

В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.В. Ерисов, П.Н. Добродеев

ЭФФЕКТИВНОЕ КОНТУРНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ

Запропоновано новий тип пасивного екрану для зменшення магнітного поля трифазних кабельних ліній електропередачі із прокладанням кабелів за схемою «у площині». Розроблений одноконтурний екран має несиметричний магнітний зв'язок з кабельною лінією, обумовлений використанням двох різних ферромагнітних осердь, та характеризується підтвердженою експериментально високою ефективністю екранування при мінімальному тепловому впливі на кабельну лінію за рахунок віддалення від неї екранних кабелів на відстань $0,2 \div 0,3$ м. Отримано співвідношення для визначення ефективності екранування, параметрів екрану та осердь. Бібл. 18, рис. 5.

Ключові слова: кабельна лінія, магнітне поле, екранування, контурний екран, ферромагнітне осердя.

Предложен новый тип пассивного экрана для уменьшения магнитного поля трехфазных кабельных линий электропередачи с прокладкой кабелей по схеме «в плоскости». Разработанный одноконтурный экран имеет несимметричную магнитную связь с кабельной линией, обусловленную использованием двух разных ферромагнитных сердечников, и характеризуется подтвержденной экспериментально высокой эффективностью экранирования при минимальном тепловом воздействии на кабельную линию за счет удаления от нее экранирующих кабелей на расстояние $0,2 \div 0,3$ м. Получены соотношения для определения эффективности экранирования, параметров экрана и сердечников. Библ. 18, рис. 5.

Ключевые слова: кабельная линия, магнитное поле, экранирование, контурный экран, ферромагнитный сердечник.

Введение. Высоковольтные трехфазные кабельные линии (КЛ) широко используются в развитых странах мира для передачи электрической энергии в городах, и являются наиболее перспективным средством передачи электрической энергии и для Украины. Это обусловлено тем, что КЛ имеют ряд преимуществ над традиционными воздушными линиями электропередачи (ВЛ).

Во-первых, ширина охранной зоны ВЛ 110 кВ, широко используемых в городах, составляет 40 м, в то время как ширина охранной зоны КЛ 110 кВ не превышает 2 м [1]. Поэтому трасса КЛ не требует отчуждения больших и дорогостоящих городских земельных участков. Во-вторых, уровень магнитного поля ВЛ не удовлетворяет современным требованиям в части экологической безопасности. Так, в соответствии с [1, 2] магнитное поле промышленной частоты (МП) не должно превышать 0,5 мкТл внутри жилых помещений и 10 мкТл в зоне жилой застройки. В [3, 4] экспериментально и путем численного моделирования показано, что МП в домах, расположенных вблизи ВЛ, может превышать предельно допустимый уровень 0,5 мкТл. Для МП КЛ данный норматив обычно выполняется, поскольку расстояние между кабелями КЛ на порядок меньше расстояния между проводами ВЛ и, соответственно, интенсивность спада МП при удалении от КЛ выше [5].

В то же время, непосредственно над КЛ величина МП зачастую превышает предельно допустимый уровень 10 мкТл для зоны жилой застройки. Современные трехфазные КЛ выполняются из одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. В зонах муфтовых соединений КЛ 35–110 кВ расстояние между кабелями составляет не менее 0,5 м [1, 2]. При этом МП КЛ может превышать допустимый уровень более чем в 4 раза, что вызывает необходимость принятия мер для его уменьшения.

Для уменьшения МП КЛ могут использоваться как различные типы пассивных экранов [6–12], так и

системы активного экранирования [13, 14]. Преимуществом пассивных экранов является отсутствие источников электрической энергии, которые используются в активных системах для создания компенсирующего МП. По принципу действия пассивные экраны можно разделить на электромагнитные экраны [6, 7], магнитные (магнитостатические) [8, 9] и контурные [10–12]. Наиболее технологичными являются контурные экраны типа НМСРЛ с ферромагнитными элементами, за счет применения которых достигается сравнительно высокая эффективность экранирования МП [10, 11]. Пример практической реализации экрана НМСРЛ показан на рис. 1. Существенным недостатком этого экрана является близкое расположение экранирующих кабелей к кабелям КЛ, обусловленное необходимостью обеспечения требуемого коэффициента экранирования. Это приводит к дополнительному нагреву КЛ и снижению ее пропускной способности.

Целью данной работы является разработка контурного экрана для уменьшения магнитного поля в зонах муфтовых соединений кабельных линий, оказывающего минимальное тепловое воздействие на кабельную линию при сохранении высокой эффективности экранирования.

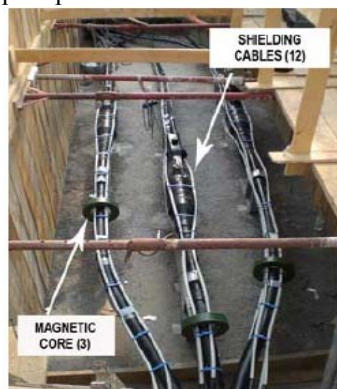


Рис. 1. Контурный экран НМСРЛ с ферромагнитными сердечниками, экранирующие кабели которого расположены на КЛ

© В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.В. Ерисов, П.Н. Добродеев

Объектом исследования является МП КЛ при прокладке кабелей по схеме «в плоскости», используемой в зонах муфтовых соединений [1, 2].

Основная идея работы заключается в применении экрана, состоящего из одного проводящего контура и двух ферромагнитных сердечников (рис. 2). Такой экран обеспечивает компенсацию дипольной составляющей МП КЛ, преобладающей в точках нормирования МП, удаленных от КЛ на расстояние, более чем вдвое превышающее ее ширину. При этом кабели экрана удалены от КЛ на расстояние 0,2÷0,3 м, что позволяет минимизировать тепловое влияние экрана на КЛ, а ферромагнитные сердечники усиливают магнитную связь между экраном и КЛ, обеспечивая высокую эффективность экранирования.

Одноконтурный экран с ферромагнитными сердечниками и несимметричной магнитной связью с КЛ. В [15] показано, что используя преобразование Кларк токи трехфазной линии могут быть представлены как суперпозиция трех компонент: токов α -компоненты, токов β -компоненты и токов «нулевой» компоненты. Если линия электропередачи является симметричной, токи «нулевой» компоненты равны нулю. На основе этого в [16] МП трехфазной линии электропередачи с расположением проводов в одной плоскости (горизонтальной или вертикальной) рассмотрено как суперпозиция α -компоненты МП и β -компоненты МП, которые создаются соответствующими компонентами токов. Также было показано, что величина β -компоненты МП в несколько раз превосходит величину α -компоненты. Качественное объяснение дано в [17], где отмечается, что β -компонента МП КЛ по сути является его дипольной составляющей.

Согласно [15] ток β -компоненты, при прокладке кабелей по схеме «в плоскости», течет по замкнутому контуру, образованному жилами крайних кабелей. Амплитуда тока β -компоненты в $\sqrt{3}/2$ раз больше амплитуды тока в жиле, а фазовый сдвиг относительно тока жилы составляет $\pm\pi/6$ в зависимости от кабеля. Для компенсации β -компоненты МП КЛ участки P_1P_2 и P_3P_4 предлагаемого одноконтурного экрана (рис. 2, а) расположены параллельно кабелям КЛ. Эти участки удалены от КЛ и находятся на некоторой высоте H для минимизации теплового воздействия токов экрана на КЛ.

Длина участков P_1P_2 и P_3P_4 обозначена через l . Характерные размеры участков P_4P_1 и P_2P_3 намного меньше l , поэтому l можно считать длиной экрана.

На участке P_4P_1 установлены два ферромагнитных сердечника, охватывающие кабель экрана и соответствующий кабель КЛ. Каждый сердечник выполнен разрезным для упрощения монтажа предлагаемого контурного экрана (рис. 2, б). Литеры маркировки сердечников соответствуют обозначениям кабелей КЛ, которые они охватывают. Сердечник характеризуется тремя параметрами: эффективной магнитной проницаемостью μ , сечением S_{core} и длиной l_{core} средней линии сердечника.

В целом, представленный контурный экран характеризуется следующими параметрами:

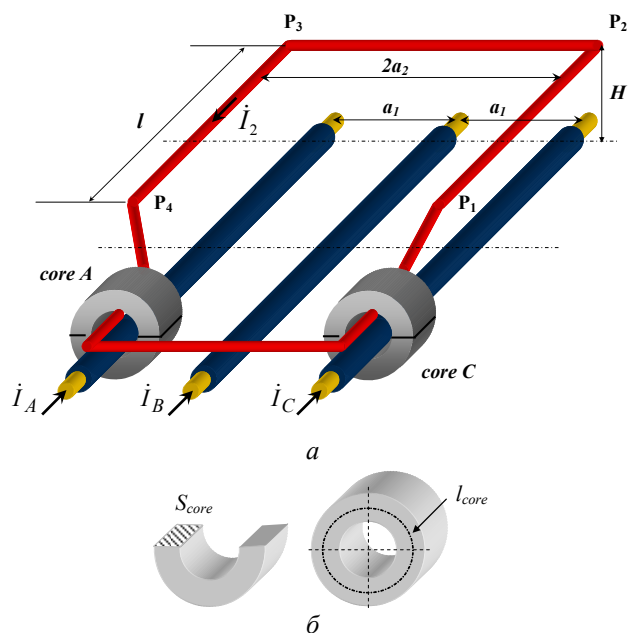


Рис. 2. Конструктивное исполнение предлагаемого одноконтурного экрана (а) с ферромагнитными сердечниками (б)

- высота H расположения экрана над КЛ;
- ширина экрана $2a_2$ (расстояние между параллельными участками P_1P_2 и P_3P_4);
- длина l экрана (длина участков P_1P_2 и P_3P_4);
- удельная проводимость σ и радиус r поперечного сечения кабелей экрана;
- набор параметров μ , S_{core} , l_{core} для каждого из сердечников (где индекс *core* принимает значения *A* и *C* для сердечника на крайнем левом и крайнем правом кабеле, соответственно).

Эффективность одноконтурного экрана. Поскольку длина экрана l в несколько раз больше $2a_2$ и характерного размера участка P_4P_1 , то корректно проводить анализ МП в рамках двумерного приближения. Выберем систему координат таким образом, чтобы ось абсцисс находилась на высоте 0,5 м над землей, т.е. на уровне, на котором согласно [1] нормируется МП, а ось ординат проходила через центральный кабель КЛ (рис. 3). Тогда для точек, лежащих на оси абсцисс, собственное МП КЛ (т.е. МП КЛ в отсутствие экрана) будет максимально в начале координат.

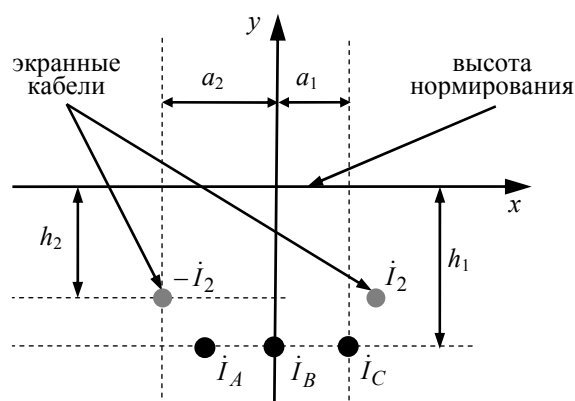


Рис. 3. Сечение кабельной линии (черные точки) и кабелей контурного экрана (серые точки)

Будем считать, что токи трехфазной КЛ образуют прямую последовательность. Соответственно, комплексные амплитуды токов в кабелях КЛ равны

$$\dot{I}_A = \sqrt{2} I e^{-j \frac{2\pi}{3}}, \quad \dot{I}_B = \sqrt{2} I, \quad \dot{I}_C = \sqrt{2} I e^{j \frac{2\pi}{3}}, \quad (1)$$

где I – действующее значение тока; j – мнимая единица.

Применяя преобразование Кларк к системе токов (1) и рассчитывая действующие значения α - и β -компонент МП КЛ в точке начала координат, получаем:

$$B_\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi h_1} \cdot \frac{a_1^2}{a_1^2 + h_1^2}, \quad B_\beta = \sqrt{3} \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi h_1} \cdot \frac{a_1 h_1}{a_1^2 + h_1^2}, \quad (2)$$

где h_1 – расстояние от КЛ до плоскости, на которой нормируется МП; a_1 – расстояние между соседними кабелями КЛ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Поскольку векторы α - и β -компонент МП КЛ в точке начала координат взаимно перпендикулярны, то величина МП КЛ равна квадратному корню из суммы квадратов B_α и B_β . Из принятого выше предположения о том, что контурный экран компенсирует β -компоненту МП КЛ, и используя (2) получаем выражение для максимальной эффективности экранирования SF , которая равна отношению величины собственного МП КЛ к величине экранированного МП:

$$SF = \frac{\sqrt{B_\alpha^2 + B_\beta^2}}{B_\alpha} = \sqrt{1 + 3 \cdot \left(\frac{h_1}{a_1}\right)^2}. \quad (3)$$

Для достижения максимальной эффективности экранирования поле, создаваемое контурным экраном в точке начала координат, должно быть противоположно направлено β -компоненте поля КЛ. Из этого условия получаем выражение для комплексной амплитуды требуемого тока в экране:

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \cdot \frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{a_2^2 + h_2^2}{a_1^2 + h_1^2}, \quad (4)$$

где h_2 – расстояние от экранных кабелей до плоскости, на которой нормируется МП; $\dot{I}_1 = j \sqrt{\frac{3}{2}} I$ – комплексная амплитуда β -компоненты тока КЛ.

Отметим, что высота расположения контурного экрана (вне области расположения сердечников) над КЛ составляет $H = h_1 - h_2$.

Определение параметров ферромагнитных сердечников. Для анализа тока, наведенного в контурном экране, воспользуемся подходом из [18]. На основании закона Ома в комплексной форме и закона электромагнитной индукции запишем следующее соотношение для замкнутого контура экрана:

$$\dot{I}_2 \cdot 2R = -j\omega \cdot (\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_C), \quad (5)$$

где $R = l / (\sigma \pi r^2)$ – активное сопротивление участка P_1P_2 ; $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ с}^{-1}$ – угловая частота тока; $\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2$ – комплексные амплитуды потоков МП, соответственно, КЛ и тока экрана через площадь, ограниченную контуром экрана; $\dot{\Phi}_A, \dot{\Phi}_C$ – комплексные амплитуды потоков МП, пронизывающих сердечники с литерами A и C , которые находятся на крайнем левом и крайнем правом кабеле, соответственно.

Выражения для потоков МП имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_1 &= M \cdot \dot{I}_1, \quad M = l \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{(a_1 + a_2)^2 + (h_1 - h_2)^2}{(a_1 - a_2)^2 + (h_1 - h_2)^2}, \\ \dot{\Phi}_2 &= L \cdot \dot{I}_2, \quad L = l \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{2a_2}{r} \right), \\ \dot{\Phi}_A &= -L_A \cdot (\dot{I}_A - \dot{I}_2), \quad L_A = \frac{\mu \mu_0 S_A}{l_A}, \\ \dot{\Phi}_C &= L_C \cdot (\dot{I}_C + \dot{I}_2), \quad L_C = \frac{\mu \mu_0 S_C}{l_C}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляем (6) в (5) и решаем уравнение относительно \dot{I}_2 . Сравнивая полученное решение с (4), приходим к следующему:

$$\begin{cases} L_A - L_C = \frac{2\sqrt{3} R}{\omega} \cdot \frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{a_2^2 + h_2^2}{a_1^2 + h_1^2}, \\ L_A + L_C = -\frac{\omega(L_A - L_C)L - 2\sqrt{3} R M}{\omega(L_A - L_C) - 2\sqrt{3} R}. \end{cases} \quad (7)$$

Полученные выражения (6)–(7) позволяют определить величины индуктивностей, приведенные ферромагнитными сердечниками, и, соответственно, определить их параметры. Отметим, что индуктивности L_A и L_C могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Знак индуктивности определяет взаимную ориентацию сердечника и контура экрана (рис. 4).

В общем случае величины L_A и L_C различны и могут отличаться более чем на порядок, что является одним из отличительных признаков предлагаемого экрана, который можно классифицировать как одноконтурный экран с несимметричной магнитной связью с кабельной линией электропередачи.

Особенности проектирования одноконтурного экрана с несимметричной магнитной связью. При выборе высоты H расположения экрана над КЛ и ширины экрана $2a_2$ имеют место два конкурирующих фактора. С одной стороны, уменьшение этих параметров приводит к увеличению требуемого тока в экране согласно (4) и к сближению экрана и КЛ. Соответственно, увеличивается тепловое воздействие на КЛ. С другой стороны, анализ распределения МП вдоль оси x показывает, что уменьшение H и $2a_2$ позволяет обеспечить высокую эффективность снижения МП в более широкой области экранирования.

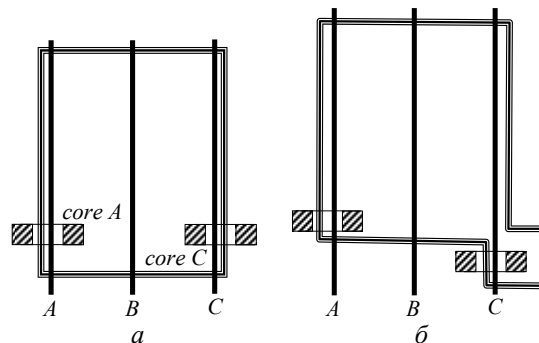


Рис. 4. Взаимная ориентация сердечников и контура экрана: (а) $L_A > 0, L_C > 0$; (б) $L_A > 0, L_C < 0$

Проведенный анализ в совокупности с результатами решения тепловой задачи, не представленной в данной статье, позволяют рекомендовать значения $H=0,4 \cdot a_1 \div 0,6 \cdot a_1$, $a_2=1,5 \cdot a_1$. Другими словами, если расстояние между соседними кабелями линии электропередачи принять за единицу, то рекомендованная ширина экрана составляет 3 единицы, а располагать экранные кабели над линией электропередачи рекомендуется на высоте от 0,4 до 0,6 единиц. При выполнении этих условий экранные кабели расположены на высоте 0,2÷0,3 м над зоной муфтовых соединений КЛ и практически не влияют на ее тепловой режим.

Для определения длины l экрана (рис. 2) может быть использована методика, изложенная в [2].

Требуемые значения индуктивностей L_A и L_C ферромагнитных сердечников, используемых в конструкции экрана, рассчитываются при помощи (7).

Если значения L_A и L_C положительны, то сердечники устанавливаются так, как показано на рис. 4, а. Если одно из значений отрицательно, то ориентация направления тока в экране относительно сердечника должна быть изменена на противоположную. Для этого случая взаимное расположение сердечников и контура экрана показано на рис. 4, б.

Магнитная проницаемость, площадь сечения и длина средней линии для каждого из сердечников выбираются исходя из абсолютных значений индуктивностей согласно (6).

Как видно из (3), эффективность экранирования МП при помощи разработанного экрана является функцией отношения расстояния от КЛ до плоскости нормирования к расстоянию между соседними кабелями КЛ.

Полномасштабная модель предложенного одноконтурного экрана с несимметричной магнитной связью исследована на экспериментальной установке (рис. 5), содержащей физический макет участка трехфазной КЛ длиной 10 м. Высота нормирования МП – 2 м, расстояние между кабелями КЛ – 0,5 м. Экранный контур выполнен из одножильного медного кабеля, сердечники – из трансформаторной стали.

При ширине экрана 1,5 м и высоте 0,3 м расположения экрана над КЛ экспериментально подтверждена эффективность экранирования МП составляет 7 единиц.

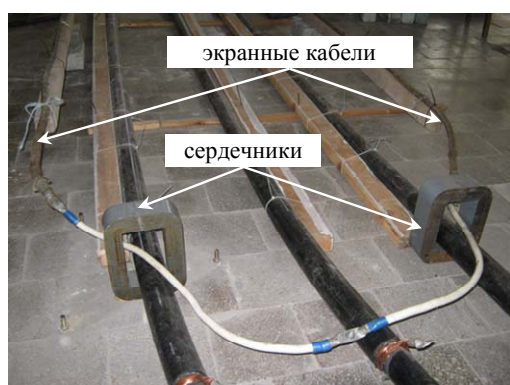


Рис. 5. Экспериментальная установка для исследования эффективности экранирования МП КЛ одноконтурным экраном с несимметричной магнитной связью

Выводы.

1. Предложен одноконтурный экран с ферромагнитными сердечниками и несимметричной магнитной связью, который при обеспечении высокой эффективности экранирования магнитного поля удален от кабельной линии на высоту, равную 0,4÷0,6 расстояния между соседними силовыми кабелями, что позволяет минимизировать тепловое воздействие на кабельную линию в сравнении с известными контурными экранами аналогичной эффективности.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что при типичном для зон муфтовых соединений расстоянии 0,5 м между соседними кабелями кабельной линии, рекомендованной ширине экрана 1,5 м и при его расположении над кабельной линией на высоте 0,3 м, эффективность экранирования магнитного поля на высоте нормирования 2 м составляет 7 единиц.

Работа выполнена за счет средств бюджетной программы «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень (КПКВК 6541230)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Вид. 5-те, перероб. й доп. – Х.: Міненерговугілля України, 2014. – 793 с.
2. СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.
3. Пелевин Д.Е. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – № 4. – С. 53-55. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.10.
4. Rozov V., Grinchenko V. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines // 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. – Pp. 500-503. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100538.
5. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.М. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 1. – С. 3-9.
6. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks // *Electric Power Systems Research*. – 2014. – Vol. 114. – Pp. 21-27. doi: 10.1016/j.epsr.2014.04.001.
7. Cardelli E., Faba A., Pirani A. Nonferromagnetic open shields at industrial frequency rate // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2010. – Vol. 46. – No. 3. – Pp. 889-898. doi: 10.1109/TMAG.2009.2031110.
8. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2007. – No. 316. – Pp. 908-911. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.137.
9. Ruiz J.R.R., Morera X.A. Magnetic shields for underground power lines // *Renewable Energy & Power Quality Journal*. – 2004. – Vol. 1. – No. 2. – Pp. 137-140. doi: 10.24084/repqj02.230.
10. Canova A., Giaccone L. Magnetic mitigation of HV cable junction zone // 8th International Conference on Insulated Power Cables. – 2011. – Paper B.1.6.
11. 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. doi: 10.1016/j.epsr.2012.03.003.
12. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power

cable magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 26. – No. 2. – Pp. 674-683. doi: **10.1109/TPWRD.2009.2039150**.

13. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V. High voltage power lines magnetic field system of active shielding with compensation coil different spatial arrangement // Electrical engineering & electromechanics. – 2019. – No. 4. – Pp. 17-25. doi: **10.20998/2074-272X.2019.4.03**.

14. Bravo-Rodríguez J.C., del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. A survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. – Energies. – 2019. – Vol. 12. – No. 7. – P. 1332. doi: **10.3390/en12071332**.

15. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – Vol. 70. – No. 2. – Pp. 1248-1255. doi: **10.1109/T-AIEE.1951.5060554**.

16. 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**.

17. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical calculation of magnetic field shielding factor for cable line with two-point bonded shields // IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – 2018. – Pp. 358-361. doi: **10.1109/MMET.2018.8460425**.

18. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Ткаченко А.О. Расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 5. – С. 44-47. doi: **10.20998/2074-272X.2017.5.06**.

REFERENCES

1. Electrical installation regulations. 5th ed. Kharkiv, Minenergovugillya of Ukraine, 2014. 793 p. (Ukr).

2. SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011.2. Design of cable lines with voltage up to 330 kV. Guidance. Kyiv, Minenergovugillya of Ukraine Publ., 2017. 139 p. (Ukr).

3. Pelevin D.Ye. Screening magnetic fields of the power frequency by the walls of houses. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.4, pp. 53-55. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.4.10**.

4. Rozov V., Grinchenko V. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines. *2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 500-503. doi: **10.1109/UKRCON.2017.8100538**.

5. Rozov V.Yu., Reutsky S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage ac transmission lines. *Technical Electrodynamics*, 2012, no.1, pp. 3-9.

6. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol.114, pp. 21-27. doi: **10.1016/j.epsr.2014.04.001**.

7. Cardelli E., Faba A., Pirani A. Nonferromagnetic open shields at industrial frequency rate. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol.46, no.3, pp. 889-898. doi: **10.1109/TMAG.2009.2031110**.

8. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, no.316, pp. 908-911. doi: **10.1016/j.jmmm.2007.03.137**.

9. Ruiz J.R.R., Morera X.A. Magnetic shields for underground power lines. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 2004, vol.1, no.2, pp. 137-140. doi: **10.24084/repqj02.230**.

10. Canova A., Giaccone L. Magnetic mitigation of HV cable junction zone. *8th International Conference on Insulated Power Cables*, 2011, Paper B.1.6.

11. 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. doi: **10.1016/j.epsr.2012.03.003**.

12. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol.26, no.2, pp. 674-683. doi: **10.1109/TPWRD.2009.2039150**.

13. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V. High voltage power lines magnetic field system of active shielding with compensation coil different spatial arrangement. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.4, pp. 17-25. doi: **10.20998/2074-272X.2019.4.03**.

14. Bravo-Rodríguez J.C., del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. A survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*, 2019, vol.12, no.7, p. 1332. doi: **10.3390/en12071332**.

15. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol.70, no.2, pp. 1248-1255. doi: **10.1109/T-AIEE.1951.5060554**.

16. 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**.

17. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical calculation of magnetic field shielding factor for cable line with two-point bonded shields. *IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, 2018, pp. 358-361. doi: **10.1109/MMET.2018.8460425**.

18. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Tkachenko A.O. Calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded cable shields covered by ferromagnetic cores. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.5, pp. 44-47. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2017.5.06**.

Поступила (received) 15.09.2019

Розов Владимир Юрьевич¹, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, Гринченко Владимир Сергеевич¹, к.т.н.,

Ерисов Анатолий Васильевич¹, Добродеев Павел Николаевич¹, к.т.н.,

¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, e-mail: Rozov@nas.gov.ua

V.Yu. Rozov¹, V.S. Grinchenko¹, A.V. Yerisov¹, P.N. Dobrodeyev¹

¹ State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine", 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables.

This paper deals with a mitigation of a three-phase cable line magnetic field by a new type of passive shield. We consider a cable line with a flat arrangement of cables. The developed single-loop shield has an asymmetric magnetic coupling with the cable line, due to the use of two different ferromagnetic cores. Its high shielding efficiency is experimentally confirmed. As the developed shield is 0.2÷0.3 m away from the cable line, its thermal effect on the cable line is negligible. As the result, we obtain expressions for the shielding efficiency, parameters of the shield and the cores. References 18, figures 5.

Index terms: cable line, magnetic field, passive loop, shielding, magnetic core.