

О. В. Ходаковський, Л. О. Левченко, В. П. Колумбет, А. Д. Козачук, Д. С. Кужавський

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

РОЗРАХУНКОВИЙ АПАРАТ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ РІЗНОРІДНИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. Запропоновано прийнятний за припущеннями та спрощеннями і достатній за похибками кінцевих результатів розрахунковий апарат для моделювання поширення на визначеній площі електричних, магнітних та електромагнітних полів. Показано, що для моделювання поширення електричних та магнітних полів наднизьких частот (монітори, джерела безперебійного живлення, трансформатори, електродвигуни та генератори) треба розглядати ці джерела як джерела дипольного та дипольно-квадрупольного типу. Тобто, поле локального джерела можна розглядати як комбінацію електричних та магнітних диполів. Це надає змогу з достатньою точністю окреслити зони перевищення гранично-допустимих напруженостей полів. Для моделювання поширення електромагнітних полів дуже високих та ультрависоких частот адаптовано розрахунковий апарат, що використовувався для визначення інтенсивностей випромінювання радіолокаційного обладнання цивільної авіації. Надано розрахунки коефіцієнтів, які враховують параметри діаграм спрямованості випромінювань у горизонтальній та вертикальній площинах для найбільш розповсюджених джерел випромінювань. Наведені співвідношення і відповідні коефіцієнти можуть бути застосовані для визначення електромагнітної обстановки за наявності багатьох височастотних джерел (базових станцій мобільного зв'язку, навігаційного обладнання, радіорелейних станцій тощо). Запропонований підхід дозволяє автоматизувати процеси проектування розміщення електромагнітного, електронного та радіотехнічного обладнання на виробничих площах та територіях, а також здійснювати оцінювання впливу на довкілля на стадіях проектних робіт. Це надасть змогу окреслити ізолінії меж перевищення граничнодопустимих рівнів електричних магнітних та електромагнітних полів для різних частотних діапазонів та категорій обладнання і визначити у автоматичному режимі електромагнітне навантаження у кожній точці контрольованого простору.

Ключові слова: електромагнітне поле; моделювання; наднизькі частоти; ультрависокі частоти; напруженість поля.

Вступ

Моделюванню просторових розподілів електричних, магнітних та електромагнітних полів електричного та електронного обладнання приділяється багато уваги. Такі роботи здійснюються у двох напрямках: визначення розподілів полів у середині пристроїв-трансформаторів, електричних машин тощо з метою вдосконалення їх конструкцій та моделювання зовнішніх полів обладнання з метою підвищення рівнів електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки персоналу та населення. Зазвичай розглядається один пристрій або група однотипних пристроїв, електричне, магнітне, електромагнітне поле однієї частоти (спектри частот). Але у реальних виробничих умовах експлуатується обладнання, яке генерує електромагнітні поля широкого спектру з різними закономірностями просторових коливань. Розміщення такого обладнання на виробничих площах або територіях з метою забезпечення мінімального взаємного впливу та електромагнітної безпеки персоналу є складною задачею. Її розв'язання на стадії виконання проектних робіт або проведення оцінки впливу на довкілля, об'єкта будівництва, можливі тільки за розрахунок моделювання поширення полів, виходячи з технічних даних обладнання або використання вихідних експериментальних даних щодо аналогічного обладнання. Для цього потрібен комплекс математичних співвідношень, прийнятних за припущеннями та спрощеннями, які дозволяють оцінити рівні електромагнітних полів на визначеному

об'єкті за наявності різномірних джерел з урахуванням їх гранично допустимих рівнів. Це спростить процедуру створення прикладного програмного забезпечення, яке дозволить у автоматизованому режимі визначати і прогнозувати електромагнітне навантаження в усіх критичних точках контрольованої зони.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У більшості робіт з моделювання розподілів електромагнітних полів розглядаються магнітні поля, що поширюються у середині електротехнічного обладнання і впливають на його роботоспроможність та енергоефективність [1, 2]. Моделювання зовнішніх електромагнітних полів електротехнічного обладнання реалізується з використанням гармонічного аналізу на основі розв'язання рівняння Гауса для скалярного потенціалу [3, 4]. Для внутрішніх магнітних полів зазвичай застосовують пакет Comsol, який дозволяє отримати моделі з мінімальними похибками [5]. Але у багатьох випадках велика точність не потрібна, тому застосовується стандартний пакет Matlab та офіційний розрахунковий апарат. Це дає прийнятний результат для ліній електропередачі [6]. Аналіз досліджень зовнішніх магнітних полів електричного та електронного обладнання дозволяє дійти висновку, що більшість технічних засобів генерують магнітні та електромагнітні поля дипольного, дипольно-квадрупольного типу [7]. Тому розрахунковий апарат для моделювання електричних та магнітних полів може базуватися на розрахунках полів у формі диполів та їх комбінацій.

При цьому поля розосереджених джерел (ліній передавання енергії та електроживлення будівель) розраховуються, у разі потреби, за відомими співвідношеннями.

Щодо джерел електромагнітних полів радіочастот, то підходи до їх розрахунків та визначення загального електромагнітного навантаження на території занадто складні і небеззаперечні [8, 9]. В той же час існують методичні матеріали для розрахунку електромагнітних полів засобів керування повітряним рухом цивільної авіації [10], які можна адаптувати для розрахунків поширення електромагнітних полів сучасного навігаційного, зв'язкового обладнання з урахуванням діаграм спрямованості та чинних граничнодопустимих рівнів. На сьогоднішній день є доцільним розроблення простого у застосуванні розрахункового апарату, який дозволить здійснити моделювання низькочастотних та високочастотних електромагнітних полів з наданням даних про межі зон перевищення гранично допустимих рівнів.

Постановка завдання. Мета статті – надання комплексу співвідношень, придатних до автоматизації процесів розрахунків і моделювання поширення електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Виклад основного матеріалу

Низькочастотні електромагнітні поля оцінюються окремо за електричною та магнітною складовими. Розрахунки напруженостей електричних полів E базуються на фундаментальному співвідношенні:

$$E = -\text{grad } \phi,$$

де ϕ – потенціал електричного поля; $\text{grad } \phi = \nabla \phi$ – диференціальний оператор Гамільтона,

$$\nabla \phi = \mathbf{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \phi}{\partial z}.$$

Для відстаней, які значно більші за розміри джерела поля, доцільно використовувати визначення параметрів поля у сферичних координатах:

$$\nabla \phi = \mathbf{R}_0 \cdot \frac{\partial \phi}{\partial R} + \mathbf{Q}_0 \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \mathbf{A}_0 \cdot \frac{1}{R \sin \theta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \alpha}.$$

Більшість широко використовуваного обладнання (відеомонітори, системні блоки, джерела безперебійного живлення, друкуючі пристрої тощо) мають просторові структури електричних та магнітних полів, притаманні електричним та магнітним диполям (теоретично та експериментально показано у [11]). Так, наприклад, усі рідкокристалічні монітори мають електричні поля дипольного типу, джерела безперебійного живлення – магнітні поля дипольного типу. Розрахунок електричного поля базується на визначенні ϕ – скалярного потенціалу електричного поля, розрахунок магнітного поля базується на визначенні \mathbf{A} – векторного потенціалу магнітного поля.

Розглянемо електричний диполь з зарядом $\pm q$ та відстанню l , тобто з електричним дипольним моментом $P=q \cdot l$ (рис. 1). Скалярний потенціал електричного поля у точці спостереження a має вигляд:

$$\phi_a = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_2 \cdot R_1},$$

де ε – відносна електрична проникність середовища (для повітря $\varepsilon \approx 1$), ε_0 – діелектрична стала ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м).

У реальних умовах $R \gg l$, тобто скалярний потенціал електричного поля дорівнює:

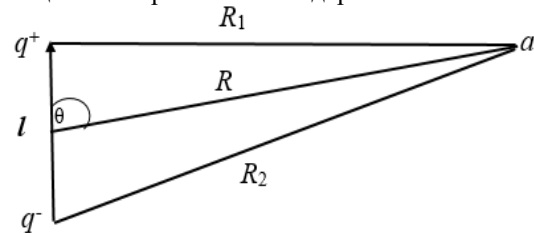


Рис. 1. Схема до розрахунку напруженості електричного поля електричного диполя (Fig. 1. Scheme for calculating the tension electric field of an electric dipole)

$$\phi \approx P \cdot \cos \theta / (4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^2).$$

У полярних координатах напруженість електричного поля на площині дорівнює:

$$E_R = -\frac{\partial \phi}{\partial R} = \frac{P \cdot \cos \theta}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3}; \text{ радіальна складова,}$$

$$E_Q = -\frac{\partial \phi}{R \cdot \partial \theta} = \frac{P \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3}; \text{ кутова складова,}$$

$$E_L = 0; \text{ кутова складова для координати } Z.$$

Тобто є можливість розглядати просторові зміни електричного поля у одній потрібній площині:

$$E = \sqrt{E_R^2 + E_Q^2} = \frac{P}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2 \theta},$$

$$P = 2\pi \varepsilon \varepsilon_0 E r^3,$$

E визначається експериментально на будь-якій відстані r . Сумарне поле у будь-якій точці від багатьох джерел визначається як:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}.$$

Наведене надає змогу раціоналізувати або навіть оптимізувати з точки зору електромагнітної безпеки розміщення багатьох джерел електричного поля дипольного типу.

Розрахунки напруженостей магнітних полів є аналогічними (електричний дипольний момент P замінюється на магнітний момент m), відповідно ε , ε_0 замінюється на μ , μ_0 :

$$m = i \cdot S,$$

де i – струм у контурі; S – площа контуру; μ – відносна магнітна проникність середовища (для повітря $\mu = 1$); μ_0 – магнітна стала ($1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м);

$$H_R = \frac{m \cdot \cos \theta}{2\pi \cdot R^3}; H_\theta = \frac{m \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot R^3}; m = 2\pi\mu_0 H r^3,$$

де H визначається експериментально.

Зазвичай, нормується індукція магнітного поля B :

$$B = \mu_0 H; H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

Більшість електричних машин чотириполюсні, а їх магнітне поле – дипольно-квадрупольне.

Наведене дає змогу розрахувати та автоматизувати процес визначення сумарного електромагнітного навантаження у будь-якій точці обраної площі за наявності багатьох джерел низькочастотних електричних полів. Електромагнітні поля високочастотних діапазонів нормуються як за напруженостями складових, так і за щільностями потоків енергії (В/м^2 , мкВт/см^2).

Розраховується поширення електромагнітних випромінювань діапазонів 8 (дуже високі частоти, 30–300 МГц, ГДР–6 В/м) та 9 (ультрависокі частоти, 0,3–9 ГГц, ГДР–10, 15, 20 мкВт/см^2). Для діапазону 8 розрахунок здійснюється зі співвідношення:

$$E = \frac{\sqrt{30PG\eta}}{R} KF(\theta)F(\varphi),$$

де E – напруженість електричного поля (В/м) на відстані R (м), P – напруженість випромінювача (Вт), G – коефіцієнт підсилення антени, η – коефіцієнт передачі антенно-фідерного тракту, K – множник впливу землі, $F(\theta)$ – коефіцієнт врахування діаграми спрямованості у вертикальній площині, $F(\varphi)$ – коефіцієнт врахування діаграми спрямованості у горизонтальній площині.

Розраховується розподіл напруженості поля для найбільш поширених джерел: $P = 25, 100, 300$ Вт; $G = 8, 31, 31$; $\eta = 0, 1$; $K = 1, 4$.

Значення $F(\theta)$ отримуються з таких діаграм спрямованості:

- 1) для $F(\theta) = F(\varphi) = 1$ – для 360° ;
- 2) для $F(\theta) = F(\varphi) = 1$ – для сектора $\pm 30^\circ$ (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення $F(\theta)$

$F(\varphi)$	φ , град
1,00	0
0,95	5
0,90	10
0,80	15
0,30	20
0,05	25
0,01	30

Сектор випромінювання 60° по горизонталі і вертикалі. Для діапазону 9 розрахунок здійснюється зі співвідношення:

$$W = \frac{8PGKF^2(\theta)\eta}{R^2},$$

де W – щільність потоку енергії випромінювання мкВт/см^2 на відстані R (м), P – напруженість випромінювача (Вт), G – коефіцієнт підсилення антени, η – коефіцієнт передачі антенно-фідерного тракту, K – множник впливу землі, $F^2(\theta)$ – множник нормованої діаграми спрямованості у напрямку об'єкта опромінення. Наведене співвідношення адаптоване для отримання результату у мкВт/см^2 , що фігурує у нормативах.

Розраховується розподіл щільності потоків енергії для: $P = 8, 32, 100, 1000$ Вт; $G = 32, 32, 8, 8$; $K = 1, 4$; $\eta = 1$.

Два варіанти:

1) для $F^2(\theta) = 1$ на 360° (енергія випромінювання розподіляється по колу);

2) для сектора $\pm 5^\circ$ (10°) $F^2(\theta)$ (табл. 2)

Таблиця 2 – Коефіцієнти $F^2(\theta)$

$F^2(\theta)$	θ , град
1,00	0
0,95	1
0,90	2
0,75	3
0,55	4
0,45	5
0,25	6
0,15	7
0,05	8

Для отримання електромагнітного навантаження у будь-якій точці розглядаються умови, коли зони перетинаються:

$$W_{\text{на}} = W_1 + W_2 + \dots + W_n,$$

$$E_{\text{на}} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}$$

Прогнозування електромагнітної обстановки, виходячи з наведених співвідношень є оціночним через можливі зміни потужності випромінювачів, коефіцієнтів впливу землі тощо. Визначення можливих змін електромагнітного навантаження у окремих зонах внаслідок відбиття хвиль від стін будівель та інших поверхонь здійснюється на конкретних об'єктах з урахуванням взаємного розташування споруд та матеріалів поверхонь. Але за умов автоматизації розрахунків отримання ізольованих зон перевищення гранично допустимих рівнів електромагнітних полів за різних початкових умов не складає проблеми.

Висновки

1. Обґрунтовано, що розрахунковий апарат для моделювання поширення електричних, електромагнітних та магнітних полів зі спрощеннями, прийнятними для оцінювання електромагнітної обстановки на визначених площах та територіях, повинен бути зручним для автоматизації обчислень та здійснення оптимізації розміщення електричного, електротехнічного та електронного обладнання.

2. Показано, що більшість локальних джерел електромагнітних полів є джерелами з дипольною та

дипольно-квадрупольною структурами електричних та магнітних полів. Для оцінювання їх рівнів застосовуються співвідношення, подібні для розрахунку електричних та магнітних диполів або рівняння Гауса для скалярного потенціалу (дипольно-квадрупольних джерел).

3. Для визначення поширення електромагнітних полів дуже високих та ультрависоких частот доцільно адаптувати

співвідношення, які застосовуються для розрахунків рівнів випромінювання радіолокаційного обладнання цивільної авіації. За наявності даних про потужність коефіцієнта підсилення та коефіцієнта передачі у антенно-фідерному тракті, діаграм спрямованості випромінювачів можна з прийнятною похибкою розрахувати розподіл рівнів електромагнітних полів усіх поширених джерел.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Техническая электродинамика*. 2015. № 2. С. 3–15.
2. Заблодский Н. Н., Филатов М. А., Грицок В. Ю. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 1. С. 25–27.
3. Степанов А. Н. Моделирование внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины. *Ученые записки, Комсомольск-на-Амуре: ГТУ*, 2011. № III-1 (7). С. 13–20.
4. Левченко Л. О., Сукач С. В., Коновалова О. В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечно перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6 (89), Ч. 1. С. 27–31.
5. Pryor R.W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones and Bartlett Publishers. 2011. 872 p.
6. Левченко Л. О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Системи обробки інформації*. 2016. № 1. С. 29–37.
7. Кирпанев А. В., Лавров В. Я. Электромагнитное поле: Теория и идентификация ее применение. Москва, Вузовская книга, 2012. 278 с.
8. Мордачев В. И. Электромгнитная нагрузка на территорию, создаваемая электромагнитными излучениями базовых станций сотовой связи. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2012. № 6. С. 114–121.
9. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2013. № 7. С. 44–50.
10. Шандала М. Г., Думанський Ю. Д., Іванов Л. С. Методичні вказівки з визначення рівнів електромагнітного поля засобів керування повітряним рухом цивільної авіації ВЧ-, ДВЧ-, УВЧ-, та НВЧ-діапазонів. Москва, 1988. 44 с.
11. Перельот Т. М. Моніторинг та нормалізація рівнів низькочастотних електромагнітних полів у виробничих умовах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Київ, 2017. 145 с.

REFERENCES

1. Podoltsev, A.D. and Kucheryavaya, I.N. (2015), "Multiphysical modeling of electrotechnical devices", *Technical electrodynamics*, No. 2, pp. 3–15.
2. Zablodskiy, N.N., Filatov, M.A. and Gritsyuk, V.Yu. (2012), "Numerical modeling of electromagnetic fields in polyfunctional electromechanical converters with a hollow perforated rotor", *Electrotechnics and electromechanics*, No. 1, pp. 25–27.
3. Stepanov, A.N. (2011), "Modeling of the external magnetic field of a three-phase electric machine" *Scientific notes*, GTU, Komsomolsk-on-Amur, No. III-1 (7), pp. 13–20.
4. Levchenko, L.O., Sukach, S.V. and Konovalova, O.V. (2014), "Modeling of spatial distributions of magnetic fields of electric machines for definition of zones of safe stay of personnel", *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrogradsky National University*, Is. 6 (89), part 1, pp. 27–31.
5. Pryor, R.W. (2011), *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones and Bartlett Publishers, 872 p.
6. Levchenko, L.O. (2016), "Modeling of spatial distributions of electromagnetic fields of overhead power lines", *Information processing systems*, No. 1, pp. 29–37.
7. Kirpanev, A.V. and Lavrov, V.Ya. (2012), *Electromagnetic field: The theory of identification and its application*, University book, Moscow, 278 p.
8. Mordachev, V.I. (2012), "Electromagnetic load on the territory created by electromagnetic radiation of base stations of cellular communication", *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, No. 6. pp. 114–121.
9. Mordachev, V.I. and Svistunov, A.S. (2013), "Necessary and sufficient power level of electromagnetic radiation of base stations of the GSM network", *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*, No. 7, pp. 44–50.
10. Shandala, M.G., Dumansky, Yu.D. and Ivanov, L.S. (1988), *Methodical instructions for determining the levels of the electromagnetic field for air traffic control of civil aviation of the HF, UHF, UHF, and microwave bands*. Moscow, 44 p.
11. Perelyot, T.M. (2017), *Monitoring and normalization of levels of low-frequency electromagnetic fields in production conditions*, diss PhD 05.26.01, Kyiv, 145 p.

Received (Надійшла) 14.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.12.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Ходаковський Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Oleksii Khodakovskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: dzgeron@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3930-0030>.

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472>.

Колумбет Вадим Петрович – старший викладач кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Vadym Kolumbet – Senior Lecturer of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: vksvarov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0871-9402>.

Козачук Анна Дмитрівна – магістрант кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Anna Kozachuk – master's student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: vksvarov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1101-9837>.

Кужавський Дмитро Сергійович – магістрант кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Dmytro Kuzhavskiy – master's student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine;

e-mail: dimakouj@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6412-0752>.

Расчетный аппарат моделирования распространения электромагнитных полей разнородных источников

А. В. Ходаковский, Л. А. Левченко, В. П. Колумбет, А. Д. Козачук, Д. С. Кужавский

Аннотация. Предложен приемлемый по предположениям и упрощениям и достаточный по погрешностям конечных результатов расчетный аппарат для моделирования распространения на определенной площади электрических, магнитных и электромагнитных полей. Показано, что для моделирования распространения электрических и магнитных полей сверхнизких частот (мониторы, источники бесперебойного питания, трансформаторы, электродвигатели и генераторы) надо рассматривать эти источники как источники дипольного и дипольно-квадрольного типа. То есть, поле локального источника можно рассматривать как комбинацию электрических и магнитных диполей. Это дает возможность с достаточной точностью определить зоны превышения предельно допустимых напряженностей полей. Для моделирования распространения электромагнитных полей очень высоких и ультравысоких частот адаптирован расчетный аппарат, который использовался для определения интенсивностей излучения радиолокационного оборудования гражданской авиации. Предоставлены расчеты коэффициентов, учитывающих параметры диаграмм направленности излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях для наиболее распространенных источников излучений. Приведенные соотношения и соответствующие коэффициенты могут быть применены для определения электромагнитной обстановки при наличии многих высокочастотных источников (базовых станций мобильной связи, навигационного оборудования, радиорелейных станций и т.п.). Предложенный подход позволяет автоматизировать процессы проектирования размещения электромагнитного, электронного и радиотехнического оборудования на производственных площадях и территориях, а также осуществлять оценку влияния на окружающую среду на стадиях проектных работ. Это позволит определить изолинии границ превышения предельно уровней электрических магнитных и электромагнитных полей для различных частотных диапазонов и категорий оборудования и определить в автоматическом режиме электромагнитную нагрузку в каждой точке контролируемого пространства.

Ключевые слова: электромагнитное поле; моделирование; сверхнизкие частоты; ультравысокой частоты; напряженность поля.

Calculation apparatus for modeling the distribution of electromagnetic fields of different sources

Oleksii Khodakovskiy, Larysa Levchenko, Vadym Kolumbet, Anna Kozachuk, Dmytro Kuzhavskiy

Abstract. The calculation apparatus acceptable for assumptions and simplifications and sufficient for errors of final results for modeling the propagation of electric, magnetic and electromagnetic fields spread over a certain area was proposed. It is shown that to model the propagation of ultra-low frequency electric and magnetic fields (monitors, uninterruptible power

supplies, transformers, electric motors and generators) it is possible to consider these sources as dipole and dipole-quadrupole type sources. That is, the field of the local source can be considered as a combination of electric and magnetic dipoles. This makes it possible to delineate with sufficient accuracy the zones of exceeding the maximum allowable field strengths. The calculation apparatus used to determine the radiation intensities of civil aviation radar equipment was adapted to model the propagation of electromagnetic fields of very high and ultra-high frequencies. The calculations of coefficients that take into account the parameters of radiation patterns in the horizontal and vertical planes for the most common radiation sources are given. These ratios and corresponding coefficients can be used to determine the electromagnetic environment in the presence of many high-frequency sources (mobile communication base stations, navigation equipment, radio relay stations, etc.). The proposed approach allows to automate processes of designing the placement of electromagnetic, electronic and radio equipment in production areas and territories, as well as to assess the environmental impact at the stages of design work. This will make it possible to delineate the isolines of the limits of exceeding the maximum permissible levels of electric magnetic and electromagnetic fields for different frequency ranges and categories of equipment and to automatically determine the electromagnetic load at each point of the controlled space.

Keywords: electromagnetic field, simulation, ultra-low frequencies, ultra-high frequencies, field strength.