

**В.Ю.Розов**, чл.-кор. НАН Украины, **С.Ю.Реуцкий**, канд.техн.наук, **О.Ю.Пилюгина**, канд.техн.наук  
**Институт технических проблем магнетизма НАН Украины,**  
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина,  
e-mail: [Rozov@nas.gov.ua](mailto:Rozov@nas.gov.ua)

*Предложен метод расчета магнитного поля (МП) трехфазных линий электропередачи (ЛЭП), позволяющий проводить расчет и гигиеническую оценку действующего значения индукции МП многопроводных и многоцепных ЛЭП с различной конфигурацией подвеса проводов, осуществлять экспериментальную проверку расчета с помощью стандартных векторных магнитометров. Показана нецелесообразность учета эллиптичности МП при расчете и контроле МП трехфазных ЛЭП в связи с существенным усложнением расчета и измерения при незначительном и неоднозначном уменьшении погрешности. Библиограф. 5, табл. 1, рис. 1.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, магнитное поле, расчет, эллиптичность.

**Введение.** Существующая в мире тенденция ужесточения санитарных норм по магнитному полю (МП) промышленной частоты, создаваемому в окружающем пространстве высоковольтными линиями электропередачи (ЛЭП), вызывает необходимость совершенствования методов расчета МП, используемых для гигиенической оценки уровня МП ЛЭП при их проектировании и эксплуатации. При этом важным является выбор в качестве расчетного параметра гигиенически нормируемой физической величины, измеряемой стандартными магнитометрами. Для гармонического МП с периодом  $T$  такой величиной является действующее значение модуля магнитной индукции  $|\mathbf{b}|$ , определяемое в точке  $P$  известным соотношением

$$B_k(P) = \left[ T^{-1} \int_0^T |\mathbf{b}(P, t)|^2 dt \right]^{0,5}. \quad (1)$$

Существенное значение при разработке метода расчета МП трехфазных ЛЭП также играет используемый принцип суперпозиции МП отдельных фаз ЛЭП, определяющий точность и универсальность метода расчета. В работе предложен метод расчета МП трехфазных многопроводных ЛЭП и выполнена оценка его погрешности, связанной с эллипсоидальной (эллиптической в случае плоскопараллельного поля) поляризацией МП трехфазных ЛЭП [1, 2].

**Метод расчета.** При расчете МП трехфазной ЛЭП примем следующие допущения: 1) провода имеют форму бесконечных линейных проводников с равномерно распределенным током; 2) процессы перераспределения тока внутри поперечного сечения проводов не рассматриваются; 3) токи в проводах строго гармоничны, равны по амплитуде и в разных фазах сдвинуты на 120 эл. градусов; 4) магнитное поле системы токов ЛЭП синусоидально и имеет две компоненты  $b(x, z, t) = b_x(x, z, t)\mathbf{e}_x + b_z(x, z, t)\mathbf{e}_z$ . Здесь  $x$  – горизонтальная, а  $z$  – вертикальная оси в плоскости, перпендикулярной проводам ЛЭП.

Мгновенные значения компонент вектора индукции магнитного поля, создаваемого в окружающем пространстве током фазы  $A$ , могут быть записаны в виде [4]

$$b_{A,x}(x, z, t) = -\mu_0 I_m (z - z_A) / 2\pi r_A^2 \sin(\omega t) \equiv B_{A,x}(x, z) \sin(\omega t);$$

$$b_{A,z}(x, z, t) = \mu_0 I_m (x - x_A) / 2\pi r_A^2 \sin(\omega t) \equiv B_{A,z}(x, z) \sin(\omega t),$$

где  $i_A(t) = I_m \sin(\omega t)$  – ток фазы  $A$ ;  $x_A, z_A$  – координаты линейного тока фазы  $A$  в плоскости, перпендикулярной направлению проводов;  $r_A^2 = (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2$ ;  $B_{A,x}(x, z)$  и  $B_{A,z}(x, z)$  – пространственные амплитуды. Аналогичные выражения записываются для фаз  $B$  и  $C$ , заменяя  $(x_A, z_A)$  на  $(x_B, z_B)$  и  $(x_C, z_C)$  соответственно и используя соответствующие выражения для фазных токов. Усредняя скалярные функции  $b_x(x, z, t)$ ,  $b_z(x, z, t)$  по времени за период  $T = 2\pi/\omega$ , получим их действующие значения

$$\tilde{B}_x(x, z) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,x}^2 + B_{B,x}^2 + B_{C,x}^2 - B_{A,x}B_{B,x} - B_{A,x}B_{C,x} - B_{B,x}B_{C,x}]}; \quad (2)$$

$$\tilde{B}_z(x, z) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,z}^2 + B_{B,z}^2 + B_{C,z}^2 - B_{A,z}B_{B,z} - B_{A,z}B_{C,z} - B_{B,z}B_{C,z}]}. \quad (3)$$

Окончательное выражение для действующего значения модуля индукции МП, определяющее его санитарно-гигиеническое действие, получаем в виде

$$B_k(x, z) = \sqrt{\tilde{B}_x^2(x, z) + \tilde{B}_z^2(x, z)}. \quad (4)$$

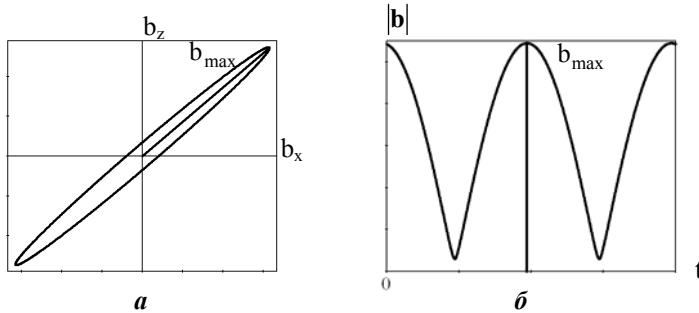
В случае трехпроводной линии выражению (4) можно придать компактный вид

$$B_k(x, z) = \left( \frac{\mu_0 I}{2\sqrt{2}\pi} \right) \sqrt{(d_{AB}/r_A r_B)^2 + (d_{AC}/r_A r_C)^2 + (d_{BC}/r_B r_C)^2}, \quad (5)$$

где  $I = I_m / \sqrt{2}$  – действующее значение тока каждой фазы;  $r_S = \sqrt{(x - x_S)^2 + (z - z_S)^2}$ ;  $S = A, B, C$ ;  $d_{AB}$ ,  $d_{AC}$ ,  $d_{BC}$  – расстояния от  $A$  до  $B$ , от  $A$  до  $C$  и от  $B$  до  $C$  соответственно.

Полученная компактная формула (5) может быть использована для расчета МП ЛЭП. Аналогичное выражение действующего значения индукции МП трехфазной ЛЭП также получено и в работах [5, 6]. Однако важно подчеркнуть, что предлагаемый в [5, 6] метод расчета получен при сделанном предположении о двумерном характере МП трехпроводной ЛЭП, что ограничивает его практическое применение. В то же время, разработанный авторами метод расчета МП ЛЭП в соответствии с формулами (2)-(4) является универсальным и применимым для общего случая трехмерного МП при произвольном числе трехфазных источников, в том числе и для ЛЭП с расщепленными проводами фаз [3]. Метод прошел экспериментальную апробацию на действующих ЛЭП.

**Оценка погрешности расчета с учетом эллиптичности МП.** Метод гигиенической оценки МП на основе формул (1) или (2)-(4) является общепринятым в мире. Однако, ряд российских авторов предлагают изменить контролируемую величину МП с учетом имеющей место эллиптической поляризации МП трехфазных источников [1, 2]. В частности, для гигиенической оценки МП ими предлагается использовать эффективное (действующее) значение синусоидального МП, имеющего амплитуду, равную большей полуоси эллипса, описываемого вектором индукции МП в данной точке. Целесообразность такого метода вызывает сомнение, так как он существенно усложняет как расчет МП, так и его измерение.



На рис. (а) показано изменение вектора индукции  $\mathbf{b}(t)$  в плоскости годографа; на рис. (б) – изменение модуля вектора индукции  $|\mathbf{b}(t)|$  эллиптически поляризованного МП за период времени  $T$ . Величина максимума модуля индукции  $\max|\mathbf{b}| = b_{\max}$  показана на рис. (а) и равна длине большей полуоси эллипса. Минимальное значение  $|\mathbf{b}|$  не равно нулю, как показано на рис. (б). При этом методе расчет контролируемой величины МП сводится к определению максимальной за период  $T$  величины  $b_{\max}$ . Затем в рассмотре-

ние вводится некоторая воображаемая однофазная ЛЭП, создающая МП с амплитудным значением индукции  $b_{\max}$  и действующим значением индукции

$$B_k = b_{\max} / \sqrt{2}. \quad (6)$$

Для оценки погрешности расчета МП трехфазных ЛЭП без учета эллиптической поляризации МП в таблице представлены сравнительные результаты расчета индукции  $B_k$  МП трехфазных ЛЭП для различной конфигурации подвеса проводов фаз для двух рассматриваемых методов при удалении от оси ЛЭП на расстояние  $x$ . Данные в таблице приведены для следующих конфигураций подвеса проводов: 1 – горизонтальное расположение; 2 – вертикальное расположение; 3 – расположение по углам равностороннего треугольника; 4, 5 – двойное и тройное расщепление проводов фаз с их оптимальной конфигурацией, предложенной в [3]. Расчет МП проводился на уровне Земли при расстояниях  $d$  между проводами 8 м, высотой подвеса нижнего провода 8 м и суммарной величиной действующего значения тока каждой фазы 1000 А.

Конфигурация подвеса проводов	1		2		3		4		5	
	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$
$x, \text{ м}$										
0	25,0	13,4	15,0	0,0	18,5	6,5	8,2	12,5	2,1	0,19
5	23,7	6,7	12,0	0,3	15,8	8,0	7,6	8,8	1,8	0,06
1	11,1	0,7	5,0	0,98	6,2	14,1	4,7	2,4	0,7	0,01
20	6,75	0,3	4,2	0,95	4,0	16,5	3,5	1,4	0,4	0,01
50	1,1	0,01	1,0	0,35	0,75	23,2	0,86	0,11	0,02	0,00
100	0,28	0,0	0,27	0,10	0,2	26,1	0,23	0,01	0,0	0,0

Значение  $\Delta B_k, \%$  представляет собой относительную разность в процентах между данными расчета по формулам (1)-(4) и расчетом с использованием большей полуоси эллипса (6). Анализ таблицы показывает, что эллиптичностью МП при практических расчетах можно пренебречь. Кроме того, следует отметить, что научные

данные относительно биологического влияния МП на живые организмы, свидетельствующие о преимуществах того или иного метода расчета, в настоящее время отсутствуют.

**Заклучение.** Предложенный метод расчета МП трехфазных ЛЭП по сравнению с известными обладает большей универсальностью и простотой реализации и может быть принят как базовый при разработке методики расчета МП трехфазных ЛЭП с различной конфигурацией и количеством проводов.

1. Дикой В.П., Токарский А.Ю., Иостсон Ю.А., Красин О.В. Методы расчета и измерения эллипсоидных магнитных полей промышленной частоты // Труды ИГЭУ «Повышение эффективности работы энергосистем». Вып.4. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – С. 215–222.

2. Белицын И.В., Котырло Т.В., Макаров А.В. Эллиптическое электрическое и магнитное поле электроустановок. Методы их расчета и нормирования // Известия Томского политехнического ун-та. – 2008. – Т. 312. – №4. – С. 61–65.

3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 3–8.

4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 2. – Л.: Энергия, 1967. – 408 с.

5. Moro, F. and Turri, R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – Pp. 1042–1048.

6. Moro, F. and Turri, R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment // Progress In Electromagnetics Research B. – 2012. – Vol. 37. – Pp. 343–364.

УДК 621.3.011.74.005

#### МЕТОД РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРИФАЗНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

**В.Ю.Розов**, чл.-кор. НАН України, **С.Ю.Реуцький**, канд.техн.наук, **О.Ю.Пилюгіна**, канд.техн.наук

**Інститут технічних проблем магнетизму НАН України,**

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

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

*Запропоновано метод розрахунку магнітного поля (МП) трифазних ліній електропередачі (ЛЕП), що дозволяє проводити розрахунок і гігієнічну оцінку діючого значення індукції МП багатопровідних і багатоланцюгових ЛЕП з різною конфігурацією підвісу проводів, здійснювати експериментальну перевірку розрахунку за допомогою стандартних векторних магнітометрів. Показана недоцільність обліку еліптичності МП при розрахунку і контролі МП трифазних ЛЕП у зв'язку з суттєвим ускладненням розрахунку і вимірювання при незначному і неоднозначному зменшенні похибки. Бібл. 6, табл. 1, рис. 1.*

**Ключові слова:** лінія електропередачі, магнітне поле, розрахунок, еліптичність магнітного поля ЛЕП.

#### METHOD OF CALCULATING THE MAGNETIC FIELD OF THREE-PHASE POWER LINES

**V.Yu.Rozov, S.Yu.Reutskyi, O.Yu.Pyliugina**

**Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine,**

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

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

*The method of calculation of the magnetic field (MF) of three-phase transmission lines (TL) is proposed. It allows to make the calculation and hygienic assessment of the effective value of MF induction for multiconductor and multichain (TL) with different configurations of wires. The proposed method also allows to verify the calculation by using standard vector magnetometers. It have been shown the inadvisability to take into account the ellipticity of MF in calculation and control of three-phase TL. Accounting ellipticity MP leads to a significant complication of calculation and measurement, however, slightly and ambiguous reduces error. References 6, table 1, figure 1.*

**Key words:** transmission line, magnetic field, rms value, ellipticity.

1. Dikoi V.P., Tokarskii A.Yu., Iostson Yu.A., Krasin O.V. Methods of calculation and measurement of ellipsoidal-frequency magnetic field // Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem». Vypusk 4. – Moskva: Energoatomizdat, 2001. – Pp. 215–222. (Rus)

2. Belitsyn I.V., Kotyrlo T.V., Makarov A.V. Elliptical electric and magnetic fields of electrical installations. Methods of analysis and valuation // Izvestiia Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. – 2008. – Vol. 312. – № 4. – Pp. 61–65. (Rus)

3. Rozov V.Yu., Reutskii S.Yu., Pelevin D.Ye., Piliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – № 2. – Pp. 3–8. (Rus)

4. Neimann L.R., Demirchian K.S. Theory of Electrical Engineering. Vol 2. – Leningrad: Energiia, 1967. – 408 p. (Rus)

5. Moro, F. and Turri, R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – Pp. 1042–1048.

6. Moro, F. and Turri, R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment // Progress In Electromagnetics Research B. – 2012. – Vol. 37. – Pp. 343–364.

Надійшла 04.02.2014