

ДВУХКОНТУРНОЕ ПАССИВНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В ЗОНАХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ МУФТ

В.Ю. Розов¹, чл.-корр. НАН Украины, П.Н. Добродеев¹, канд.техн.наук, А.А. Квицинский², канд.техн.наук

¹ – ГУ «Институт технических проблем магнетизма НАН Украины»,

ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина, e-mail: rozov@pas.gov.ua

² – Научно-проектный центр развития Объединенной энергетической системы Украины ГП «НЭК «Укрэнерго», ул. Дорогожицкая, 11/8, Киев, 04112, Украина.

Выполнено дипольное моделирование магнитного поля (МП) над зоной соединительных муфт трехфазной кабельной линии (КЛ) для типичного случая удаления точек наблюдения на расстояние, превышающее двойное расстояние между кабелями КЛ. Показано, что МП трехфазной КЛ при условии симметрии питающих напряжений может быть определено дипольными магнитными моментами только двух ее токовых контуров, что обосновывает возможность эффективного использования двухконтурного экранирования МП КЛ вместо известного трехконтурного. Предложена двухконтурная система пассивного экранирования зон соединительных муфт подземных высоковольтных трехфазных кабельных линий, отличающаяся уменьшенным количеством ее элементов (ферромагнитных сердечников) при сохранении коэффициента экранирования более 10, что имеет экспериментальное подтверждение. Библ. 9, рис. 7.

Ключевые слова: кабельная линия, магнитное поле, контурное пассивное экранирование.

Введение. В настоящее время для передачи электрической энергии в черте городов все более широко используются высоковольтные подземные трехфазные кабельные линии (КЛ) из одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, что в целом позволяет решить проблему снижения до безопасного уровня [1] индукции магнитного поля (МП) промышленной частоты в зоне жилой застройки. Однако имеются отдельные участки таких КЛ с повышенным уровнем МП. К ним, в первую очередь, относятся зоны соединительных муфт КЛ (рис. 1), характеризующиеся увеличенным расстоянием d_3 между фазными кабелями высоковольтных КЛ (не менее 0,5 м) [1], что зачастую приводит к превышению безопасного уровня индукции МП КЛ и необходимости его снижения (нормализации) [5, 8, 9].

Как правило, нормализация МП осуществляется методами экранирования зон соединительных муфт КЛ с помощью электромагнитных плоских (П-образных), магнитоэлектрических либо пассивных контурных экранов [8, 9]. При этом наиболее перспективными по эффективности экранирования трехфазных КЛ и возможностям практической реализации являются предложенные в [6,

7] пассивные системы контурного экранирования (СКЭ) с ферромагнитными сердечниками. Такие трехконтурные СКЭ (рис. 2) содержат три замкнутых на краях зоны экранирования экранных кабеля (ЭК) с высокой электропроводностью, накладываемых на соответствующие токонесящие кабели трехфазной КЛ, и три замкнутых ферромагнитных сердечника (ФС), каждый из которых охватывает токонесящий и экранный кабели одной из фаз КЛ.

Представленная на рис. 2 трехконтурная СКЭ характеризуется высокой эффективностью (коэффициент экранирования МП 10 и более), что достигается путем обеспечения усиленной магнитной связи между токонесящими и экранными кабелями каждой из фаз за счет применения ФС [6]. Наличие ФС создает условия для индуцирования в экранных кабелях токов $I_{ЭА}$, $I_{ЭВ}$, $I_{ЭС}$, амплитуда и фаза которых обеспечивают макси-

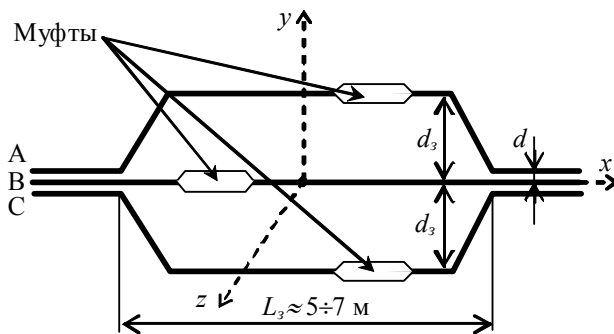


Рис. 1

муму магнитного поля. Как правило, нормализация МП осуществляется методами экранирования зон соединительных муфт КЛ с помощью электромагнитных плоских (П-образных), магнитоэлектрических либо пассивных контурных экранов [8, 9]. При этом наиболее перспективными по эффективности экранирования трехфазных КЛ и возможностям практической реализации являются предложенные в [6,

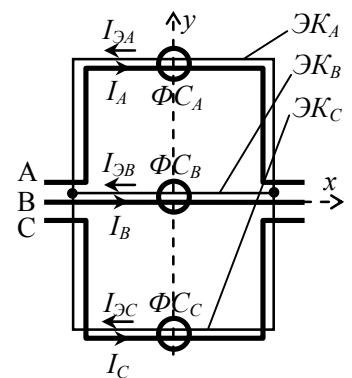


Рис. 2

мальный экранирующий эффект. Однако широкое практическое использование трехконтурных СКЭ сдерживается достаточно высокой стоимостью их изготовления и монтажа, существенно зависящей от количества шихтованных ФС, конструкция которых должна быть разъемной и защищенной от атмосферных воздействий в условиях длительной эксплуатации под слоем грунта [1].

Целью настоящей работы является определение возможности уменьшения количества ферромагнитных сердечников системы контурного экранирования МП зон соединительных муфт трехфазных КЛ при условии сохранения исходной высокой эффективности экранирования.

Реализацию указанной цели осуществим на основе предложенной в [2] двухконтурной дипольной математической модели МП трехфазной электрической цепи, применяя ее для зоны соединительных муфт КЛ.

Дипольная модель МП зоны соединительных муфт КЛ. Для упрощения дальнейшего анализа предположим, что зона соединительных муфт КЛ, которая всегда располагается в горизонтальной плоскости [1], соответствует рис. 3, а. Она имеет протяженность a и ширину $2d_3 \geq 2a$, где d_3 – расстояние между фазными кабелями КЛ в зоне a . Учитывая существенное, на порядок и более, увеличенное расстояние d_3 КЛ в исследуемой зоне a (рис. 1) по сравнению с величиной d вне этой зоны, где кабели часто укладываются вплотную и создают слабое МП, его влиянием при анализе пренебрегаем. Тогда МП в точке наблюдения P при отсутствии сторонних источников будет определяться только зоной соединительных муфт a КЛ, кабели которой представим в виде токовых нитей.

Минимальная величина радиус-вектора R_{\min} из геометрического центра O_3 в точку P (рис. 3, а) определяется нормативной высотой точки измерения МП подземной КЛ над поверхностью Земли (0,5 м) и глубиной h залегания кабелей ($h = 0,7$ м для КЛ до 20 кВ либо $h = 1,5$ м для КЛ 110-330 кВ), и составляет 1,2 м при $h = 0,7$ м и $d_3 = 0,25$ м либо 2 м при $h = 1,5$ м и $d_3 = 0,5$ м [1]. Для всех этих случаев удовлетворяется условие $R_{\min} > 2d_3$ применимости дипольного представления МП КЛ [2, 3].

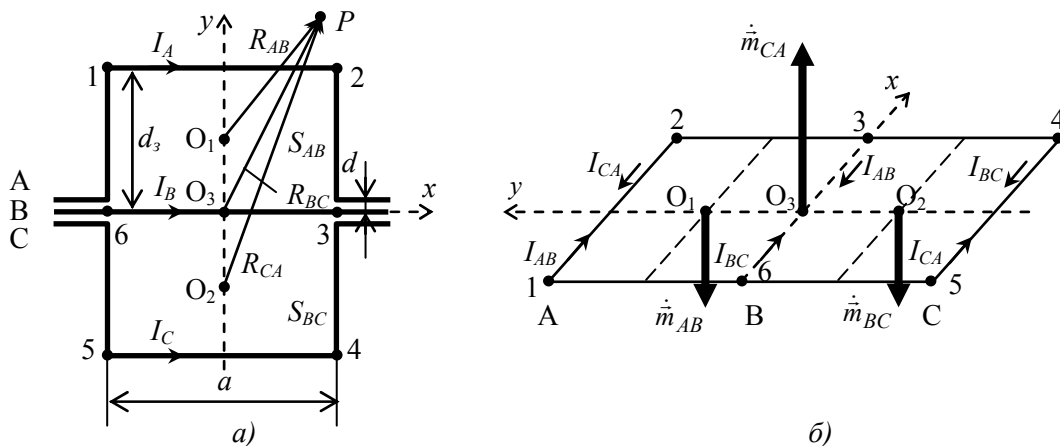


Рис. 3

Тогда напряженность МП, создаваемая трехфазной цепью (рис. 3, а) с учетом квазистационарности МП промышленной частоты, может быть определена через скалярный магнитный потенциал, определяемый уравнением Лапласа, и представлена как суперпозиция дипольных составляющих МП трех ее независимых токовых контуров. Каждый из этих контуров характеризуется дипольными магнитными моментами (ММ) \dot{m}_i , которые определяются величинами контурных токов \dot{I}_i и связанных с ними площадями контуров \vec{S}_i [3]

$$\dot{H}(P) = -\sum_{i=1}^3 \nabla \left[\frac{(\dot{m}_i, \vec{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right], \quad \dot{m}_i = \dot{I}_i \cdot \vec{S}_i = \dot{I}_i \cdot a \cdot d_3 \cdot \vec{n}_i, \quad (1)$$

где \vec{R}_i – радиус-вектор, направленный из геометрического центра i -го контура в точку наблюдения P ; \vec{n}_i – единичный вектор, нормальный к площади S_i ; $i \in (AB, BC, CA)$.

Схема расположения ММ трехконтурной дипольной модели трехфазной цепи представлена на рис. 3, б.

Очевидно, что СКЭ для цепи, представленной на рис. 3, а, в общем случае должна формировать три экранирующих ММ, направленных встречно ММ КЛ (рис 3, б), для чего требуются три экранирующих контура в соответствии с рис. 2, что и реализует известная СКЭ [6].

Однако проведенный в [3] анализ показывает, что при условии симметрии питающих напряжений КЛ

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0, \quad (2)$$

которое, как правило, выполняется в высоковольтных электросетях [1], модель дипольных источников МП для цепи (рис. 3, а) может быть построена на основе двух токовых контуров вместо трех. Эти контуры характеризуются площадью \bar{S}_{AB} (контур 1-2-3-6-1) с током \dot{I}_A и площадью \bar{S}_{BC} (контур 6-3-4-5-6) с током $-\dot{I}_C$ и могут использоваться в качестве параметров математической модели МП. Тогда для экранирования МП достаточно двух экранирующих контуров (рис. 4, а).

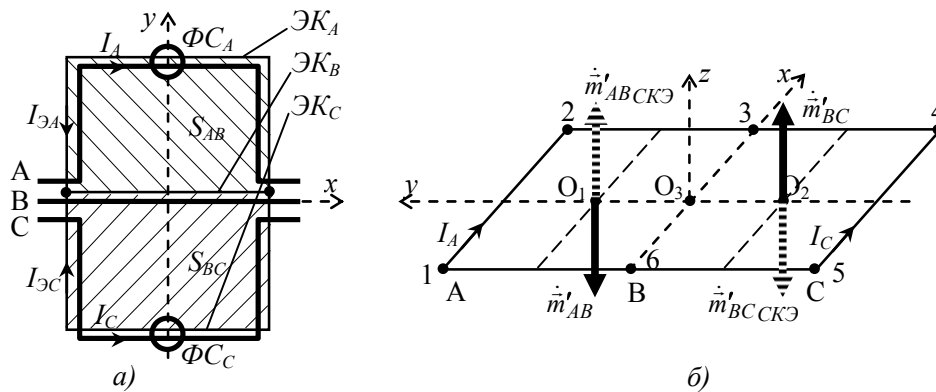


Рис. 4

При использовании двухконтурной модели трехфазной цепи (рис. 3, а) напряженность МП в соответствии с [3] может быть выражена соотношением

$$\dot{H}(P) = -\nabla \left[\frac{(\dot{m}_{AB}, \bar{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} + \frac{(\dot{m}_{BC}, \bar{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} \right]; \quad \dot{m}_{AB} = \dot{I}_A \cdot \bar{S}_{AB}; \quad \dot{m}_{BC} = -\dot{I}_C \cdot \bar{S}_{BC}, \quad (3)$$

и определяется двумя ММ \dot{m}'_{AB} и \dot{m}'_{BC} , схема расположения которых показана на рис. 4, б. Здесь же пунктиром показаны два экранирующих ММ $\dot{m}'_{AB\text{СКЭ}}$ и $\dot{m}'_{BC\text{СКЭ}}$, которые могут быть созданы предлагаемой двухконтурной СКЭ, представленной на рис. 4, а и содержащей два ФС вместо трех.

Максимальная эффективность экранирования МП КЛ (рис. 4, а) обеспечивается при условии совпадения точек приложения направленных встречно одноименных ММ КЛ и СКЭ (рис. 4, б) и выражается уравнением экранирования

$$\dot{m}'_{AB\text{СКЭ}} = \dot{m}'_{AB\text{КЛ}}; \quad \dot{m}'_{BC\text{СКЭ}} = \dot{m}'_{BC\text{КЛ}}. \quad (4)$$

Перейдем теперь к реальной зоне соединительных муфт КЛ (рис. 1), имеющей протяженность $L_3 \gg d_3$. Условно разобьем эту зону по длине на N отрезков (рис. 5) с N микроконтурами протяженностью $a = d_3$. Каждый из этих микроконтуров характеризуется ММ $\dot{m}'_{AB\gamma}$ и $\dot{m}'_{BC\gamma}$, создаваемыми токами \dot{I}_A и $-\dot{I}_C$ соответственно. Тогда МП электрической цепи может быть определено на основе мультидипольной математической модели МП [3] как суперпозиция МП каждого из N микроконтуров и с учетом (3) выражено соотношением

$$\dot{H}_{\text{КЛ}}(P) = -\sum_{\gamma=1}^N \nabla \left[\frac{(\dot{m}'_{AB\gamma}, \bar{R}_{AB\gamma})}{4\pi R_{AB\gamma}^3} + \frac{(\dot{m}'_{BC\gamma}, \bar{R}_{BC\gamma})}{4\pi R_{BC\gamma}^3} \right], \quad (5)$$

где $N = L_3/d_3$.

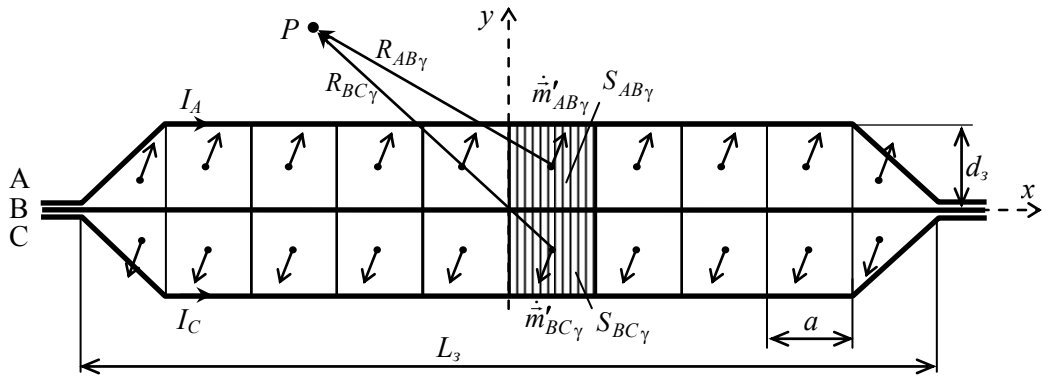


Рис. 5

Двухконтурная система экранирования МП. Предлагаемая двухконтурная СКЭ (рис. 4, а) содержит три ЭК, размещенных вплотную к одноименным кабелям КЛ и повторяющих их конфигурацию. С помощью ΦC_A и ΦC_C в кабелях $\mathcal{E}K_A$ и $\mathcal{E}K_C$ индуцируются экранирующие токи $I_{\mathcal{E}A}$ и $-I_{\mathcal{E}C}$, которые замыкаются через $\mathcal{E}K_B$ и создают экранирующее МП напряженностью $\dot{\vec{H}}_{СКЭ}(P)$, направленное встречно МП КЛ. Напряженность МП $\dot{\vec{H}}_{СКЭ}(P)$ для зоны L_3 (рис. 5) может быть выражена через экранирующие ММ $\dot{\vec{m}}'_{AB_{СКЭ\gamma}}$, $\dot{\vec{m}}'_{BC_{СКЭ\gamma}}$ и определена из соотношения (5) путем подстановки в него соответствующих ММ СКЭ вместо ММ КЛ.

Эффективность СКЭ принято характеризовать коэффициентом экранирования $k_{\mathcal{E}}(P)$ [9]

$$k_{\mathcal{E}}(P) = \frac{|\dot{\vec{H}}_{КЛ}(P)|}{|\dot{\vec{H}}_{КЛ}(P) + \dot{\vec{H}}_{СКЭ}(P)|}, \quad (6)$$

который, как правило, определяется в точке, характеризуемой максимумом МП.

Таким образом, проведенный выше анализ позволяет предложить двухконтурную СКЭ (рис. 4, а), содержащую два ФС и имеющую тот же коэффициент экранирования МП, что и известная трехконтурная СКЭ (рис. 2), содержащая три ФС.

Экспериментальные исследования СКЭ. Эффективность известной трехконтурной и предложенной двухконтурной СКЭ исследована на лабораторной модели трехфазной КЛ [4], содержащей три одножильных кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена типа АПвЭгаПу-110 длиной 10 м. Расстояние d между осями кабелей, расположенных в горизонтальной плоскости xu , равно 0,5 м, действующее значение тока в жилах – 95 А. Несимметрия питающих напряжений модели КЛ достигает 10%. Собственные внутренние экраны кабелей разомкнуты. Протяженность экранируемого участка КЛ составляет около 4 м. Экранирующие кабели СКЭ и перемычки между ними выполнены из медных одножильных кабелей сечением 150 мм².

В качестве ферромагнитных сердечников СКЭ применены статорные сердечники асинхронных электродвигателей с внешним диаметром 130 мм, внутренним диаметром 72 мм и длиной 100 мм, которые использовались по два на фазу (рис. 6). Они устанавливались на каждый из одноименных кабелей КЛ и СКЭ (модель трехконтурной СКЭ, рис. 2) либо (в соответствии с рис. 4, а) на два крайних кабеля КЛ и СКЭ (модель двухконтурной СКЭ, рис. 6).



Рис. 6

Измерения индукции МП выполнялись векторным магнитометром типа EMF-828 (инструментальная погрешность $\leq 5\%$) в центральной части экранируемого участка КЛ и проводились на высоте 2 м при удалении от центра КЛ по направлению оси y (рис. 5).

Результаты измерений индукции МП представлены на рис. 7, а. По результатам измерений в соответствии с (6) определены значения коэффициентов экранирования $k_Э$ для различных СКЭ, которые представлены на рис. 7, б.

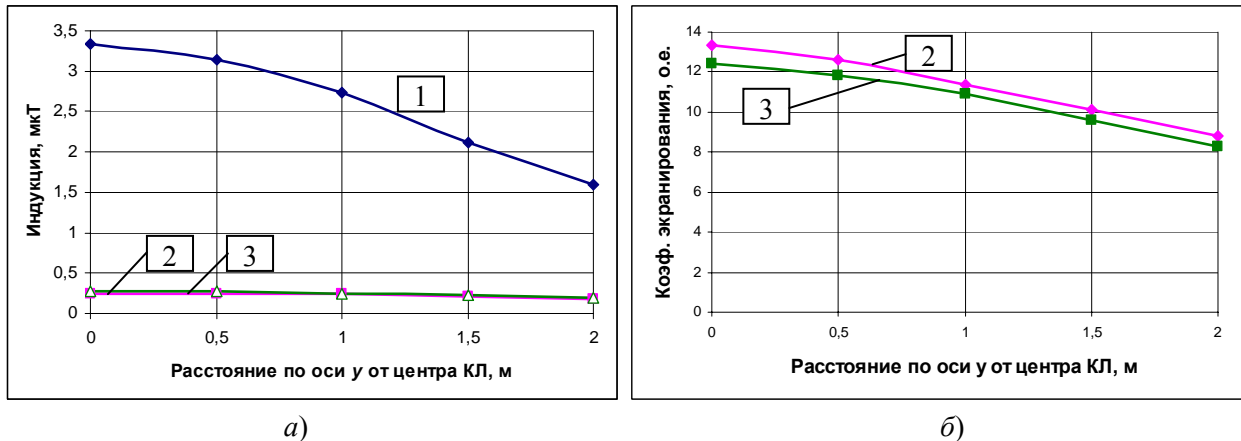


Рис. 7

На рис. 7 обозначено: 1 – исходная магнитная индукция КЛ (без использования СКЭ); 2 – при использовании трехконтурной СКЭ с ФС на всех трех кабелях (рис. 2); 3 – при использовании предложенной двухконтурной СКЭ с двумя ФС, установленными на крайних кабелях (рис. 4, а, рис. 6).

Как следует из рис. 7, б, полученные на основе экспериментальных исследований коэффициенты экранирования МП трехконтурной СКЭ и предложенной двухконтурной СКЭ в точке P над осью КЛ ($y = 0$), характеризующейся максимальной магнитной индукцией КЛ (рис. 7, а), составляют от 12,5 до 13,2 и отличаются менее чем на 10% – в пределах погрешности выполненного эксперимента.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают идентичность коэффициентов экранирования предложенной двухконтурной СКЭ и известной трехконтурной СКЭ, а также корректность выполненного выше моделирования индукции МП в зоне соединительных муфт КЛ.

Выводы. 1. Показано, что магнитное поле подземной трехфазной высоковольтной кабельной линии над зоной соединительных муфт может быть определено дипольными магнитными моментами двух ее токовых контуров, что обосновывает возможность эффективного использования двухконтурного экранирования магнитного поля кабельной линии вместо известного трехконтурного.

2. Предложена новая двухконтурная система пассивного экранирования зон соединительных муфт высоковольтных трехфазных кабельных линий, отличающаяся уменьшенным количеством ферромагнитных сердечников при сохранении высокого коэффициента экранирования (более 10), что подтверждено результатами экспериментальных исследований.

1. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2014. – 793 с.
2. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е.. Дипольная модель магнитного поля трехфазной электрической цепи // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 4. – С. 3-7.
3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю.. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 3-9.
4. Розов В.Ю., Квцинский 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.
5. Canova, A., Bavastrò, D., Freschi, F., Giaccone, L., Repetto, M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines // Electric Power Systems Research. – 2012. – Vol. 89. – Pp. 109-115.
6. A. Canova, L. Giaccone. A Novel Technology for Magnetic-Field Mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop // IEEE transactions on power delivery // 2011. – Vol. 26. – Pp. 1625-1633.
7. A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, A. Guerrisi, M. Repetto. Magnetic field mitigation of power lines by means of passive loop: technical optimization // The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering COMPEL. – 2012. – Vol. 31. – Pp. 870-880.
8. Mitigation techniques of power frequency magnetic fields originated from electric power systems, Tech. Rep. Working group C4.204 / International Council on Large Electric Systems (CIGRE'), 2009.
9. P. Maioli. Thermal design of HV electric systems with EMF mitigation devices / CIGRE'2011 Conference, Paris.

ДВОКОНТУРНЕ ПАСИВНЕ ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ У ЗОНАХ З'ЄДНУВАЛЬНИХ МУФТ

В.Ю. Розов¹, чл.- кор. НАН України, **П.М. Добродєєв¹**, канд.техн.наук, **А.О. Квіцинський²**, канд.техн.наук

¹ - ДУ «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна, e-mail: rozov@nas.gov.ua

² – Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України ДП «НЕК «Укренерго»,

вул. Дорогожицька, 11/8, Київ, 04112, Україна.

Виконано дипольне моделювання магнітного поля (МП) над зоною з'єднувальних муфт трифазної кабельної лінії (КЛ) для типового випадку віддалення точок спостереження на відстань, що перевищує подвійну відстань між кабелями КЛ. Показано, що МП трифазної КЛ за умови симетрії напруг живлення може бути визначено дипольними магнітними моментами тільки двох її струмових контурів, що обґрунтовує можливість ефективного використання двоконтурного екранування МП КЛ замість відомого триконтурного. Запропоновано двоконтурну систему пасивного екранування зон з'єднувальних муфт підземних високовольтних трифазних кабельних ліній, що відрізняється зменшеною кількістю її елементів (ферромагнітних осердь) при збереженні коефіцієнта екранування більше 10, що має експериментальне підтвердження. Бібл. 9, рис. 7.

Ключові слова: кабельна лінія, магнітне поле, контурне пасивне екранування.

DOUBLE-CIRCUIT PASSIVE SHIELDING OF THE MAGNETIC FIELD OF HIGH-VOLTAGE CABLE LINES IN JUNCTION ZONES

V.Yu. Rozov¹, **P.N. Dobrodeyev¹**, **A.A. Kvytsynskyi²**

¹ - State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,

Industrialna str. 19, Kharkiv, 61106, Ukraine, e-mail: rozov@nas.gov.ua

² – Research and Design Center of the unified power system of Ukraine of State

Enterprise «National Power Company «UKRENERGO»,

Dorogozhizkaia str., 11/8, Kyiv, 04112, Ukraine.

The article holds dipole modeling of the magnetic field in junction zone of three-phase cable line for a typical case of the removal of the points of observation at a distance, in two or more times greater than the distance between the cables. It is shown that the magnetic field of a three-phase cable lines in the case of the symmetry of supply voltages can be determined by dipole magnetic moments of the only two current circuits that justifies the possibility of effective use of its two-circuit shielding instead of the well-known three-circuit shielding. A two-circuit passive shielding system proposed for junction zones of underground high-voltage three-phase cable lines. It characterized by a reduced number of elements (ferromagnetic cores), while maintaining the shielding factor greater than 10, which has experimental verification. References 9, figures 7.

Key words: cable line, magnetic field, contour passive shielding.

1. Electrical Installation Regulations / Minenerhovuhillya Ukrainy. – Kharkiv: Fort, 2014. – 793 p. (Ukr)
2. Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye. The dipole model of magnetic field of three-phase electric circuit. – 2012. – No 4. – Pp. 3-7. (Rus)
3. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Piliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its reduction to a safe level // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No2. – Pp. 3-9. (Rus)
4. Rozov V.Yu., Kvytsynskyi 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 // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2015. – No 4. – Pp. 56-61. (Rus)
5. Canova, A., Bavastro, D., Freschi, F., Giaccone, L., Repetto, M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines // Electric Power Systems Research. – 2012. – Vol. 89. – Pp. 109-115.
6. A. Canova, L. Giaccone. A Novel Technology for Magnetic-Field Mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop // IEEE transactions on power delivery // 2011. – Vol. 26. – Pp. 1625-1633.
7. A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, A. Guerrisi, M. Repetto. Magnetic field mitigation of power lines by means of passive loop: technical optimization // The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering COMPEL. – 2012. – Vol. 31. – Pp. 870-880.
8. Mitigation techniques of power frequency magnetic fields originated from electric power systems, Tech. Rep. Working group C4.204 / International Council on Large Electric Systems (CIGRE'), 2009.
9. P. Maioli. Thermal design of HV electric systems with EMF mitigation devices / CIGRE'2011 Conference, Paris.

Надійшла 12.09.2016
Остаточний варіант 13.09.2016