

УДК 621.3.013

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И МЕТОДЫ ЕГО  
СНИЖЕНИЯ ДО БЕЗОПАСНОГО УРОВНЯ

**В.Ю.Розов**, докт.техн.наук, **С.Ю.Реуцкий**, канд.техн.наук, **Д.Е.Пелевин**, канд.техн.наук,  
**О.Ю.Пилюгина**, канд.техн.наук,  
Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,  
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина.  
e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)

*Рассмотрена мультидипольная математическая модель магнитного поля (МП) линий электропередачи (ЛЭП), позволяющая осуществлять моделирование МП вблизи границ их охранных зон с учетом реальной конфигурации проводов ЛЭП. Модель содержит дипольные источники МП, характеризующиеся магнитными моментами независимых микроконтуров  $d \times a$ , на которые с шагом  $a$  условно разбиваются токовые контуры, образуемые проводами различных фаз ЛЭП с межфазным расстоянием  $d$ . МП в точке наблюдения определяется как сумма МП от магнитных моментов всех микроконтуров. Предложен метод снижения МП ЛЭП, основанный на оптимизации пространственной топологии системы расщепленных проводов фаз ЛЭП для достижения осевой симметрии системы максимального порядка, что позволяет уменьшить дипольную составляющую МП, повысить порядок главной пространственной гармоники системы, определяющей интенсивность затухания МП, и, в результате, снизить МП ЛЭП до безопасного уровня. Библ. 7, рис. 6.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, магнитное поле, мультидипольная модель, методы снижения.

**Введение.** В настоящее время в мире все более актуальной становится проблема снижения магнитного поля (МП) линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока частотой 50 (60) Гц в дальней области пространства – на расстояниях 50–150 м от ЛЭП [5]. Возникновение этой проблемы связано с выявлением в конце 20-го века канцерогенных свойств низкочастотного МП, которые могут проявляться даже при его слабом (с индукцией в доли мкТл), но длительном воздействии [6]. Поэтому в большинстве стран мира либо вводятся жесткие санитарные нормы по МП 50(60) Гц в среде длительного пребывания людей, либо принимаются ограничения по предельно допустимому расстоянию от ЛЭП до жилых и общественных зон [7].

Проведенные авторами теоретические и экспериментальные исследования МП ЛЭП [4] подтверждают актуальность снижения внешнего МП ЛЭП и для Украины. Так, индукция МП на границе охранных зон отечественных ЛЭП 330 кВ при номинальном токе составляет около 4 мкТл и спадает до безопасного для населения уровня (0,25–0,5 мкТл) только на расстояниях более 100 м от ЛЭП.

Разработка эффективных методов снижения МП ЛЭП возможна только на основе математической модели МП, имеющей ясную физическую интерпретацию и допустимую для инженерных расчетов методическую погрешность. Однако широко применяемые в настоящее время аналитические методы моделирования МП ЛЭП, использующие закон Био-Савара [4,5], а также численные методы на его основе требуют дальнейшего совершенствования. В этой связи представляет существенный интерес использование для моделирования МП ЛЭП предложенной авторами в [3] мультидипольной математической модели МП объекта, имеющей четкую физическую интерпретацию, а также допустимую для инженерных приложений погрешность в дальней области пространства.

Целью работы является анализ мультидипольной математической модели МП ЛЭП и создание методов снижения индукции внешнего МП ЛЭП на ее основе.

**Мультидипольная математическая модель МП ЛЭП.** Модель содержит систему дипольных источников МП  $\vec{H}(P)$ , характеризующихся магнитными моментами (ММ)  $\vec{m}_i$ , расположенными в геометрических центрах независимых прямоугольных микроконтуров  $d_i \times a$  с межфазным током  $\vec{I}_\alpha$  и площадью  $\vec{S}_i$ , на которые с шагом  $a$  условно разбиваются все контуры тока, образуемые проводами различных фаз на исследуемом участке ЛЭП протяженностью  $2L$ :

$$\dot{\vec{H}}(P) = -\sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \sum_c \sum_{i=1}^N \vec{\nabla} \left[ \frac{(\dot{\vec{m}}_{l\alpha ci}, \vec{R}_{l\alpha ci})}{4\pi R_{l\alpha ci}^3} \right]; \quad \dot{\vec{m}}_{l\alpha ci} = \dot{I}_{l\alpha} \cdot \vec{S}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha} \cdot e^{-j\varphi\alpha} \cdot a \cdot d_{l\alpha ci} \cdot \vec{n}_{l\alpha ci}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество микроконтуров в каждом контуре ЛЭП;  $\vec{S}_i$  – вектор площади  $i$ -го микроконтура;  $\vec{n}_i$  – единичный вектор, нормальный к  $S_i$ ;  $\vec{R}_i$  – радиус-вектор от геометрического центра  $i$ -го микроконтура в точку наблюдения  $P$ ;  $c$  – левая ( $l$ ) или правая ( $n$ ) часть исследуемой ЛЭП относительно точки  $P$ ;  $\alpha$  – количество фаз ЛЭП;  $G$  – количество расщепленных проводов каждой из фаз;  $d_{l\alpha ci}$  – текущее расстояние между проводами различных фаз.

Для выявления точности мультидипольного моделирования рассмотрим его применение для простейшей однофазной (двухпроводной) ЛЭП (рис. 1) с током  $\dot{I}$ , содержащей источник электрической энергии (И) с напряжением  $\dot{U}$  и нагрузку (Н). При анализе используем следующие допущения: провода ЛЭП имеют форму бесконечных линейных параллельных друг другу проводников с равномерно распределенным током; токи и напряжения в цепи строго гармоничны; взаимное электромагнитное влияние проводов ЛЭП и внешней среды не учитывается; площади токовых контуров источника электрической энергии И и нагрузки Н (рис. 1) равны нулю и не создают МП.

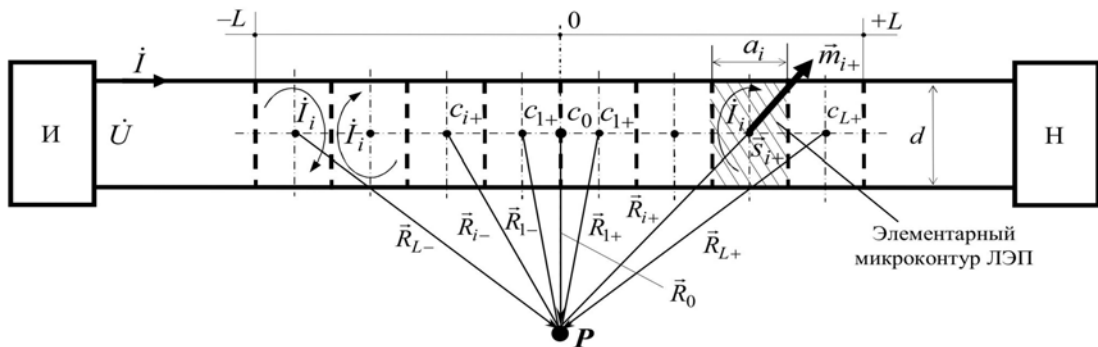


Рис. 1

Тогда с учетом (1) мультидипольная математическая модель однофазной ЛЭП может быть выражена соотношениями

$$\dot{\vec{H}}_M(P) = -\vec{\nabla} \left[ \frac{(\dot{\vec{m}}, \vec{R})}{4\pi R^3} \right]; \quad \dot{\vec{H}}_{ЛЭП}(P) = \sum_{i=-L}^{+L} \dot{\vec{H}}_{mi}(P) = -\sum_{i=-L}^{+L} \vec{\nabla} \left[ \frac{(\dot{\vec{m}}_i, \vec{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right], \quad (2,3)$$

где  $\dot{\vec{H}}_M(P)$  – магнитное поле элементарного микроконтура ЛЭП, выделенного штриховкой на рис. 1.

Как показали численные эксперименты и результаты выполненных в [1,2] исследований, для ограничения погрешности дипольного представления МП ЛЭП на инженерном уровне – не более 10%, минимальное значение радиус-вектора  $R_0$  (рис. 1), направленного из точки  $C_0$  в точку  $P$ , и минимальная длина исследуемого участка ЛЭП  $|L_{\min}|$  должны удовлетворять соотношениям

$$R_{\min} = R_{0\min}; \quad R_{\min} > 2d \quad \text{при } a_i \leq d; \quad (4)$$

$$R_{\max} = R_{0\max}; \quad |L_{\min}| > 2R_{\max}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что при мультидипольном моделировании отдельные элементарные микроконтуры реальной ЛЭП могут быть замещены линейкой соответствующих магнитных моментов, размещенных в геометрических центрах этих элементарных микроконтуров. Тогда МП трехфазной трехпроводной ЛЭП ( $G=1$ ) формируется системой ММ, образуемых контурами межфазных токов  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$ , по которым передается электрическая энергия.

При расщеплении проводов фаз ЛЭП ( $G>1$ ) система ее дипольных ММ содержит увеличенное в  $G$  раз количество линеек ММ, и ее математическая модель с учетом (1) может быть описана соотношениями

$$\dot{H}_{cm}(P) = -\sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \vec{\nabla} \left[ \frac{(\dot{m}_{l\alpha}, \vec{R}_{l\alpha})}{4\pi R_{l\alpha}^3} \right]; \quad \dot{H}_{ЛЭП}(P) = \sum_{i=-L}^{+L} \dot{H}_{cmi}(P) = -\sum_{i=-L}^{+L} \sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \vec{\nabla} \left[ \frac{(\dot{m}_{l\alpha i}, \vec{R}_{l\alpha i})}{4\pi R_{l\alpha i}^3} \right], \quad (6,7)$$

где  $\dot{H}_{cm}(P)$  – магнитное поле элементарной системы межфазных микроконтуров.

В качестве иллюстрации на рис. 2, б представлена линейка ММ трехфазной ЛЭП (рис. 2, а) при двух расщепленных проводах в фазе ( $G=2$ ), где штриховкой (рис. 2, б) выделены ММ, принадлежащие одной из ее элементарных систем межфазных микроконтуров. МП ЛЭП (рис. 2, а) описывается соотношением (7) с учетом (4), (5) и  $G=2$ .

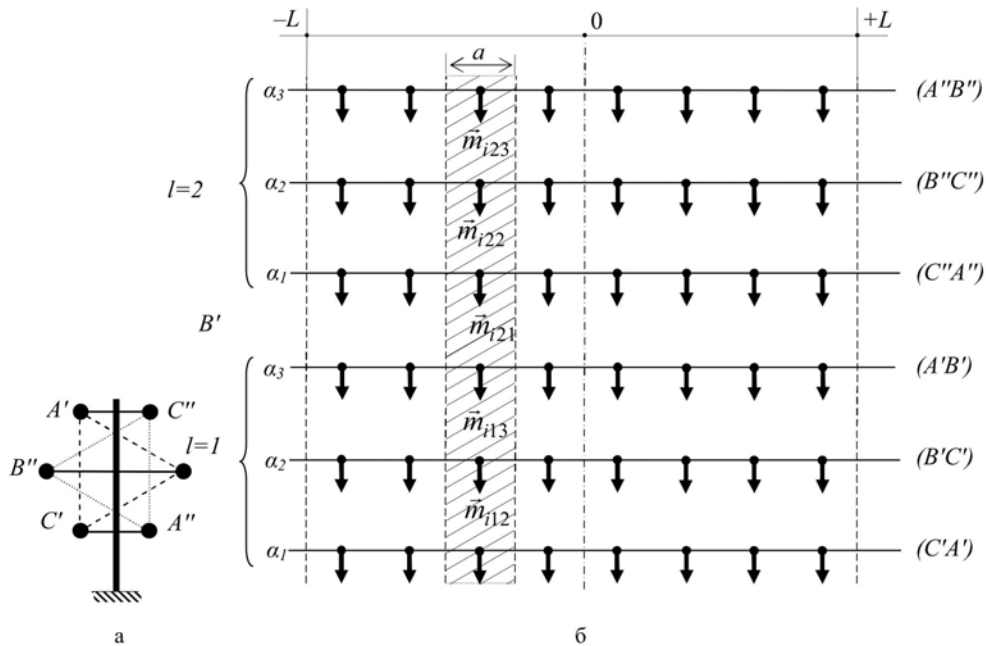


Рис. 2

На рис. 3 показаны результаты расчета МП реальной ЛЭП 330 кВ на основе предложенной мультидипольной модели (7) (график 2). Здесь же приведены результаты расчета, полученные авторами [4] на основе уравнений Био-Савара (график 3), и результаты эксперимента на действующих ЛЭП (показано точками). Сравнение результатов подтверждает правильность выполненного анализа и адекватность предложенной мультидипольной модели ЛЭП при удалении точки наблюдения  $P$  за горизонтальную проекцию ее проводов (более 8 м в рассмотренном случае).

**Методы снижения магнитного поля ЛЭП.** На рис. 4 представлена классификация известных методов снижения МП ЛЭП.

Проектно-технологические методы целесообразно реализовывать при создании новых ЛЭП. Они основаны на специальном конструктивном исполнении геометрии подвеса проводов. Эти методы, как правило, не требуют внесения в конструкцию ЛЭП дополнительных функциональных элементов. В основе проектно-технологических методов лежит минимизация напряженности МП (6) за счет уменьшения модулей ММ  $\dot{m}_{l\alpha}$  (уменьшения площади токовых контуров за счет уменьшения расстояния  $d$  между проводами различных фаз), а также за счет уменьшения векторной суммы ММ путем оптимизации геометрии подвеса проводов. В случае уменьшения межфазного расстояния  $d$  ЛЭП требуется применение более качественной межфазной изоляции, что практически реализуется в перспективных ЛЭП – компактных высоковольтных воздушных ЛЭП с самонесущими самоизолированными проводами, а также в высоковольтных кабельных ЛЭП.

Технические методы основаны на применении специальных функциональных элементов – активных и пассивных электромагнитных экранов. Они широко используются в мировой инженерной практике как при создании новых, так и модернизации действующих ЛЭП.

**Метод оптимизации геометрии подвеса проводов ЛЭП** требует отдельного рассмотрения.

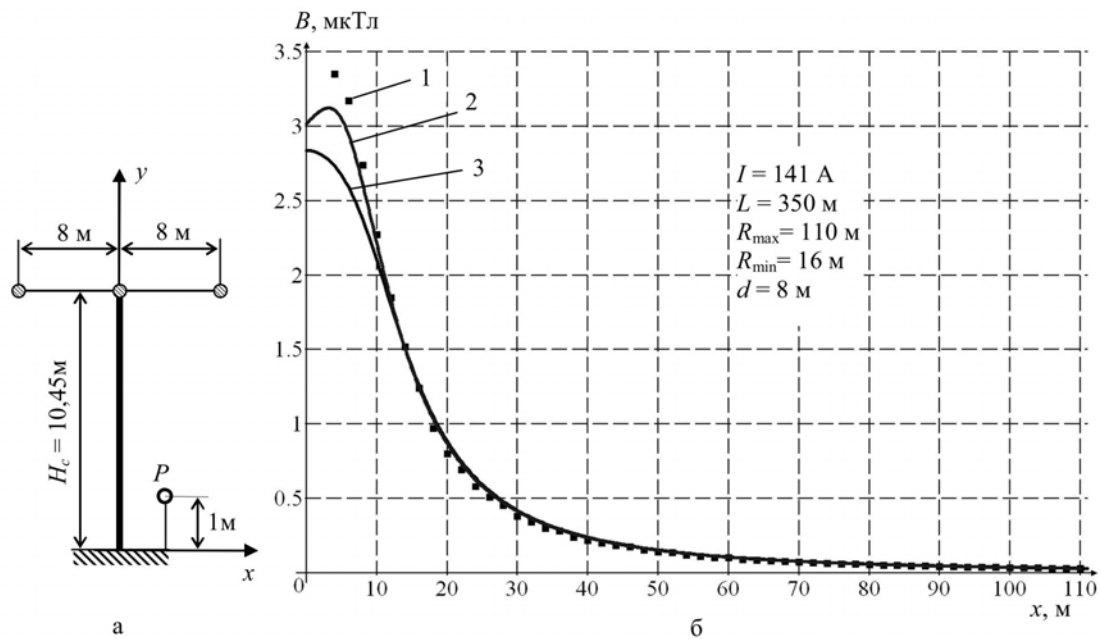


Рис. 3

Авторами в [1,2] определен общий принцип структурирования источников МП в объеме обобщенного энергонасыщенного объекта, обеспечивающий снижение его внешнего МП. Он заключается в формировании такой пространственной геометрии источников магнитного поля в объеме объекта, которая обеспечивает осевую (порядка  $k=p$ ) и плоскостную (относительно плоскости, перпендикулярной этой оси) симметрию их пространственной структуры.



Рис. 4

Реализация этого принципа для ЛЭП возможна при выполнении следующих условий: существует ось симметрии подвеса проводов порядка  $k>1$ , при повороте вокруг которой на угол  $2\pi/k$  распределение векторов плотности тока  $\vec{\delta}(t)$  ЛЭП остается неизменным; распределение векторов плот-

ности тока  $\vec{\delta}(t)$  ЛЭП обладает зеркальной симметрией относительно плоскости, перпендикулярной оси симметрии. При этом обеспечивается снижение уровня пространственных гармоник МП ЛЭП порядка  $k < p$ , в том числе и наиболее медленно затухающей дипольной гармоники, а уровень МП в дальней области пространства определяется собственной гармоникой  $p$  ЛЭП, определяемой порядком осевой симметрии геометрии подвеса ее проводов. Здесь целесообразно также отметить [1,2], что нарушение плоскостной симметрии приводит к появлению несобственных четных гармоник дополнительно к собственным нечетным и наоборот. Нарушение осевой симметрии вызывает появление несобственных добавочных гармоник, порядок которых ниже основной собственной.

Физическое снижение МП ЛЭП при применении метода симметрирования достигается за счет обеспечения взаимной компенсации одноименных ММ ЛЭП и повышения интенсивности затухания МП при увеличении порядка симметрии  $p$  системы, определяющей значение ее собственной пространственной гармоники  $p$  [1]. При  $p=1$  – это диполь с интенсивностью затухания в 3 степени от расстояния, при  $p=2$  – квадруполь, при  $p=3$  – октополь с интенсивностью затухания МП в 5 степени от расстояния.

Эффективность применения метода симметрирования подвеса проводов иллюстрируется на рис. 5. Здесь представлены относительные значения индукции МП как функции относительного расстояния, полученные

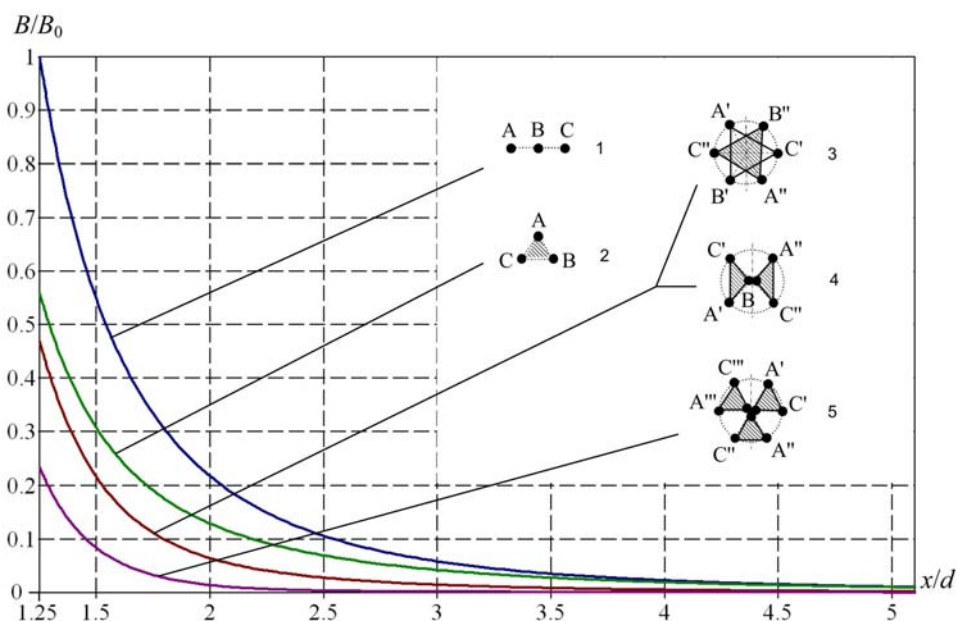


Рис. 5

при моделировании МП в соответствии с (6) для элементарных систем межфазных микроконтуров ЛЭП различной геометрии – без расщепления (1, 2) и с расщеплением и симметрированием – (3, 4, 5).

Результат применения метода симметрирования подвеса проводов для ЛЭП (330 кВ, 2 кА) с расщепленными проводами фаз ( $G=1-4$ ), полученный в соответствии с (7), показан на рис. 6. Использование метода и раз-

работанных на его основе оптимизированных по МП конструкций подвеса расщепленных проводов ЛЭП (варианты конструкций 3–6 на рис. 6) позволяет существенно, в 5–10 раз, снизить уровень МП и размер защитной зоны ЛЭП без внесения в ее конструкцию дополнительных функциональных элементов.

Таким образом, использование предложенного метода оптимизации геометрии подвеса проводов ЛЭП, основанного на симметрировании системы расщепленных проводов ее фаз, позволяет существенно снизить МП ЛЭП на границе их охранных зон. Указанный эффект при использовании метода достигается за счет обеспечения взаимной компенсации ММ ЛЭП и большей интенсивности затухания МП при повышении порядка собственной пространственной гармоники МП ЛЭП.

**Заключение.** 1. Рассмотрена мультидипольная математическая модель магнитного поля ЛЭП, позволяющая осуществлять моделирование магнитного поля вблизи границ их охранных зон и имеющая четкую физическую интерпретацию. Модель построена на основе дипольных источников магнитного поля, характеризующихся магнитными моментами независимых элементарных микроконтуров  $d \times a$ , на которые с шагом  $a$  условно разбиваются токовые контуры, образуемые проводами различных фаз ЛЭП с межфазным расстоянием  $d$ . Магнитное поле в точке наблюдения определяется как суперпозиция магнитного поля, создаваемого магнитными моментами элементарных микроконтуров ЛЭП.

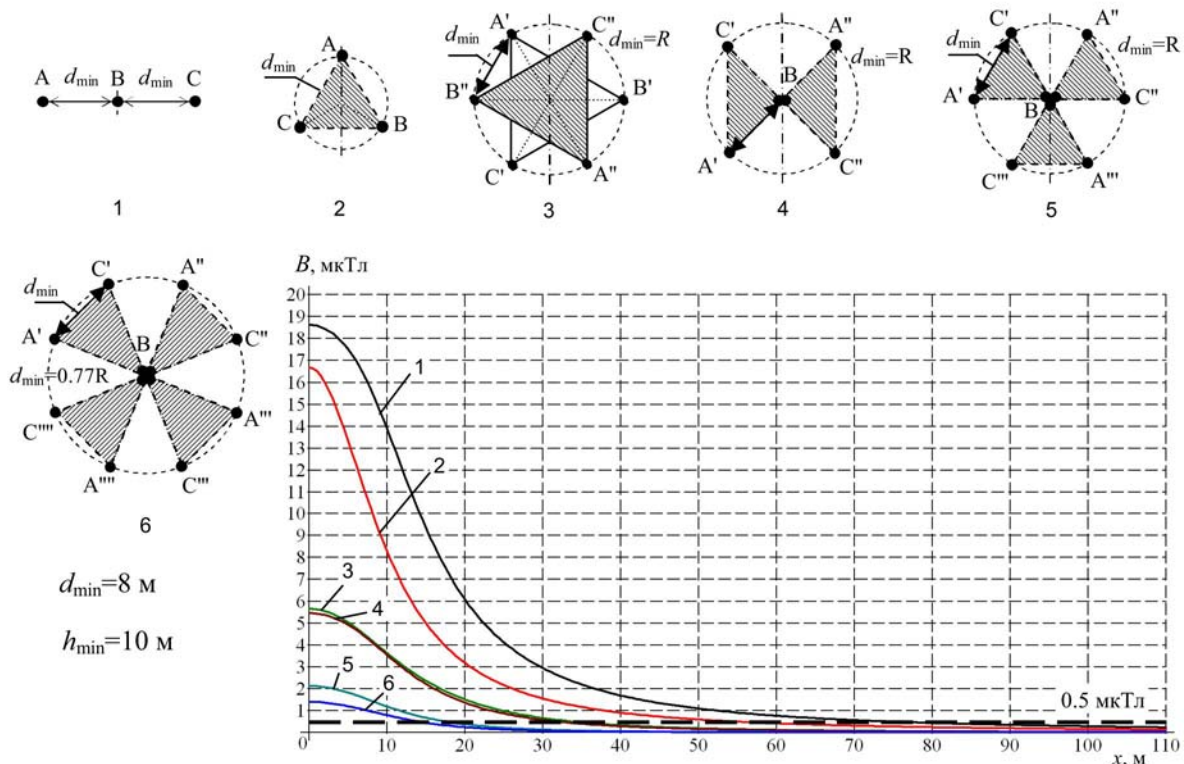


Рис. 6

2. Проведена экспериментальная проверка мультидипольной математической модели магнитного поля на действующих ЛЭП 330 кВ, которая подтвердила приемлемую для инженерных расчетов погрешность модели (менее 10%) при удалении исследуемой области за проекцию крайних проводов ЛЭП на поверхность земли. Выполнена классификация известных методов снижения магнитного поля ЛЭП.

3. Предложен метод оптимизации геометрии подвеса проводов ЛЭП, основанный на симметрировании системы расщепленных проводов фаз для достижения осевой симметрии системы более высокого порядка. Метод позволяет уменьшить магнитное поле ЛЭП за счет обеспечения взаимной компенсации магнитных моментов системы ее проводов и повышения порядка собственной пространственной гармоник системы, определяющей интенсивность затухания магнитного поля.

4. Представлены разработанные на основе предложенного метода симметрирования варианты оптимизированных конструкций подвеса проводов ЛЭП, которые могут быть приняты за основу при проектировании новых ЛЭП с безопасным уровнем магнитного поля.

1. Розов В.Ю. Математическая модель электрооборудования как источника внешнего магнитного поля // Техническая электродинамика. – 1995. – №2. – С. 3–7.

2. Розов В.Ю. Методы снижения внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 2001. – №1. – С. 16–20.

3. Розов В.Ю. Селективная компенсация пространственных гармоник магнитного поля энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 2002. – №1. – С. 8–13.

4. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1. – С. 3–9.

5. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines // Proceedings of Power Tech Conference IEEE'2003, 23–26 June, 2003. – Bologna (Italy). – 2003. – Vol.2. – 6 p.

6. Feychting M., Floderus B. and Ahlbom A. Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer // Cancer Causes and Control. – 2000. – Vol. 11. – Pp. 151–156.

7. Regulating Power Line EMF Exposure: International Precedents, April 22, 2005: <http://www.elc.uvic.ca/projects/2005-01/PowerLineEMFExposure.pdf>

УДК 621.3.013

**МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ І МЕТОДИ ЙОГО ЗНИЖЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ**

**В.Ю. Розов**, докт.техн.наук, **С.Ю. Реуцький**, канд.техн.наук, **Д.Є. Пелєвін**, канд.техн.наук,

**О.Ю. Пилюгіна**, канд.техн.наук

**Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,**

**вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна.**

**e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)**

*Розглянуто мультидипольну математичну модель магнітного поля (МП) ліній електропередачі (ЛЕП), що дозволяє здійснювати моделювання МП поблизу меж їхніх охоронних зон з урахуванням реальної конфігурації проводів ЛЕП. Модель містить дипольні джерела МП, що характеризуються дипольними магнітними моментами незалежних мікроконтурів  $d_{\alpha}$ , на які з кроком  $a$  умовно розбиваються струмові контури, утворені проводами різних фаз ЛЕП з міжфазною відстанню  $d$ . МП в точці спостереження визначається як сума МП від магнітних моментів всіх мікроконтурів. Запропоновано метод зниження МП ЛЕП, заснований на оптимізації просторової топології системи розщеплених проводів фаз ЛЕП для досягнення осьової симетрії системи максимального порядку, що дозволяє зменшити дипольну складову МП, підвищити порядок головної просторової гармоніки системи, яка визначає інтенсивність затухання МП і, в результаті, знизити МП ЛЕП до безпечного рівня. Бібл. 7, рис. 6.*

**Ключові слова:** лінія електропередачі, магнітне поле, мультидипольна модель, методи зниження.

**THE MAGNETIC FIELD OF POWER TRANSMISSION LINES AND THE METHODS OF ITS MITIGATION TO A SAFE LEVEL**

**V.Yu. Rozov, S.Yu. Reutskyi, D.Ye. Pelevin, O.Yu. Pyliugina**

**Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects of the NAS of Ukraine,**

**19 Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine.**

**e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)**

*The mathematical model of the magnetic field (MF) of the power transmission line (PTL) which is based on the multi-dipole representation is suggested. It permits of modeling MF in the vicinity of the boundary of protection zone of PTL taking into account the real configuration of wires. The model contains dipole sources which are characterized by the magnetic moments of the independent micro-contours  $d_{\alpha}$ . The current contours formed by wires of different phases of PTL with interphase spacing  $d$  are divided into the set of such micro-contours. The MP at the observation point is defined as the sum of MPs from the magnetic moments of all micro-contours. The method of mitigation of MP of PTL, which is based on the optimization of the spatial topology of the phase conductors splitting is suggested. This method permits to achieve the axial symmetry of the system of maximum order. In this way the method reduces the dipole component of the MP, increases the order of spatial harmonic of the main system, which determines the intensity of damping MP. As a result, it reduces the power line magnetic field to a safe level. References 7, figures 6.*

**Keywords:** power transmission line, the magnetic field, multi-dipole model, mitigation techniques.

1. Rozov V.Yu. The mathematical model of electrical equipment as a source of an external magnetic field // Tekhnicheskaya elektrodinamika. – 1995. – №2. – Pp. 3–7. (Rus)

2. Rozov V.Yu. The methods of mitigation the external magnetic fields of energy-objects // Tekhnichna elektrodinamika. – 2001. – №1. – Pp. 16–20. (Rus)

3. Rozov V.Yu. The selective compensation of spatial harmonics of the magnetic field of energy-objects // Tekhnichna elektrodinamika. – 2002. – №1. – Pp. 8–13. (Rus)

4. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage AC transmissions lines // Tekhnichna elektrodinamika. – 2012. – №1. – Pp. 3–9. (Rus)

5. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines // Proceedings of Power Tech Conference IEEE'2003, 23-26 June, 2003. – Bologna (Italy). – 2003. – Vol.2. – 6 p.

6. Feychting M., Floderus B. and Ahlbom A. Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer // Cancer Causes and Control. – 2000. – Vol. 11. – Pp. 151–156.

7. Regulating Power Line EMF Exposure: International Precedents, April 22, 2005: <http://www.elc.uvic.ca/projects/2005-01/PowerLineEMFExposure.pdf>.

Надійшла 29.08.2012

Received 29.08.2012