

А.В. Ерисов, Е.Д. Пелевина, Д.Е. Пелевин

МЕТОД РАСЧЕТА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК

На основі просторового гармонічного аналізу магнітного поля в циліндричній системі координат запропоновано метод розрахунку індукції магнітного поля ліній електропередачі. Показано, що магнітне поле ліній електропередачі з достатньою для інженерних розрахунків точністю описується першою циліндричною просторовою гармонікою. Використання запропонованого методу дозволяє істотно спростити визначення впливу конструкції опор ліній електропередачі на величину їх магнітного поля та на ширину смуг відчуження земельних ділянок. Бібл. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: лінія електропередачі, магнітне поле, циліндричні просторові гармоніки.

На основе пространственного гармонического анализа магнитного поля в цилиндрической системе координат предложен метод расчета индукции магнитного поля линий электропередачи. Показано, что магнитное поле линий электропередачи с достаточной для инженерных расчетов точностью описывается первой цилиндрической пространственной гармоникой. Использование предложенного метода позволяет существенно упростить определение влияния конструкции опор линий электропередачи на величину их магнитного поля и на ширину полос отчуждения земельных участков. Библ. 6, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: линия электропередачи, магнитное поле, цилиндрические пространственные гармоники.

Введение. Одной из задач, решаемых проектировщиками воздушных линий электропередачи (ЛЭП) при оценке их экологической безопасности, является определение размеров $\pm X_s$ ширины полосы отчуждения, как показано на рис. 1. К числу факторов, которые определяют ширину этих полос, относятся установленные на их границе $\pm X_s$ ограничения [1, 2] величины модуля вектора индукции B_l магнитного поля (МП), создаваемого ЛЭП на высоте h_0 от поверхности земли. В соответствии с этими ограничениями, величина модуля B_l на удалении $-X_s \leq x \leq X_s$ от ЛЭП должна быть меньше установленного значения индукции B_s . Границы $(-X_s; +X_s)$ полосы отчуждения по параметру B_s определяют по расчетным зависимостям (магнитограммам) модуля магнитной индукции B_l ЛЭП (рис. 1).

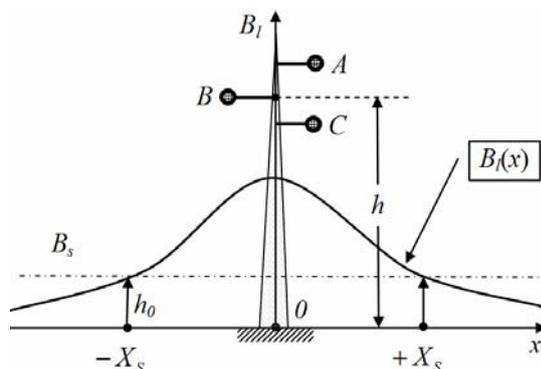


Рис. 1. Магнитограммы ЛЭП

Постановка задачи. Для упрощения расчета МП ЛЭП в дальней зоне (на границе зон отчуждения ЛЭП) применяют мультидипольные модели ЛЭП [3], основанные на использовании сферических пространственных гармоник. При этом расчетные соотношения являются достаточно сложными, а конечные результаты расчета представляются, как правило, в численном формате, что усложняет практически необходимое установление причинно - следственных связей между конструктивными параметрами ЛЭП и распределением индукции их МП.

Целью работы является упрощение расчетных соотношений для определения индукции МП ЛЭП и оценки их экологической безопасности.

Реализацию цели работы предлагается осуществить на основе использования цилиндрических пространственных гармоник для расчета индукции магнитного поля ЛЭП.

Изложение материала исследований. При описании магнитного поля ЛЭП предположим, что:

- проводники фаз линии – это параллельные токовые нити бесконечной протяженности и бесконечно малого диаметра.
- токи линии $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ образуют симметричную систему:

$$\dot{I}_A = I, \dot{I}_B = \alpha^2 I, \dot{I}_C = \alpha I, \quad (1)$$

где $\alpha = e^{j4\pi/3}$.

При таких допущениях пространственный гармонический анализ магнитного поля ЛЭП может быть выполнен в цилиндрической системе координат (r, φ, Y) , ось Y , которой проходит через центр окружности минимального радиуса r_{\min} , куда вписываются все токовые нити (рис. 2).

Соотношение (1) позволяет представить модуль магнитной индукция $B_l(x)$ трехфазной линии в произвольной точке пространства P , как модуль суммы магнитных индукций $\vec{B}_{A-0}(P), \vec{B}_{B-0}(P), \vec{B}_{C-0}(P)$ соответственно, трех независимых замкнутых протяженных цепей $A-0, B-0$ и $C-0$ (см. рис. 2).

$$B_s(P) = \left| \vec{B}_{A-0}(P) + \vec{B}_{B-0}(P) + \vec{B}_{C-0}(P) \right|. \quad (2)$$

При выбранной трассе (вдоль оси Y) прохождения обратных проводов с токами $-\dot{I}_A, -\dot{I}_B$ и $-\dot{I}_C$ положение каждой из трех цепей определяют, соответственно, координаты нитей фаз A, B, C .

Пространственный гармонический анализ МП замкнутой токовой цепи. Имеется токовая замкнутая цепь, например, $A-0$ (рис. 2).

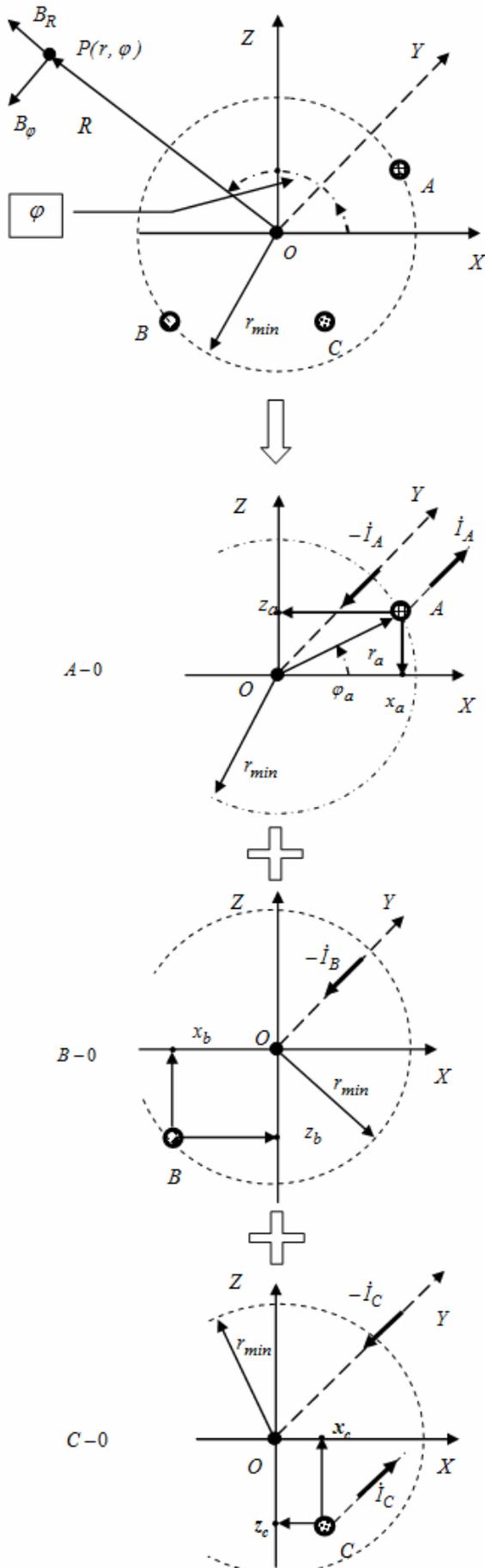


Рис. 2. Представление трехфазной линии в виде трех независимых цепей

Векторный потенциал $A_{(A-0)Y}$ магнитного поля такой цепи в произвольной точке пространства $P(r, \varphi, Y)$, определяется как сумма соответствующих векторных потенциалов A_{ay} , $A_{a\bar{y}}$ - тока фазы A и обратного ей тока и с учетом [4] может быть определен соотношением

$$A_{(A-0)Y} = A_{ay} + A_{a\bar{y}} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln r - \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \sqrt{(r^2 + (r_a)^2 - 2rr_a \cos(\varphi - \varphi_a))}. \quad (3)$$

Соотношение (3) можно представить в виде ряда Фурье, после чего для внешней области ($r \geq r_{\min}$) оно примет известный вид [5]

$$A_{(A-0)Y} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{r}\right)^n \left(\frac{a_{an} \cos n\varphi + b_{an} \sin n\varphi}{n}\right), \quad (4)$$

где a_{an} , b_{an} - амплитуды n -го порядка гармоник векторного потенциала магнитного поля токовой цепи $A-0$

$$a_{an} = (r_a)^n \cos n\varphi_a, \quad b_{an} = (r_a)^n \sin n\varphi_a. \quad (5)$$

Гармоники векторного потенциала (4), определяют и соответствующие гармоники компонент ее магнитной индукции B_{ar} и $B_{a\varphi}$:

$$B_{ar} = \frac{\mu_0}{r} \frac{dA_{(A-0)Y}}{d\varphi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[a_{an} \sin n\varphi + b_{an} \cos n\varphi]}{r^{n+1}}, \quad (6)$$

$$B_{a\varphi} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dA_{(A-0)Y}}{dr} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a_{an} \cos n\varphi + b_{an} \sin n\varphi)}{r^{n+1}}. \quad (7)$$

Модуль индукции B_{an} магнитного поля n гармоники в точке $P(r, \varphi, Y)$ при этом будет зависеть от координаты r

$$B_{an} = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r^{n+1}} \sqrt{(a_{an})^2 + (b_{an})^2}. \quad (8)$$

В табл. 1 приведены значения амплитуд a_{an} , b_{an} двух первых гармоник для цепи $A-0$ в системе координат X, Y, Z (рис. 2).

Таблица 1
Амплитуды гармоник магнитной индукции токовой цепи $A-0$

Амплитуда гармоник	Соотношения для цепи с координатами x_a, z_a
a_{a1}	x_a
b_{a1}	z_a
a_{a2}	$(x_a)^2 - (z_a)^2$
b_{a2}	$2x_a z_a$

Такой формат представления амплитуд a_{an} , b_{an} хорошо гармонируется с конструкторской документацией на опоры ЛЭП, которая регламентирует координаты точек подвеса ее проводов относительно земной поверхности.

По аналогии с (5), определяются и амплитуды гармоник a_{bn} , b_{bn} и a_{cn} , b_{cn} цепей $B-0$ и $C-0$, соответственно:

$$a_{bn} = \alpha^2 \cdot (r_b)^n \cos n\varphi_b, \quad b_{bn} = \alpha^2 \cdot (r_b)^n \sin n\varphi_b, \quad (9)$$

$$a_{cn} = \alpha^2 \cdot (r_c)^n \sin n\varphi_c, \quad b_{cn} = \alpha^2 \cdot (r_c)^n \cos n\varphi_c.$$

Структура ряда (6), (7) такова, что с ростом r вклад гармоник высоких порядков в компоненты магнитной индукции B_r и B_φ снижается.

Так, магнитная индукция двухпроводной линии на удалении $x \geq r_{\min}$ описывается, в основном, ее первой ($n = 1$) гармоникой, что иллюстрируют построен-

ные по соотношению (8) магнитогаммы на рис. 3. Здесь же представлены результаты расчета по закону Био-Савара-Лапласа в соответствии с [6].

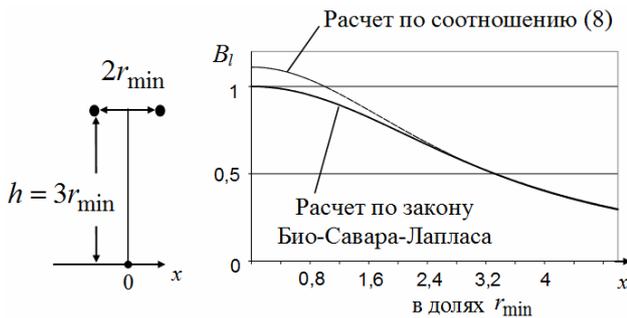


Рис. 3. Магнитогаммы B_l двухпроводной линии при единичном токе I

Сравнение результатов расчета (рис. 3) показывает, что при удалении от оси ЛЭП на расстояние более r_{\min} , погрешность предложенного метода по сравнению с точным методом [6] не превышает 10%, что подтверждает возможность использования первой цилиндрической пространственной гармоники для расчета МП ЛЭП на границе их охранных зон.

Магнитное поле одноцепных ЛЭП. Одноцепные линии имеют один комплект фазных проводов. Их взаимное расположение друг относительно друга и земной поверхности определяет конструктивное исполнение (профиль) опоры ЛЭП.

Согласно представленной на рис. 2 «магнитной» интерпретации ЛЭП, амплитуды a_{ln} и b_{ln} гармоник ее магнитного поля, с учетом (1) и (2), представляются в виде суммы соответствующих амплитуд ее независимых цепей $A-0$, $B-0$, $C-0$:

$$a_{ln} = a_{an} + \alpha^2 a_{bn} + \alpha a_{cn}, \quad b_{ln} = b_{an} + \alpha^2 b_{bn} + \alpha b_{cn}. \quad (10)$$

Первой значимой гармоникой одноцепных ЛЭП является гармоника порядка ($n = 1$). Ее амплитуды a_{l1} и b_{l1} с учетом (5), (10) будут равны:

$$a_{l1} = x_a + \alpha^2 \cdot x_b + \alpha \cdot x_c, \quad b_{l1} = z_a + \alpha^2 \cdot z_b + \alpha \cdot z_c. \quad (11)$$

Здесь следует обратить внимание на то, что величины амплитуды a_{l1} и b_{l1} первой гармоники ($n = 1$) не зависят от начала выбранной системы координат X, Y, Z .

Знание амплитуд a_{l1} и b_{l1} первой гармоники магнитного поля ЛЭП позволяет, по соотношению (7) построить ее магнитогаммы

$$B_l(x) \approx B_{l1}(x) = \mu_0 I \frac{\sqrt{(a_{l1})^2 + (b_{l1})^2}}{2\pi \cdot ((h - h_0)^2 + x^2)}, \quad (12)$$

где h – расстояние от уровня земной поверхности (рис. 1) до центра окружности r_{\min} , в которую вписываются все токовые линии ЛЭП.

Для удобства расчетов расстояние h можно положить равным средней высоте h_a, h_b, h_c подвеса соответственно проводов фаз A, B и C

$$h \approx 1/3(h_a + h_b + h_c). \quad (13)$$

После несложных, но громоздких преобразований соотношение (12) можно привести к виду:

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{d_{rms}}{2\sqrt{2}\pi \cdot ((h - h_0)^2 + x^2)}, \quad (14)$$

где d_{rms} – среднее квадратичное расстояние между проводами ЛЭП

$$d_{rms} = \sqrt{(d_{AB})^2 + (d_{BC})^2 + (d_{CA})^2},$$

где d_{AB}, d_{BC}, d_{CA} – расстояние между точками подвеса на опоре проводов фаз A и B, B и C, C и A , соответственно.

Аналитическое представление магнитогамм (14) позволяет определить размер $\pm X_s$ полосы отчуждения при заданном параметре B_l

$$\pm X_s = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot I \cdot d_{rms}}{2\sqrt{2} \cdot \pi \cdot B_l} - (h - h_0)^2}. \quad (15)$$

Это соотношение устанавливает взаимную связь между размерами $\pm X_s$ полосы отчуждения и характеристиками ЛЭП – ее токовой (I) нагрузкой и конструктивным исполнением (профилем) ее опор, а именно средней высотой h точек подвеса проводов и среднеквадратичным расстоянием d_{rms} между ними.

Подземные кабельные ЛЭП. Магнитогаммы подземных кабельных линий, по аналогии с воздушными одноцепными ЛЭП определяются первой ($n = 1$) гармоникой их магнитной индукции.

Ниже приведены соотношения для магнитогамм двух наиболее часто применяемых укладок их кабелей (рис. 4) полученные с учетом (8) и (14).

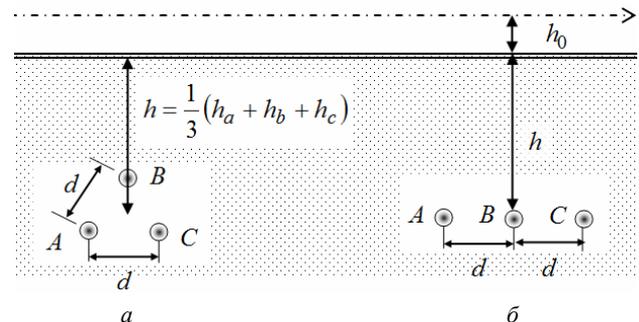


Рис. 4. «Треугольная» (а) и «плоская» (б) укладка кабельной линии

Для «плоской укладки» кабелей

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2\pi \cdot ((h + h_0)^2 + x^2)}. \quad (16)$$

Для укладки кабелей «треугольником»

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{\sqrt{3} \cdot d}{2\sqrt{2} \cdot \pi \cdot ((h + h_0)^2 + x^2)}. \quad (17)$$

Выводы.

1. Показано, что для расчета индукции магнитного поля ЛЭП на границе охранных зон с ограниченной погрешностью (менее 10%) может быть использована первая цилиндрическая пространственная гармоника ее магнитного поля.

2. Предложены упрощенные расчетные соотношения индукции магнитного поля ЛЭП на основе цилиндрических пространственных гармоник, позволяющие упростить расчет распределения магнит-

ного поля ЛЭП и оценку влияния конструктивных особенностей ЛЭП на ширину полосы отчуждения земельного участка для обеспечения экологической безопасности.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – 5-те вид., переробл. й доповн. (станом на 22.08.2014). – Х.: Форт, 2014. – 800 с.
2. Степанов И.М. Конструктивные меры снижения интенсивности магнитных полей по трассам воздушных и кабельных линий электропередач. // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №3. – С. 36-41.
3. Розов В.Ю., Реуцкий В.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. – 2013. – №2. – С. 3-8.
4. Штафль М. Электродинамические задачи в электрических машинах и трансформаторах. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 200 с.
5. Jabłoński P. Cylindrical conductor in an arbitrary time-harmonic transverse magnetic field // Przegląd elektrotechniczny (Electrotechnical Review). – 2011. – №5. – pp. 49-53.
6. Розов В.Ю., Реуцкий В.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 11-13.

REFERENCES

1. *Pravyła ulashtuvannja elektroustanovok 5-te vyd., pererobl. j dopovn. (stanom na 22.08.2014)* [Electrical Installation Regulations. 5 edition, Revised and enlarged (as of 22/08/2014)]. Kharkiv, Fort Publ., 2014. 800 p. (Ukr).
2. Stepanov I.M. Constructive modification reducing the intensity of the magnetic field on the tracks of overhead and cable power lines. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – ELEKTRO. Electrical engineering, power industry, electrical industry*, 2009, no.3. pp. 36-41. (Rus).
3. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2013, no.2, pp. 3-9. (Rus).

4. Shtafl M. *Elektrodinamicheskie zadachi v elektricheskikh mashinakh i transformatorakh* [Electrodynamic problems in electrical machines and transformers]. Moscow, Leningrad, Energiia Publ., 1966. 200 p. (Rus).
5. Jabłoński P. Cylindrical conductor in an arbitrary time-harmonic transverse magnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny – Electrotechnical Review*, 2011, no.5, pp. 49-53.
6. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pyliugina O.Yu. Method of calculating the magnetic field of three-phase power lines. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 11-13. (Rus).

Поступила (received) 04.12.2015

Ерисов Анатолий Васильевич¹,
Пелевина Екатерина Дмитриевна¹,
Пелевин Дмитрий Евгеньевич¹, к.т.н.,
¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная 19, тел/phone: +38 0572 992162, e-mail: erisov@yandex.ua, pelevindmitro@ukr.net

A.V. Yerisov¹, K.D. Pielievina¹, D.Ye. Pelevin¹
¹ State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

Calculation method of electric power lines magnetic field strength based on cylindrical spatial harmonics.

Purpose. Simplification of accounting ratio to determine the magnetic field strength of electric power lines, and assessment of their environmental safety. **Methodology.** Description of the transmission lines of the magnetic field by using techniques of spatial harmonic analysis in the cylindrical coordinate system is carried out. **Results.** For engineering calculations of electric power lines magnetic field with sufficient accuracy describes their first spatial harmonic magnetic field. **Originality.** Substantial simplification of the definition of the impact of the construction of transmission line poles on the value of its magnetic field and the bands of land alienation sizes. **Practical value.** The environmentally friendly projection electric power lines on the level of the magnetic field. References 6, tables 1, figures 4.

Key words: electric power line, magnetic field, environmental safety, cylindrical spatial harmonics.