

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ИЗ ОДНОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ЗАЗЕМЛЕНИИ ИХ ЭКРАНОВ

*Досліджено процес ослаблення магнітного поля (МП) високовольтної кабельної лінії (КЛ) з одножильних кабелів при двосторонньому заземленні їх екранів. Розроблено методику чисельного моделювання та розрахунку МП КЛ на основі методу скінченних елементів з застосуванням вісесиметричної розрахункової моделі КЛ, що дозволило описати умову замикання екранів кабелів на кінцях КЛ і вирішити задачу в двовимірній постановці. Отримано точні і експериментально обґрунтовані значення коефіцієнтів ослаблення МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів в залежності від технічних характеристик кабелів. Бібл. 11, рис. 5, табл. 2.*

*Ключові слова:* магнітне поле, трифазні кабельні лінії, двостороннє заземлення екранів.

*Исследован процесс ослабления магнитного поля (МП) высоковольтной кабельной линии (КЛ) из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов. Разработана методика численного моделирования и расчета МП КЛ на основе метода конечных элементов с применением осесимметричной расчетной модели КЛ, что позволило описать условие замыкания экранов кабелей на концах КЛ и решить задачу в двумерной постановке. Получены точные и экспериментально обоснованные значения коэффициентов ослабления МП КЛ при двустороннем заземлении экранов в зависимости от технических характеристик кабелей и геометрии их укладки. Библ. 11, рис. 5, табл. 2.*

*Ключевые слова:* магнитное поле, трехфазные кабельные линии, двустороннее заземление экранов.

**Введение.** При прокладке высоковольтных кабельных линий (КЛ) в черте городов возникает проблема обеспечения действующих в энергетической отрасли Украины [1] санитарных норм по предельно допустимым уровням индукции магнитного поля (МП) частотой 50 Гц, которые составляют 0,5 мкТл для жилых помещений и 10 мкТл для территории жилой застройки. Обеспечение указанных норм по трассам современных КЛ напряжением 6-500 кВ, выполняемых на основе одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, требует их качественного проектирования с использованием верифицированных методик расчета МП. Однако такие методики требуют совершенствования, и особенно для КЛ с рекомендо-

ванным в [1 – 3] двусторонним заземлением экранов их кабелей (рис. 1), когда протекающие в экранах индуцированные токи [3 – 5] ослабляют МП КЛ [6]. Интенсивность этого ослабления впервые была определена в [6] с помощью корректирующего коэффициента ослабления МП  $m$ :

$$m = \frac{B_{КЛ}}{B_{Ж}}, \quad (1)$$

где  $B_{Ж}$  – магнитная индукция КЛ при разомкнутых экранных контурах (одностороннем заземлении);  $B_{КЛ}$  – магнитная индукция КЛ при двустороннем заземлении.

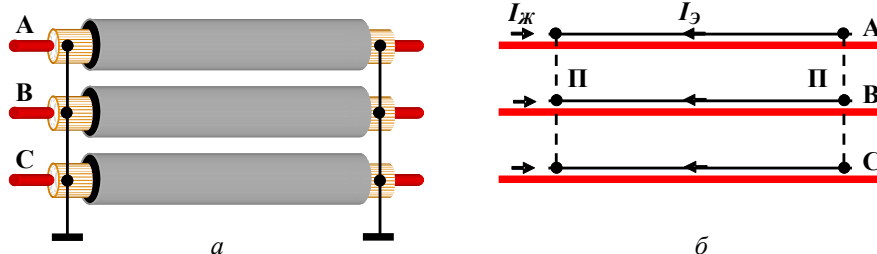


Рис. 1. КЛ с двусторонним заземлением экранов кабелей (а) и ее модель (б)

Однако практика применения методики [6] показала, что приведенные в ней значения коэффициентов  $m$  требуют уточнения.

**Целью** настоящей работы является определение точных и экспериментально обоснованных значений корректирующих коэффициентов ослабления МП КЛ из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов.

**Анализ физики процесса ослабления МП КЛ при двустороннем заземлении экранов кабелей.** Процесс индуцирования токов в экранах однофазных кабелей трехфазных КЛ при их двустороннем заземлении исследован в [2 – 5]. Наиболее корректно он рассмотрен в [4], где показано, что величина токов в экранах не зависит от параметров контура заземления

и однозначно определяется электромагнитными процессами в КЛ, возникающими при замыкании экранов различных фаз в начале и в конце КЛ при организации заземления. Тогда модель КЛ как источника МП приобретает вид, представленный на рис. 1,б. При замкнутых перемычках П образуется трехфазный короткозамкнутый контур, магнитосвязанный с токами в жилах  $I_{Ж}$ . При этом МП КЛ является суперпозицией МП от токов в жилах  $B_{Ж}$  и в экранах кабелей  $B_{Э}$ :

$$\dot{B}_{КЛ} = \sum \dot{B}_{Ж} + \sum \dot{B}_{Э}. \quad (2)$$

При условии исключения взаимного влияния фаз, соотношение (1) приближенно может быть представлено в виде:

$$m = \frac{|\dot{B}_{Ж} + \dot{B}_{Э}|}{|\dot{B}_{Ж}|}. \quad (3)$$

С целью упрощения анализа, который для уточнения физики процесса ослабления МП может иметь сугубо качественный характер, допустим, что жила и экран для каждой из фаз КЛ представляют собой нити соответствующих токов, совмещенных в пространстве. Тогда, учитывая линейную зависимость индукции МП КЛ от тока [7], соотношение (3) в выражениях комплексных амплитуд токов в жиле  $\dot{I}_{Ж}$  и в экране  $\dot{I}_{Э}$ , как для отдельной фазы, так и для трехфазной КЛ, может быть определено как:

$$m \approx \frac{|\dot{I}_{Ж} + \dot{I}_{Э}|}{|\dot{I}_{Ж}|}. \quad (4)$$

Неизвестное значение  $\dot{I}_{Э}$  получим, используя результаты анализа, проведенного в [4] для реальных КЛ, переходя при этом от действующих значений токов к их комплексным амплитудам:

$$\dot{I}_{Э} \approx \frac{-j\omega L_{Э} \cdot \dot{I}_{Ж}}{R_{Э} + j\omega L_{Э}} = -\dot{I}_{Ж} \frac{\omega L_{Э}}{\sqrt{(R_{Э})^2 + (\omega L_{Э})^2}} e^{j\varphi};$$

$$\varphi = \arctg \frac{R_{Э}}{\omega L_{Э}}; \quad \varphi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \quad (5)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $L_{Э}$  – удельная индуктивность экрана [Гн/км];  $R_{Э}$  – удельное активное сопротивление экрана [Ом/км];  $(\varphi + \pi)$  – угол сдвига фаз между током в жиле и током в экране.

Преобразуя (4) с учетом (5) получим:

$$m \approx \left| 1 - \frac{\omega L_{Э}}{\sqrt{(R_{Э})^2 + (\omega L_{Э})^2}} e^{j\varphi} \right|. \quad (6)$$

Значение  $L_{Э}$  с учетом [2, 4, 8] независимо от пространственной конфигурации кабелей КЛ приближенно может быть определено как:

$$L_{Э} \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2d}{D_{Э}} \right), \quad (7)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $d$  – расстояние между осями однофазных кабелей;  $D_{Э}$  – диаметр экрана.

Анализ выражения (6) с учетом (7) показывает, что значение коэффициента  $m$  определяется величинами  $R_{Э}$ ,  $L_{Э}$  и их соотношением, определяющим величину угла сдвига фаз между током жилы и экрана.

Выполненный выше анализ физических процессов в КЛ, определяющих интенсивность ослабления МП КЛ, носит приближенный характер и поэтому не может быть использован для расчета МП. Более того, точный расчет МП КЛ, создаваемого токами в экранах кабелей при их двустороннем заземлении на основе аналитического подхода затруднителен, и особенно для несимметричного расположения кабелей. Поэтому для последующего моделирования и расчета будем использовать численные методы, позволяющие выполнить точный расчет МП для любой конфигурации однофазных кабелей КЛ.

Анализ выражений (6), (7) показывает, что наибольшее влияние на величину коэффициента  $m$  оказывают величины  $R_{Э}$ ,  $L_{Э}$  и их соотношения, определяющие величину угла сдвига фаз между током жилы и экрана. Значение  $R_{Э}$  определяется сечением экрана кабеля и проводимостью его материала, а величина  $L_{Э}$  – диаметром экрана  $D_{Э}$  и расстоянием  $d$  между осями кабелей. Поэтому при численном расчете коэффициента  $m$  должны учитываться указанные физические параметры конструкции КЛ и ее кабелей.

**Методика численного моделирования и расчета МП КЛ.** Моделирование выполнено на основе метода конечных элементов с использованием программного пакета *COMSOL Multiphysics* [9]. Модель рассматриваемой КЛ представлена на рис. 1,б. Рассчитывались значения  $B_{Ж}$  (перемычка П разомкнута) и  $B_{КЛ}$  (перемычка П замкнута). Значения коэффициента  $m$  определялись в соответствии с (1).

При расчете были приняты следующие допущения: КЛ выполнена в виде системы бесконечно длинных параллельных проводников с током и работает в установившемся режиме; токи в фазах имеют частоту 50 Гц, синусоидальны, равны по величине и сдвинуты друг относительно друга на  $2\pi/3$  рад.; внешняя среда свободна от источников МП, ферромагнитных и проводящих материалов.

Моделирование МП КЛ выполнялось на основе закона полного тока в квазистационарном приближении [4]:

$$j\omega\sigma \dot{A} + \text{rot} \left( \mu_0^{-1} \mu^{-1} \text{rot} \dot{A} \right) = \dot{J}, \quad \dot{B} = \text{rot} \dot{A}, \quad (8)$$

где  $\dot{A}$  – векторный потенциал магнитного поля;  $\dot{J}$  – плотность тока;  $\sigma$ ,  $\mu$  – соответственно проводимость и относительная магнитная проницаемость.

Фактические значения указанных физических величин при моделировании соответствуют той области, для которой выполняется решение. При моделировании уравнение (8) дополняется условиями, накладываемыми на векторный потенциал на границах раздела сред с различными электрофизическими свойствами [10].

Магнитное поле КЛ является плоскопараллельным [7]. Однако при стандартном подходе к решению этой задачи невозможно описать условие замыкания экранов кабелей на концах КЛ в двумерной постановке, при которой существенно упрощается расчет. Поэтому был предложен метод решения задачи в осесимметричной постановке (рис. 2,а). Возникающая при этом задача снижения погрешности расчета решается путем увеличения радиуса кривизны системы  $R$  до значений, на 2-3 порядка превышающих расстояния  $d$  между осями кабелей КЛ.

Для ограничения расчетной области использованы нулевые граничные условия  $\dot{A}_{\varphi} = 0$ , где  $\dot{A}_{\varphi}$  – единственная ненулевая компонента векторного потенциала магнитного поля. При этом полагалось, что  $a - R \gg d$ , где  $a$  – характерный размер расчетной области. На оси симметрии полагалось, что:

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_{\varphi}}{\partial \rho} \right|_{\rho=0} = 0, \quad (9)$$

где  $\rho$  – радиальная координата.

Решение задачи выполнялось с использованием интерфейса «Magnetic Fields», который входит в «AC/DC Module». В этом интерфейсе для опции «Space Dimension» задавался вариант «2D axisymmetric». В области экранов была использована сетка типа «Mapped»,

в остальных областях – типа «Free Triangular» (рис. 2,б). Величины токов, протекающих через жилы кабелей, задавались при помощи функционала используемого пакета «Single-Turn Coil», в котором для опции «Coil excitation» выбирался вариант «Current».

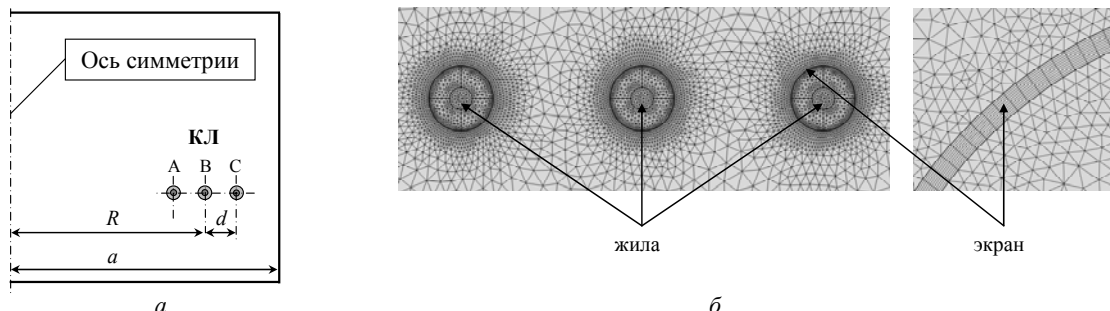


Рис. 2. Расчетная модель КЛ в осесимметричной постановке (а) и сетка конечных элементов (б)

Правильность численного решения проверялась путем сравнения с решениями, получаемыми при увеличении размера расчетной области и использовании более густой сетки. Верификация методики расчета выполнялась путем сравнения расчетных и экспериментальных значений индукции МП.

**Экспериментальное обоснование методики численного расчета МП.** Исследования МП проводились на экспериментальной установке, содержащей лабораторную модель трехфазной КЛ (рис. 3).

**Параметры экспериментальной установки:** тип кабелей КЛ: АПвЭгаПу-110 1×240/70 (сечение жилы 240 мм<sup>2</sup>, сечение медного экрана 70 мм<sup>2</sup>, диаметр экрана 55 мм); длина кабелей 10 м; действующее значение тока в жилах 95А; удельное сопротивление экранов кабелей 0,268 Ом/км при температуре 20°С; удельное сопротивление экранов кабелей лабораторной модели с учетом сопротивления закорачивающих перемычек П 0,29 Ом/км.

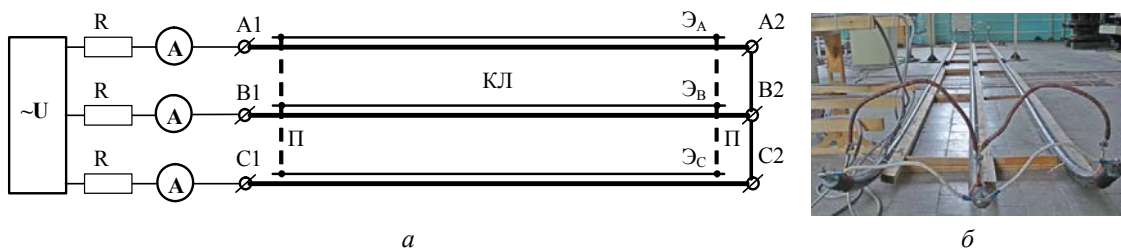


Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки (а) и лабораторная модель (б) КЛ (~U – 3-фазный источник питания – индукционный регулятор напряжения; R – нагрузочные сопротивления; А – амперметры; А1-А2, В1-В2, С1-С2 – токопроводящие жилы кабелей КЛ; ЭА, ЭВ, ЭС – экраны кабелей)

С одной стороны к токопроводящим жилам КЛ (рис. 3) приложена симметричная система напряжений, с другой стороны жилы замкнуты перемычками. Проволоки экранов кабелей с обеих сторон собраны в пучки и на них напрессованы кабельные наконечники для подключения съемных перемычек П из медного провода сечением 70 мм<sup>2</sup>.

Индукция МП КЛ измерялась при двух конфигурациях пространственного расположения кабелей КЛ: в горизонтальной плоскости (рис. 4,а) и в вершинах равностороннего треугольника (рис. 4,б). Измерения проводились для двух схем соединения экранов кабелей КЛ: экраны КЛ разомкнуты (перемычки П на рис. 3 отсутствуют); экраны КЛ замкнуты (перемычки П установлены).

Расстояния между осями кабелей устанавливались  $d = 0,07$  м (укладка вплотную),  $d = 0,2$  м и  $d = 0,5$  м. Измерялись две пространственные компоненты магнитной индукции  $B_x$ ,  $B_y$  по оси КЛ (рис. 4) в ее средней части при различных высотах  $y$  точки измерения (от 0,4 м до 2 м с шагом 0,2 м). Далее определялись действующие значения индукции МП. Коэффициент ослабления МП  $m$  по результатам измерений определялся в соответствии с (1). Измерения индукции МП

выполнялись трехкомпонентным векторным магнитометром типа EMF-828 (инструментальная погрешность  $\leq 5\%$ ).

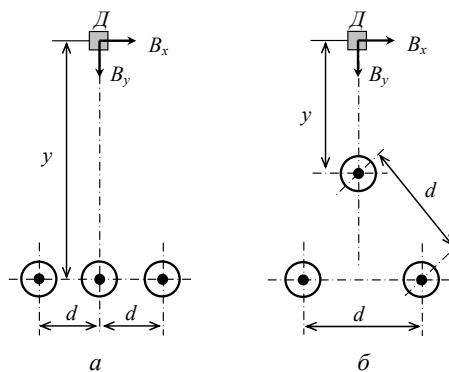


Рис. 4. Обозначение геометрических размеров КЛ при экспериментальных исследованиях и схема расположения датчика Д магнитометра

На основе предложенной выше методики проведен расчет индукции МП КЛ с замкнутыми с двух сторон экранами. Результаты расчета и эксперимента при замкнутых экранах представлены на рис. 5.

Совпадение экспериментальных и расчетных значений с разницей не более 5% подтверждает правильность разработанной численной методики расчета, и позволяет рекомендовать ее для расчета МП реальных КЛ.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов ослабления  $m$  МП лабораторной модели КЛ, полученные расчетным и экспериментальным путем для двух

конфигураций КЛ. Разброс результатов расчета и эксперимента также не превышает 5%.

Таким образом, предложенная методика расчета позволяет с ограниченной погрешностью, не превышающей 5%, выполнить расчет МП КЛ с заземленными с обоих концов экранами кабелей и коэффициента ослабления  $m$ .

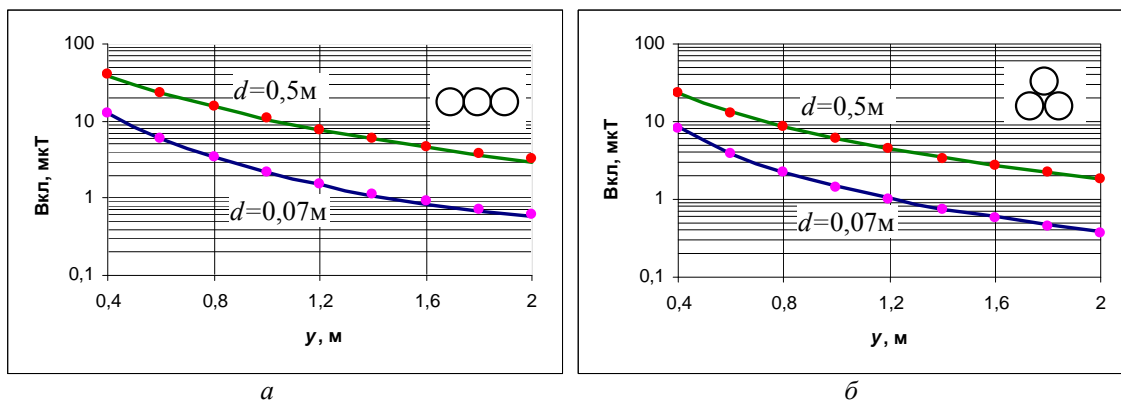


Рис. 5. Результаты расчета индукции МП и его экспериментальной проверки для лабораторной модели КЛ с замкнутыми экранами при расположении кабелей в горизонтальной плоскости (а) и в вершинах треугольника (б) (сплошные линии – расчет, точки – эксперимент) при различной высоте  $y$  точки измерения

Таблица 1

Значения коэффициентов ослабления МП, полученные на лабораторной модели КЛ

| Конфигурация расположения кабелей | Расстояние между осями жил $d$ , м | Коэффициент ослабления $m$ | Высота точки измерения $y$ , м |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                   |                                    |                            | 0,4                            | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0  |
|                                   | 0,07                               | расчет                     | 0,92                           | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |
|                                   |                                    | эксперимент                | 0,92                           | 0,92 | 0,95 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,94 | 0,95 | 0,94 |
|                                   | 0,5                                | расчет                     | 0,79                           | 0,78 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 |
|                                   |                                    | эксперимент                | 0,79                           | 0,76 | 0,77 | 0,79 | 0,77 | 0,77 | 0,76 | 0,79 | 0,78 |
|                                   | 0,07                               | расчет                     | 0,97                           | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,95 |
|                                   |                                    | эксперимент                | 0,96                           | 0,95 | 0,96 | 0,95 | 0,96 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 |
|                                   | 0,5                                | расчет                     | 0,84                           | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
|                                   |                                    | эксперимент                | 0,8                            | 0,8  | 0,8  | 0,81 | 0,81 | 0,82 | 0,81 | 0,84 | 0,83 |

**Расчет коэффициентов ослабления МП реальных КЛ и его экспериментальная проверка.** В табл. 2 приведены рассчитанные по предложенной методике в программном пакете *COMSOL Multiphysics* коэффициенты ослабления магнитного поля  $m$  реальных кабельных линий с заземленными с обоих концов экранами.

При расчете в качестве исходных данных использовались технические параметры кабелей производства завода «Южкабель» [11]: сечение и диаметр экрана, его активное сопротивление в зависимости от температуры. При расчете также учитывалась схема расположения кабелей КЛ и расстояние между ними. Удельное сопротивление экранов различного сечения при 20°C принято усредненным, по данным, приведенным в [11].

Как следует из табл. 2, значение коэффициента  $m$  изменяется от 0,99 при минимальном сечении экрана  $S = 25 \text{ мм}^2$  и минимальном значении  $d = 0,1 \text{ м}$  до 0,32 при сечении экрана  $S = 200 \text{ мм}^2$  и  $d = 0,5 \text{ м}$ , что в предельном случае позволяет в соответствии с (1) уменьшить индукцию МП КЛ по сравнению с исходным уровнем в три раза. Поэтому двустороннее

заземление экранов кабелей может рассматриваться как один из методов снижения МП КЛ. При этом наиболее эффективное снижение МП (более чем в 2 раза) может быть достигнуто за счет увеличения сечения экранов кабелей, что в отдельных случаях может стать альтернативой установки на КЛ внешних электромагнитных экранов. Платой за это является увеличение потерь энергии в КЛ [2, 4, 8].

Анализ результатов исследований позволяет предложить различные способы прокладки КЛ на территории жилой застройки, отличающиеся способами соединения экранов кабелей по длине КЛ [1, 2] и величиной их МП: заземления экранов кабелей с двух сторон вблизи жилых домов; одностороннего заземления экранов на остальной территории. При этом могут быть обеспечены как санитарные нормы по МП, так и ограничены потери электрической энергии в КЛ.

Экспериментальная проверка результатов расчета коэффициентов  $m$  (табл. 2) была выполнена на действующих КЛ «ДТЭК Днепроблэнерго», г. Днепропетровск. Исследования проводились на кабельных вставках ВЛ-150 кВ Л-12 длиной 1,7 км, выполненной

кабелями XRUHAKXS 1×500RMC/115 и ВЛ-35 кВ (Л-307/308) длиной 1 км выполненной кабелями NA2XS(F1)2Y 1×500RM/3520/35 кВ. Результаты

измерений индукции МП КЛ и их сопоставление с расчетом по методике [7] подтвердили их соответствие расчетным значениям табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов ослабления МП  $m$  трехфазных КЛ при двухстороннем заземлении их экранов в зависимости от технических характеристик используемых кабелей и конфигурации их прокладки.

| Расстояние $d$ между кабелями КЛ, м | Сечение экрана $S$ , мм <sup>2</sup> и его сопротивление ( $R$ ) при 20°C, Ом/км | Расположение кабелей КЛ в горизонтальной плоскости |      |      |      |      |      | Расположение кабелей КЛ в углах равностороннего треугольника |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------|--|--|------|------|------|------|------|--|------|------|------|------|------|
|                                     |  | Температура экрана, °C                             |      |      |      |      |      |  |      |      |      |      |      |
|                                     |  | 20   |      |      | 90   |      |      | 20   |      |      | 90   |      |      |
|                                     |  | Внутренний диаметр экрана, мм                      |      |      |      |      |      |  |      |      |      |      |      |
|                                     |  | 25   | 50   | 70   | 25   | 50   | 70   | 25   | 50   | 70   | 25   | 50   | 70   |
| 0,1                                 | 25 (0,733)   | 0,98   | 0,99 | 1    | 0,99 | 0,99 | 1    | 0,98   | 1    | 1    | 0,99 | 1    | 1    |
|                                     | 50 (0,387)   | 0,92   | 0,95 | 0,97 | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,94   | 0,97 | 0,98 | 0,96 | 0,98 | 0,99 |
|                                     | 70 (0,268)   | 0,85   | 0,91 | 0,94 | 0,90 | 0,95 | 0,96 | 0,90   | 0,95 | 0,96 | 0,93 | 0,97 | 0,98 |
|                                     | 100 (0,183)  | 0,75   | 0,83 | 0,87 | 0,82 | 0,89 | 0,91 | 0,82   | 0,90 | 0,93 | 0,88 | 0,93 | 0,95 |
|                                     | 150 (0,124)  | 0,61   | 0,70 | 0,75 | 0,70 | 0,78 | 0,82 | 0,70   | 0,81 | 0,85 | 0,78 | 0,86 | 0,90 |
|                                     | 200 (0,09)   | 0,50   | 0,59 | 0,65 | 0,59 | 0,68 | 0,74 | 0,60   | 0,72 | 0,77 | 0,69 | 0,79 | 0,84 |
| 0,2                                 | 25 (0,733)   | 0,95   | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98   | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1    |
|                                     | 50 (0,387)   | 0,86   | 0,90 | 0,92 | 0,90 | 0,93 | 0,95 | 0,91   | 0,94 | 0,96 | 0,94 | 0,96 | 0,97 |
|                                     | 70 (0,268)   | 0,77   | 0,83 | 0,86 | 0,84 | 0,88 | 0,90 | 0,84   | 0,90 | 0,92 | 0,89 | 0,93 | 0,95 |
|                                     | 100 (0,183)  | 0,65   | 0,73 | 0,76 | 0,73 | 0,80 | 0,83 | 0,74   | 0,82 | 0,86 | 0,81 | 0,87 | 0,90 |
|                                     | 150 (0,124)  | 0,50   | 0,58 | 0,62 | 0,59 | 0,66 | 0,71 | 0,59   | 0,69 | 0,74 | 0,68 | 0,77 | 0,81 |
|                                     | 200 (0,09)   | 0,40   | 0,47 | 0,51 | 0,48 | 0,56 | 0,60 | 0,48   | 0,58 | 0,64 | 0,57 | 0,67 | 0,73 |
| 0,5                                 | 25 (0,733)   | 0,93   | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,96   | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 |
|                                     | 50 (0,387)   | 0,80   | 0,84 | 0,86 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,85   | 0,89 | 0,91 | 0,90 | 0,93 | 0,94 |
|                                     | 70 (0,268)   | 0,69   | 0,74 | 0,78 | 0,77 | 0,81 | 0,84 | 0,76   | 0,82 | 0,85 | 0,83 | 0,87 | 0,90 |
|                                     | 100 (0,183)  | 0,56   | 0,62 | 0,66 | 0,65 | 0,70 | 0,74 | 0,63   | 0,70 | 0,74 | 0,72 | 0,78 | 0,82 |
|                                     | 150 (0,124)  | 0,41   | 0,47 | 0,50 | 0,50 | 0,56 | 0,59 | 0,48   | 0,55 | 0,59 | 0,57 | 0,64 | 0,68 |
|                                     | 200 (0,09)   | 0,32   | 0,37 | 0,40 | 0,40 | 0,45 | 0,48 | 0,38   | 0,44 | 0,49 | 0,46 | 0,53 | 0,58 |

### Выводы.

1. Исследованы физические процессы, влияющие на коэффициент ослабления  $m$  МП КЛ при двустороннем заземлении экранов кабелей, и показана зависимость коэффициента  $m$  не только от величины тока в экране, но также от угла его фазового сдвига относительно тока в жиле, определяемого соотношением активного и индуктивного сопротивлений экрана.

2. Разработана методика численного моделирования и расчета МП КЛ, основанная на применении осесимметричной расчетной модели КЛ при использовании метода конечных элементов, что позволило описать условие замыкания экранов кабелей на концах и решить задачу в двумерной постановке.

3. Вычислены и экспериментально подтверждены с погрешностью не более 5 % значения коэффициентов ослабления МП трехфазных трехпроводных КЛ при двустороннем заземлении экранов кабелей, значения которых в зависимости от технических параметров кабелей и геометрии их укладки изменяются в пределах от 0,99 до 0,32.

4. Показана возможность проектирования КЛ в зонах жилой застройки с учетом как санитарных норм по МП, так и требований энергоэффективности.

5. Результаты исследований использованы НТЦ ЭНЭК «Укрэнерго» и ГУ ИТПМ НАН Украины при пересмотре нормативного документа СОУ-Н ЕЕ20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика».

**Благодарность.** Авторы статьи выражают благодарность техническому директору ЗАО «Завод «Юж-кабель» Юрию Афанасьевичу Антонцу за помощь и поддержку при создании лабораторной модели КЛ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЭ). Видання 3-тє, перероб. і доп. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с.
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 154 с.
3. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабель-news. – 2008. – №3. – С. 56-61.
4. Ковригин Л.А. Продольные токи в экранах одножильных кабелей // Кабель-news. – 2009. – №3. – С. 56-58.
5. Riba Ruiz J.R., Alabern Morera X. Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line // International conference on renewable

energies and power quality, 5-7 April, 2006. – Palma de Mallorca, 2006. – Paper 217.

6. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика». – К.: Мінпаливенерго України, 2008. – С. 34.

7. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Техническая электродинамика. – 2014. – №5. – С. 11-13.

8. ДСТУ ІЕС 60287-1-1:2009 Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення (ІЕС 60287-1-1:2001, IDT).

9. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. – Jones & Bartlett Publishers, 2009. – 872 p.

10. Страттон Дж.А. Теория электромагнетизма. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 538 с.

11. Силовые кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. ЗАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», г. Харьков. Режим доступа: [www.yuzhcable.com.ua/download/UK\\_Book\\_5.pdf](http://www.yuzhcable.com.ua/download/UK_Book_5.pdf).

#### REFERENCES

1. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok. Vyd. 3, pererob. i dop.* [Electrical Installation Regulations. 3rd edition, revised and enlarged]. Kyiv, Minpalyvenergo of Ukraine Publ., 2010. 736 p. (Ukr).

2. Dmitriev M.B. *Zazamlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabeley 6-500 kV* [Grounding shields of single-phase power cables 6-500 kV]. Saint Petersburg Polytechnic University Publ., 2010. 154 p. (Rus).

3. Dmitriev M.B., Evdokunin G.A. Ground shields of single-phase XLPE power cables 6-10 kV. *Kabel-news – Cable-news*, 2008, no.3, pp. 56-61. (Rus).

4. Kovrigin L.A. The longitudinal currents in the screens of single-core cables. *Kabel-news – Cable-news*, 2009, no.3, pp. 56-58. (Rus).

5. Riba Ruiz J.R., Alabern Morera X. Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line. *Int. conf. on renewable energies and power quality*, 5-7 April, 2006, Palma de Mallorca, 2006. Paper 217.

6. SOU-N EE 20.179:2008. *Rozrakhunok elektrichnogo i magnitnogo poliv liniy elektroperedavannya. Metodika*. [Regulatory document SOU-N EE 20.179:2008. Calculation of the electric and magnetic fields of power line. Methods]. Kyiv, Minpalyvenergo of Ukraine Publ., 2008. 34 p. (Ukr).

7. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Piliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

8. *DSTU IEC 60287-1-1:2009 Kabeli elektrichni. Obchislennya nominalnoyi syly strumu. Castyna 1-1. Spivvidnoshennya dlya obchislennya nominalnoyi syly strumu (koeffizient navantazhennya 100%) i obchislennya vtrat. Zagalni polozhennya* [State Standard IEC 60287-1-1:2001. Electric cables. Calculation of the rated amperage. Part 1-1. Relations for calculation the nominal current strength (100% load factor) and calculation of losses. General provisions]. (Ukr).

9. Pryor R.W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones & Bartlett Publishers, 2009. 872 p.

10. Stratton J.A. *Teoriya elektromagnetizma* [Electromagnetic Theory]. Moscow-Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1948. 538 p. (Rus).

11. *Siloviye kabeli srednego i vysokogo napryazheniya s izolyaziey iz sshitogo polietilena* (Power XLPE cables of middle and high voltage). PJSC Yuzhcable Works, Kharkiv. Available at: [www.yuzhcable.com.ua/download/UK\\_Book\\_5.pdf](http://www.yuzhcable.com.ua/download/UK_Book_5.pdf) (accessed 13 May 2013). (Rus).

*Postynula (received) 20.05.2015*

*Розов Владимир Юрьевич<sup>1</sup>, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины,*

*Квицинский Анатолий Александрович<sup>2</sup>, к.т.н.,*

*Добродеев Павел Николаевич, к.т.н.<sup>1</sup>,*

*Гринченко Владимир Сергеевич, к.т.н.<sup>1</sup>,*

*Ерисов Анатолий Васильевич, инженер<sup>1</sup>,*

*Ткаченко Александр Олегович, аспирант<sup>1</sup>,*

<sup>1</sup> Государственное учреждение «Институт технических

проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины»,

61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, а/я 72,

тел/phone +38 0572 992162, e-mail: office.ntcmto@nas.gov.ua

<sup>2</sup> НТЦ Электроэнергетики ГП «НЭК «Укрэнерго»,

04112, Киев, ул. Дорогожицкая, 11/8,

тел/phone +38 044 2067390, e-mail: vp\_ntce@i.ua

*V.Yu. Rozov<sup>1</sup>, A.A. Kvytsynskyi<sup>2</sup>, P.N. Dobrodeyev<sup>1</sup>,*

*V.S. Grinchenko<sup>1</sup>, A.V. Erisov<sup>1</sup>, A.O. Tkachenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> State Institution «Institute of Technical Problems

of Magnetism of the NAS of Ukraine»,

19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

<sup>2</sup> Scientific Technical Center of Power Industry of State

Enterprise «National Power Company «Ukrenergo»,

11/8, Dorogozhizkaya Str., Kyiv, 04112, Ukraine.

#### **Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields.**

*The study tested the process of the magnetic field (MF) mitigation in the HV three-phase power cable lines (CL) made of single core cables in two-ends bonding of their shields. Developed the technique of numerical simulation and calculation of the MF of CL based on its axisymmetric calculation model using the finite element method that allowed to describe the condition of closing the cable shields at the both ends of the CL and solve the problem in two-dimensional formulation. The authors show the possibility of MF mitigation of the three-phase CL by increasing the cross-section of closed cable shields, which in some cases may be an alternative to external electromagnetic shields. Obtained and experimentally validated in laboratory and field conditions with an accuracy of no more than 5 % the value of mitigation coefficients of MF of three-phase three-wire CL in two-ends bonding of their shields depending on the technical parameters of the cables and the geometry of their installation, which is important for the design of new cable power lines. Their values are in the range from 0.99 to 0.32 when the cross sections of cable shields are from 25 mm<sup>2</sup> to 200 mm<sup>2</sup> and the distance between the axes of the cables are from 0.1 to 0.5 m. The results show the ability to execute design of cable power lines in residential areas, taking into account both the sanitary standards of the MF, as well as to energy efficiency. References 11, figures 5, tables 2.*

**Key words:** magnetic field, three-phase cable power lines, two-ends bonding of shields.