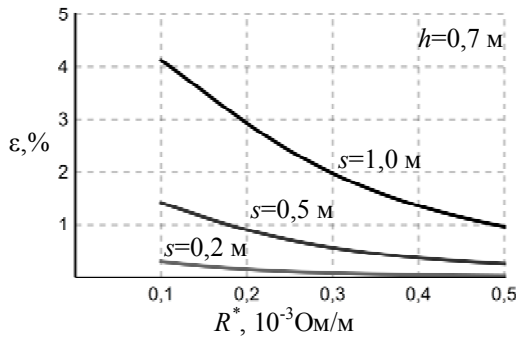


Рис. 4

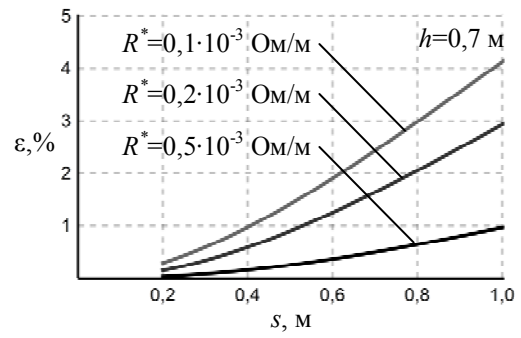


Рис. 5

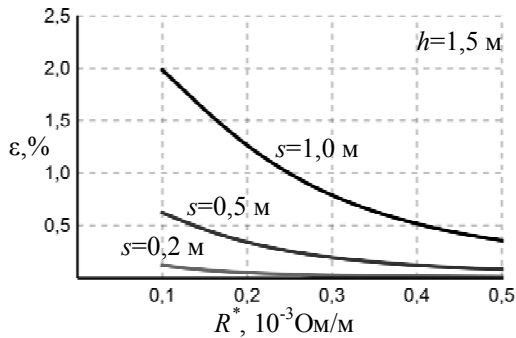


Рис. 6

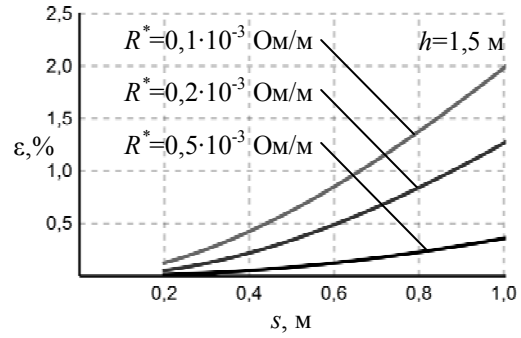


Рис. 7

**Выводы.** 1. Впервые предложена аналитическая модель МП трехфазной КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами кабелей, которая позволяет находить распределение МП КЛ при любом расположении кабелей в пространстве. Модель применима, если толщина экрана мала по сравнению с его радиусом, а распределение индуцированного тока в каждом из экранов можно полагать равномерным.

2. На основе предложенной аналитической модели получены явные аналитические выражения для токов, индуцируемых в экранах кабелей КЛ при их двухстороннем замыкании, и эффективности экранирования МП – для случаев прокладки кабелей треугольником и в плоскости.

3. Впервые получено точное компактное выражение для расчета эффективности экранирования МП КЛ с двухсторонне замкнутыми экранами кабелей при их прокладке треугольником, а также упрощенное компактное выражение для расчета эффективности экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости, погрешность которого не превышает 5%.

4. Полученные расчетные соотношения прошли экспериментальную проверку на лабораторной модели КЛ, выполненной из кабелей типа АПвЭгаПу-110 1×240/70, и рекомендуются для использования при проектировании высоковольтных трехфазных КЛ с нормированным уровнем МП в случае двухстороннего заземления экранов кабелей.

1. Грінченко В.С. Підхід до активного екранування магнітного поля лінії електропередачі на основі альфа-бета перетворення її струмів // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 11-13.

2. Грінченко В.С. Підвищення ефективності екранування техногенного магнітного поля високовольтних кабельних ліній // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – № 8. – С. 71-76.

3. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Гурин А.Г., Антоненко Ю.А., Золотарев В.В., Науменко А.А. Конструкции и электрическое поле кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. – Х.: Майдан, 2014. – 188 с.

4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.

5. Ковригин Л.А. Продольные токи в экранах одножильных кабелей // Кабель-news. – 2009. – № 3. – С. 56-58.

6. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.

7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 3-15.

8. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Повышение эффективности контурного экранирования магнитного поля высоковольтных кабельных линий // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 4. – С. 5-7.

9. Розов В.Ю., Квицинский А.А., Добродеев П.Н., Грінченко В.С., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двухстороннем заземлении их экранов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 4. – С. 56-61.

10. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с.

11. Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 45/150 кВ. – Х.: ЗАО «Завод «Южкабель», 2014. – 88 с.

12. Karady G.G., Nunez C.V., Raghavan R. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. – No 2. – Pp. 647-654.

13. Lin Y., Xu Z. Cable sheath loss reduction strategy research based on coupled line model // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. – No 5. – Pp. 1-8.
14. Matsuura K., Ohira S., Kinoshita H., Yamaguchi H., Takami S., Miyai K. A simplified analytical model of power cable for the calculation of transient voltage and current of faulted power systems // Electrical Engineering in Japan. – 1982. – Vol. 102. – No 3. – Pp. 59-66.
15. Walling R.A., Paserba J.J., Burns C.W. Series-capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 8. – No 1. – Pp. 461-469.

УДК 621.3.013

### АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРИФАЗНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАМИКАННІ ВЛАСНИХ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ

**В.Ю. Розов**, чл.-кор. НАН України, **О.О. Ткаченко**, **А.В. Єрісов**, **В.С. Грінченко**, канд.техн.наук  
ДУ “Інститут технічних проблем магнетизму НАН України”,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

*Запропоновано аналітичну модель магнітного поля високовольтної трифазної кабельної лінії, яка складається з одножильних кабелів, у випадку двостороннього замикання власних екранів кабелів. Модель дозволяє розраховувати величини струмів, що індукуються в екранах, та просторовий розподіл магнітної індукції для довільного розташування кабелів у просторі. Отримано точний компактний вираз для визначення ефективності екранування магнітного поля кабельної лінії при двосторонньому замиканні екранів у випадку прокладання кабелів трикутником. Теоретично і експериментально обґрунтовано спрощений компактний вираз для визначення ефективності екранування магнітного поля кабельної лінії при прокладанні кабелів у площині, похибка якого не перевищує 5%. Бібл. 15, рис. 7.*

**Ключові слова:** кабельна лінія, магнітне поле, екран кабелю, заземлення екранів, ефективність екранування.

### ANALYTICAL CALCULATION OF MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE CABLE LINES WITH TWO-POINT BONDED SHIELDS

**V.Yu. Rozov, O.O. Tkachenko, A.V. Yerisov, V.S. Grinchenko**

**State Institution Institute of Technical Problems of the Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine, 19, Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com**

*In this paper we produce an analytical model of the magnetic field of high-voltage three-phase cable line with two-point bonded shields. It's supposed that the cable line consists of three single-core XLPE insulated cables. The produced analytical model allows to calculate the electric currents induced in shields of cables and to determine the magnetic field distribution for the arbitrary layout of cables. We receive an exact compact expression for shielding factor of the magnetic field of the trefoil cable line with two-point bonded shields. Also we receive a simplistic compact expression for shielding factor of the magnetic field of the flat cable line with two-point bonded shields. The comparison with exact analytical expression and experimental results shows that error of simplistic expression lays within 5%. References 15, figures 7.*

**Key words:** cable line, magnetic field, cable shield, shield grounding, shielding factor.

1. Grinchenko V.S. Alpha-beta transformation approach for the active shielding of flat power line // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 4. – Pp. 11-13.
2. Grinchenko V.S. Increase of screening efficiency of technogenic magnetic field of underground high-voltage power cables // Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2014. – No 8. – Pp. 71-76. (Ukr)
3. Zolotarev V.M., Karpushenko V.P., Gurin A.G., Antonec Ju.A., Zolotarev V.V., Naumenko A.A. Designs and electrical field of cables with XLPE insulation. – Kharkiv: Maidan, 2014. – 188 p. (Rus)
4. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. Inductance calculations. – Leningrad: Energoatomizdat, 1986. – 488 p. (Rus)
5. Kovrigin L.A. The longitudinal currents in the screens of the single-core cables // Kabel-news. – 2009. – No 3. – Pp. 56-58. (Rus)
6. Larina E.T. Power cables and high-voltage cable lines. – Moskva: Energoatomizdat, 1996. – 464 p. (Rus)
7. Podolisev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling of electrotechnical devices // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 2. – Pp. 3-15. (Rus)
8. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Increasing the efficiency of contour shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 4. – Pp. 5-7. (Rus)
9. Rozov V.Yu., Kyvitsynskyi A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields // Electrical engineering & Electromechanics. – 2015. – No 4. – Pp. 56-61. (Rus)
10. Electrical Installation Regulations. – Kharkiv: Minenerhovuhillia Ukrainy, 2014. – 793 p. (Ukr)
11. Guidance for the selection, laying, installation, testing and operation of 45/150 kV XLPE insulated high voltage power cables. – Kharkiv: ZAO «Yuzhkabel», 2014. – 88 p. (Rus)
12. Karady G.G., Nunez C.V., Raghavan R. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. – No 2. – Pp. 647-654. DOI: 10.1109/61.660956.
13. Lin Y., Xu Z. Cable sheath loss reduction strategy research based on coupled line model // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. – No 5. – Pp. 1-8. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2414655.
14. Matsuura K., Ohira S., Kinoshita H., Yamaguchi H., Takami S., Miyai K. A simplified analytical model of power cable for the calculation of transient voltage and current of faulted power systems // Electrical Engineering in Japan. – 1982. – Vol. 102. – No 3. – Pp. 59-66. DOI: 10.1002/ECJA.4391020308.
15. Walling R.A., Paserba J.J., Burns C.W. Series-capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 8. – No 1. – Pp. 461-469. DOI: 10.1109/61.180369.

Надійшла 08.12.2016

Остаточний варіант 19.12.2016