

В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ЗАМЫКАНИИ СОБСТВЕННЫХ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ, ОХВАЧЕННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Отримано компактні співвідношення для розрахунку ефективності екранування магнітного поля високовольтної трифазної кабельної лінії, що складається з одножильних кабелів охоплених ферромагнітними осерддями, при двосторонньому замиканні власних екранів. Розглянуто кабельні лінії з прокладкою кабелів трикутником і в площині. Запропоновані співвідношення для розрахунку ефективності екранування магнітного поля верифіковано експериментально. Бібл. 11, рис. 3.

Ключові слова: кабельна лінія, екран кабелю, магнітне поле, двостороннє заземлення, ферромагнітне осердя.

Получены компактные соотношения для расчета эффективности экранирования магнитного поля высоковольтной трехфазной кабельной линии, состоящей из одножильных кабелей, которые охвачены ферромагнитными сердечниками, при двустороннем замыкании собственных экранов. Рассмотрены кабельные линии с укладкой кабелей треугольником и в плоскости. Предложенные соотношения для расчета эффективности экранирования магнитного поля верифицированы экспериментально. Библ. 11, рис. 3.

Ключевые слова: кабельная линия, экран кабеля, магнитное поле, двустороннее заземление, ферромагнитный сердечник.

Введение. Выполнение норм по предельно допустимым уровням магнитной индукции является обязательным при прокладке высоковольтных кабельных линий (КЛ). В Украине предельно допустимый уровень магнитной индукции внутри жилых помещений, расположенных вблизи КЛ, составляет 0,5 мкТл [1, С. 277]. При увеличении расстояния между одножильными кабелями КЛ со шито-полиэтиленовой изоляцией, величина магнитной индукции КЛ может существенно превысить допустимый уровень [1, С. 285].

Для уменьшения магнитного поля (МП) КЛ применяются электромагнитные, магнитоэлектрические и контурные экраны [2-4]. Другой подход к уменьшению МП КЛ, не требующий установки дополнительных экранов, заключается в двухстороннем замыкании собственных экранов кабелей КЛ путем их двухстороннего заземления на обоих концах зоны экранирования [5-7]. В этом случае эффективность экранирования МП составляет 1,5÷2,5 [5], что не всегда достаточно для нормализации МП КЛ. Дальнейшее повышение эффективности экранирования МП может быть достигнуто путем усиления магнитной связи между жилами и экранами кабелей КЛ [8]. Для этого каждый из кабелей (рис. 1) охватывается ферромагнитным сердечником (ФС) из шихтованной электро-технической стали.

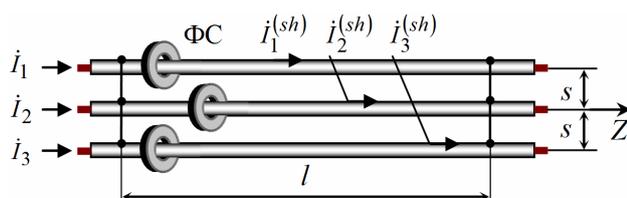


Рис. 1. Трехфазная КЛ с установленными ФС

В [8] экспериментально исследована зависимость эффективности экранирования МП от количества ФС, установленных на каждом из кабелей. Измерения,

выполненные на физическом макете КЛ, подтвердили возможность 2÷4 кратного увеличения эффективности экранирования по сравнению с традиционным двусторонним замыканием экранов кабелей. Однако предложенные в [8] соотношения для расчета эффективности экранирования МП КЛ с ферромагнитными сердечниками требуют уточнения.

Целью данной работы является получение теоретически обоснованных соотношений для расчета эффективности экранирования магнитного поля трехфазной кабельной линии с двусторонне замкнутыми экранами и установленными на кабелях ферромагнитными сердечниками.

Эффективность экранирования МП КЛ при прокладке кабелей треугольником. Эффективность экранирования МП определяется как отношение действующего значения магнитной индукции до двухстороннего замыкания экранов кабелей к действующему значению магнитной индукции после замыкания экранов кабелей [9]:

$$SF = \left| \frac{\dot{B}_0}{\dot{B}} \right| \quad (1)$$

Будем считать, что кабели прямые (или радиусом их кривизны можно пренебречь) и параллельны друг другу. В случае, когда экраны кабелей разомкнуты, МП КЛ определяется только токами в жилах. Если ось X параллельна уровню земли и перпендикулярна осям кабелей, а ось Y направлена вверх, то комплексная амплитуда магнитной индукции в точке с координатами (x, y) равна [9]:

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

где $k = \overline{1, 3}$ – номер кабеля; \dot{I}_k – комплексная амплитуда тока в жиле k -ого кабеля; \vec{e}_x, \vec{e}_y – орты декартовой системы координат; (x_k, y_k) – координаты оси k -ого кабеля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

При двухстороннем замыкании экранов комплексная амплитуда магнитной индукции равна [9]:

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

где $\dot{I}_k^{(sh)}$ – комплексная амплитуда тока в экране k -ого кабеля.

Как видно из (1)-(3) для расчета эффективности экранирования необходимо определить токи в экранах кабелей при наличии ферромагнитных сердечников.

Рассмотрим трехфазную КЛ с треугольной прокладкой кабелей, охваченных цилиндрическими ферромагнитными сердечниками (рис. 1).

Поскольку экраны кабелей замкнуты с обоих концов КЛ, то для индуцированных в них токов выполняется 1-й закон Кирхгофа:

$$\dot{I}_1^{(sh)} + \dot{I}_2^{(sh)} + \dot{I}_3^{(sh)} = 0. \quad (4)$$

Рассмотрим контур, образованный экранами 1-ого и 2-ого кабелей, и контур, образованный экранами 2-ого и 3-ого кабелей. ЭДС, индуцированные в контурах, определяются магнитными потоками, которые их пронизывают [10, С. 59]. На основании закона Ома в комплексной форме и закона электромагнитной индукции запишем следующие соотношения для каждого из контуров:

$$\begin{aligned} \left(\dot{I}_1^{(sh)} - \dot{I}_2^{(sh)} \right) \cdot R^* &= -j\omega \cdot \left(\dot{\Psi}_1^{(1,2)} - \dot{\Psi}_2^{(1,2)} \right), \\ \left(\dot{I}_2^{(sh)} - \dot{I}_3^{(sh)} \right) \cdot R^* &= -j\omega \cdot \left(\dot{\Psi}_2^{(2,3)} - \dot{\Psi}_3^{(2,3)} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где j – мнимая единица; $\omega = 2\pi \cdot 50$ с⁻¹ – угловая частота тока; R^* – активное сопротивление единицы длины экрана кабеля, Ом/м; $\dot{\Psi}_k^{(m,n)} \equiv \dot{\Psi}_k^{(n,m)}$ – комплексная амплитуда полного потока магнитного поля, которое создается токами жилы и экрана k -ого кабеля и пронизывает контур, образованный экранами кабелей с номерами m и n .

Для треугольной КЛ в силу осевой симметрии $\dot{\Psi}_k^{(m,n)} = 0$, когда $k \neq m$ и $k \neq n$.

Для расчета $\dot{\Psi}_k^{(k,n)}$ примем следующие допущения:

– распределение индуцированного тока в экране каждого кабеля равномерно;

– цилиндрические ФС, охватывающие кабели, не намагничиваются до насыщения, а их магнитная проницаемость постоянна и равна μ ;

– каждый из ФС намагничивается токами жилы и экрана только того кабеля, который он охватывает, а МП внутри ФС осесимметрично;

– на всей протяженности КЛ МП является плоскопараллельным.

Тогда комплексная амплитуда магнитной индукции поля, создаваемого токами жилы и экрана k -ого кабеля, имеет только угловую компоненту относительно оси k -ого кабеля и равна $\mu\mu_0 \left(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k \right) / 2\pi r$ внутри ФС и $\mu_0 \left(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k \right) / 2\pi r$ вне ФС. Разбивая токи в экранах кабелей с номерами k и n на элементарные трубки тока бесконечно малого сечения [11, С. 8], и проводя интегрирование по всевозможным контурам, образованных этими трубками, находим:

$$\dot{\Psi}_k^{(k,n)} = \frac{\mu_0 \left(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k \right)}{2\pi} \cdot \ln \frac{s}{r} + \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0 \left(\dot{I}_k^{(sh)} + \dot{I}_k \right)}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (6)$$

где s – расстояние между осями кабелей, м; r – радиус экрана, м; l – длина экранированного участка КЛ, м; l_{core} – суммарная длина ФС, установленных на каждый из кабелей, м; r_1 и r_2 – соответственно, внешний и внутренний радиус ФС, м;

Выражения (4)-(5) образуют систему трех уравнений относительно $\dot{I}_1^{(sh)}$, $\dot{I}_2^{(sh)}$ и $\dot{I}_3^{(sh)}$. Подставляя (6) находим её решение:

$$\dot{I}_k^{(sh)} = -\dot{I}_k \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \alpha \cdot \dot{I}_k, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad (7)$$

где $M^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{s}{r} + \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}$ – удельная эквивалентная индуктивность экрана, охваченного сердечником, Гн/м.

Подставляя (7) в (1)-(3) получаем окончательное соотношение для эффективности экранирования в случае треугольной укладки кабелей:

$$SF_{trefoil} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| \frac{1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{s}{r} + j \cdot \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}}{1 + \alpha} \right|. \quad (8)$$

Эффективность экранирования МП КЛ при прокладке кабелей в плоскости. В [9] авторами показано, что для анализа МП КЛ с плоской прокладкой кабелей достаточно рассмотреть дипольную составляющую поля, а упрощенное соотношение для расчета эффективности экранирования при прокладке кабелей в плоскости может быть получено подстановкой $s \rightarrow 2 \cdot s$ в соотношение для эффективности экранирования при прокладке кабелей треугольником. Следовательно, при прокладке кабелей в плоскости

$$SF_{flat} = \left| \begin{array}{l} 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{2s}{r} + \\ + j \cdot \frac{l_{core}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \end{array} \right|. \quad (9)$$

Для верификации соотношения (9) воспользуемся результатами экспериментальных исследований, выполненных авторами [8]. Исследования проводились на физическом макете КЛ. Макет выполнен из кабелей типа АПвЭгаПу-110 1×240/70 длиной $l=10$ м (рис. 2). Активное сопротивление единицы длины экрана кабеля $R^*=0,29 \times 10^{-3}$ Ом/м. Расстояние между осями кабелей – 0,2 м. Действующее значение тока в жилах кабелей – 95 А.



Рис. 2. Физический макет КЛ

В качестве ФС использовались статорные сердечники асинхронных электродвигателей, которые выполнены из шихтованной электротехнической стали. Магнитная проницаемость сердечников $\mu=3000$ была определена экспериментально. Внешний радиус сердечника $r_1=65$ мм, внутренний – $r_2=50$ мм. Длина одного сердечника равна 100 мм.

Число ФС, устанавливаемых на каждый кабель, варьировалось от 0 до 3. Соответственно, суммарная длина сердечников ФС, установленных на каждый из кабелей при проведении экспериментальных исследований, составляла 0, 100 мм, 200 мм и 300 мм.

Измерение магнитной индукции выполнялось с помощью трехкомпонентного магнитометра EMF-828.

На рис. 3 показаны: построенная согласно (9) кривая зависимости эффективности экранирования от суммарной длины ФС, установленных на каждый из кабелей, и точки, соответствующие результатам измерения эффективности экранирования на макете КЛ. Как видно из рисунка, в отсутствии ФС результаты расчета и измерений совпадают. При использовании ФС отклонение экспериментальных данных от результатов расчета не превышает 15 %.

Соотношение (8) по сравнению с (9) получено при более мягких допущениях. Поэтому можно утверждать, что погрешность применения (8) также не превысит 15 %.

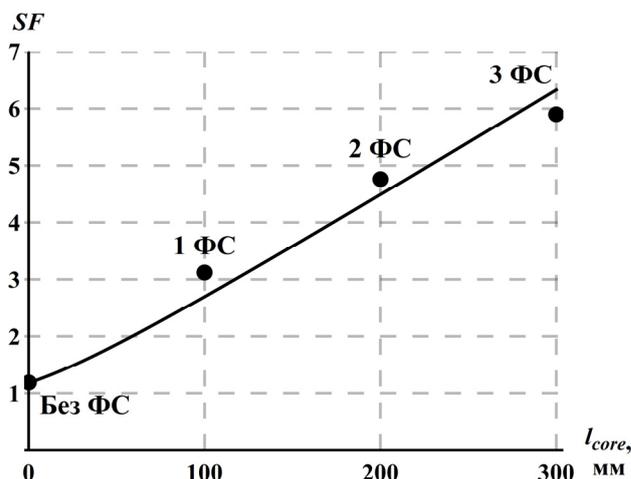


Рис. 3. Зависимость эффективности экранирования МП КЛ от суммарной длины ФС

Выводы.

1. Впервые получены теоретически обоснованные соотношения для инженерного расчета эффективности экранирования магнитного поля кабельной линии для случаев прокладки кабелей в плоскости и треугольнике при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками.

2. Экспериментальные исследования, проведенные на физическом макете кабельной линии, подтвердили корректность полученных расчетных соотношений, погрешность которых не превышает 15 %, если расстояние между кабелями втрое больше внешнего радиуса ферромагнитных сердечников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Вид. 5-те, перероб. й доп. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с.
2. Резинкина М.М., Гринченко В.С. Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов // Вісник НТУ «ХПИ». – 2012. – №49. – С. 73-78.
3. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic-field mitigation: High magnetic coupling passive loop // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – vol.26. – no.3. – pp. 1625-1633. doi: 10.1109/tpwr.2010.2099671.
4. De Wulf M., Wouters P., Sergean P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – vol.316. – no.2. – pp. 908-911. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.137.
5. Розов В.Ю., Квицинский А.А., Добродеев П.Н., Гринченко В.С., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С. 56-61. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
6. СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.
7. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с.
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., Ткаченко А.О., Ерисов А.В., Гринченко В.С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей // Технічна електродинаміка. – 2017. – №2. – С. 13-18.

10. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.

11. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справ. кн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.

REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations], 5th ed. Kharkiv, Minenergougillya of Ukraine, 2014. 793 p. (Ukr).
2. Rezinikina M.M., Grinchenko V.S. Underground busbars magnetic field mitigation with the help of electro-magnetic shields, consisted of U-shaped elements. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2012, no.49, pp. 73-78. (Rus).
3. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic-field mitigation: High magnetic coupling passive loop. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol.26, no.3, pp. 1625-1633. doi: 10.1109/tpwrd.2010.2099671.
4. De Wulf M., Wouters P., Sergean P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, vol.316, no.2, pp. 908-911. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.137.
5. Rozov V.Yu., Kvytsynskyi A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V. and Tkachenko O.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). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
6. SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011.2. *Proektuvannya kabelnykh linii napruhoiu do 330 kV. Nastanova* [Design of cable lines with voltage up to 330 kV. Guidance]. Kyiv, Minenergougillya of Ukraine Publ., 2017, 139 p. (Ukr).
7. SOU-N EE 20.179:2008. *Rozrakhunok elektrychnoho i mahnitnoho poliv linii elektroperedavannya. Metodyka* [Calculation of the electric and magnetic fields of power line. Method]. Kyiv, Minenergougillya of Ukraine Publ., 2016, 34 p. (Ukr).
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., Tkachenko O.O., Erisov A.V. and Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no.2, pp. 13-18 (Rus).

10. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: V 3-kh t. Uchebnik dlia vuzov. Tom 1* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols. Vol.1]. St. Petersburg, Piter Publ, 2003. 463 p. (Rus).

11. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).

Поступила (received) 07.08.2017

Розов Владимир Юрьевич¹, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, Гринченко Владимир Сергеевич¹, к.т.н., Ткаченко Александр Олегович¹, аспирант,
¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +380 572 992162, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

V.Yu. Rozov¹, V.S. Grinchenko¹, O.O. Tkachenko¹
¹ State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

Calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded cable shields covered by ferromagnetic cores.

In this paper we obtain compact expressions for the magnetic field shielding factor of a high-voltage three-phase cable line consisting of single-core cables with two-point bonded cable shields and ferromagnetic cores installed. To obtain these expressions we develop the analytical model of the cable line. Following assumptions are made to develop the model: the current distribution in each cable shield is uniform, cylindrical ferromagnetic cores covering the cables are not magnetized to saturation and their magnetic permeability is constant, each of the ferromagnetic cores is magnetized only by the core current and the shield current of the cable that it covers, the magnetic field inside ferromagnetic cores is axisymmetric, the magnetic field is plane-parallel over the entire cable line. We consider common cases of flat and trefoil cable lines. The proposed expressions for the magnetic field shielding factor are verified experimentally. The physical model is made of three cables of the type NA2XSF(L)2Y-110 1×240/70. It is shown that the difference between numerical simulation results and experimental data lays within 15 %. References 11, figures 3.

Key words: cable line, shield of cable, magnetic field, bonded shields, ferromagnetic core.