

УДК 004.942:621.38 (045)

О. В. Вишнівський, канд. техн. наук, доц.,
Є. С. Іваницький асист.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ТЕРМІНАЛА АЕРОПОРТА

Інститут аерокосмічних систем управління, inbox@vishnevsky.org

Запропоновано двовимірну модель системи екологічного моніторингу електромагнітного забруднення пасажирського терміналу аеропорту.

Ключові слова: електромагнітне забруднення, санітарні норми, метод кінцевих елементів, кінцево-елементна модель.

Вступ. Пасажирський термінал сучасного аеропорту – це складна біотехнічна екосистема, що має обстежуватися щодо відповідності санітарним нормам граничнодопустимих рівнів (ГДР) електромагнітного поля, яке створюється засобами радіозв'язку аеропортів та повітряного парку. Термінал аеропорту «Внуково», який взято за основу для моделювання у цій роботі показано на рис. 1.



Рис. 1. Пасажирський термінал «В» аеропорту «Внуково»

Постановка проблеми. Мета дослідження – вивчення розподілу електричного поля на території терміналу аеропорту, що створюється антенами літаків, та аналіз його відповідності ГДР, установленим відповідними санітарними нормами.

Аналіз досліджень та публікацій. Фундаментальну теорію екологічного моніторингу електромагнітного забруднення (ЕМЗ) подано в праці [1]. Розвинення теорії щодо можливості практичного використання викладено в працях [2; 3].

Формулювання для рівнянь у часткових похідних (PDE). Формулювання для високочастотних електромагнітних хвиль можна отримати із законів Максвелла–Ампера та Фарадея [4]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t};$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

Використовуючи матеріальні рівняння для лінійного середовища $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r$ та $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{D}_r$ та струм $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, ці рівняння перетворюються до вигляду

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \varepsilon \mathbf{E}}{\partial t};$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}.$$

За допомогою рівнянь $\mu \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$ та $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t$ можна записати:

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0.$$

Записуючи тепер поля в гармонічно-часовій формі (для 3D дослідження), отримуємо

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_z(x, y, z) e^{j\omega t};$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}_z(x, y, z) e^{j\omega t}.$$

Звідси впливають рівняння поля для електричної та магнітної складових:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - \omega^2 \varepsilon_c \mathbf{E} = 0;$$

$$\nabla \times (\varepsilon_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) - \omega^2 \mu \mathbf{H} = 0,$$

де

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$$

є комплексною магнітною проникністю матеріалу, через який поширюється електромагнітна хвиля.

Формулювання PDE для TE хвиль. Коли хвиля поширюється через x -площину моделювання, TE має лише одну складову електричного поля у z напрямку, а магнітне поле при цьому лежить у площині моделювання. Ось чому

$$\mathbf{E}(x, y, t) = E_z(x, y, t) \mathbf{e}_z = E_z(x, y) \mathbf{e}_z e^{j\omega t};$$

$$\mathbf{H}(x, y, t) = H_x(x, y, t) \mathbf{e}_x + H_y(x, y, t) \mathbf{e}_y = (H_x(x, y) \mathbf{e}_x + H_y(x, y) \mathbf{e}_y) e^{j\omega t},$$

де μ_r означає тензор розмірності 2×2 , а ε_{rzz} та σ_{zz} – відносну діелектричну проникність та провідність у напрямку z . Тоді рівняння

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \varepsilon_{rc} \mathbf{E} = 0,$$

де

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0},$$

може бути спрощено до скалярного для E_z :

$$-\nabla(\tilde{\mu}_r \nabla E_z) - \varepsilon_{rczz} k_0^2 E_z = 0,$$

де

$$\tilde{\mu}_r = \frac{\mu_r^T}{\det(\mu_r)}.$$

Хвильове число k_0 у вакуумі визначається співвідношенням

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \omega / c_0,$$

де c_0 – швидкість світла у вакуумі.

Із переходом у часову область робоче рівняння буде таким:

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_r \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{D}_r) + \nabla \times (\mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r)) = 0.$$

Його можна спростити до такої форми:

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_r \frac{\partial A_z}{\partial t} - \mathbf{D}_{rz}) + \nabla \times (\mu_r^{-1} (\nabla A_z - \mathbf{B}_r)) = 0.$$

Тут матеріальні рівняння такі: $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r$ та $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{D}_r$.

Формулювання PDE для ТМ хвиль. Поля для цього випадку можна подати у вигляді

$$\mathbf{H}(x, y, t) = H_z(x, y, t) = H_z(x, y) \mathbf{e}_z e^{j\omega t};$$

$$\mathbf{E}(x, y, t) = E_x(x, y, t) \mathbf{e}_x + E_y(x, y, t) \mathbf{e}_y = (E_x(x, y) \mathbf{e}_x + E_y(x, y) \mathbf{e}_y) e^{j\omega t}.$$

При цьому ϵ_r та σ означають тензори розмірності 2×2 , а μ_{rzz} – є відносна магнітна проникність у напрямку z .

Гармонічно-часове рівняння для ТМ хвиль виглядає так:

$$\nabla \times (\epsilon_{rc}^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mu_r \mathbf{H} = 0,$$

але його можливо спростити до скалярного для H_z :

$$-\nabla \cdot (\tilde{\epsilon}_{rc} \nabla H_z) - \mu_{rzz} k_0^2 H_z = 0,$$

де

$$\tilde{\epsilon}_{rc} = \frac{\epsilon_{rc}^T}{\det(\epsilon_{rc})}.$$

У часовій області рівняння для ТМ хвиль спрощується до вигляду

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_r \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{D}_r) + \nabla \times (\mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r)) = 0,$$

де $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r$ та $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{D}_r$.

Тут також можна використовувати лише матеріальні рівняння для лінійних середовищ.

Формулювання PDE для гібридних хвиль. Оскільки для завдань, розв'язуваних у цьому дослідженні, використовувалися зокрема і гібридні хвилі, то щодо них необхідно розв'язати рівняння для TE і ТМ хвиль разом. Оскільки ці рівняння незалежні, їх розв'язують послідовно.

Кінцево-елементна модель. Кінцево-елементну модель пасажирського термінала аеропорту «Внуково» (48624 елементи) показано на рис. 2. Вона складається з власне термінала, де розміщуються пасажирів; п'яти літаків зі встановленою на кожному з них точковою ізотропною антеною, яка випромінює електромагнітні хвилі на частоті 100 МГц з потужністю 15 Вт. На рис. 2 показано 10924 елементи для кращого візуального сприйняття моделі.

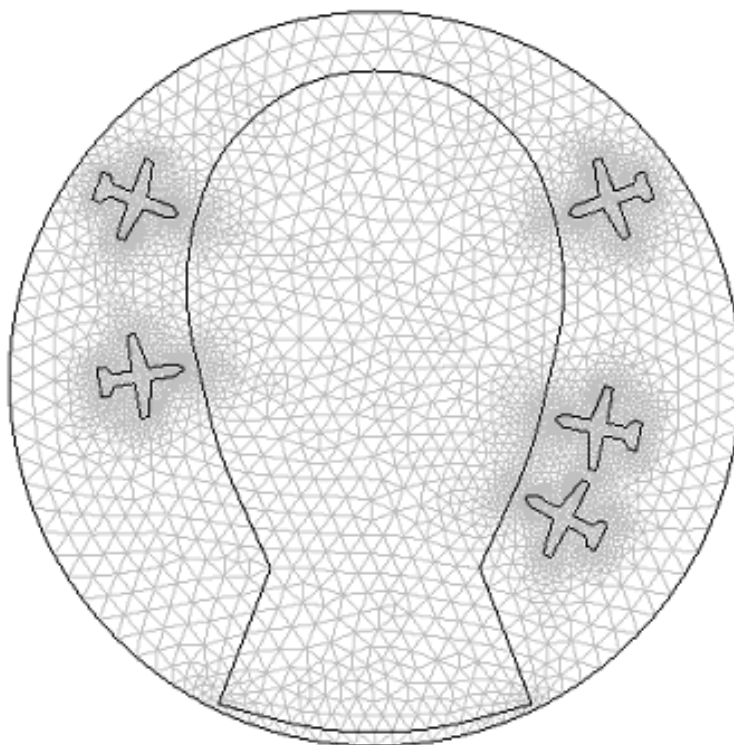


Рис. 2. Кінцево-елементна модель терміналу аеропорта

На рис. 3 показано отриману за допомогою проведеного математично-комп'ютерного моделювання картину розподілу електричного поля на території терміналу аеропорта для ГДР ЕМЗ 12 В/м згідно з працею [5]. У місцях, виділених червоним кольором, не можна розміщувати пасажирів, оскільки ГДР ЕМЗ у них перевищено.

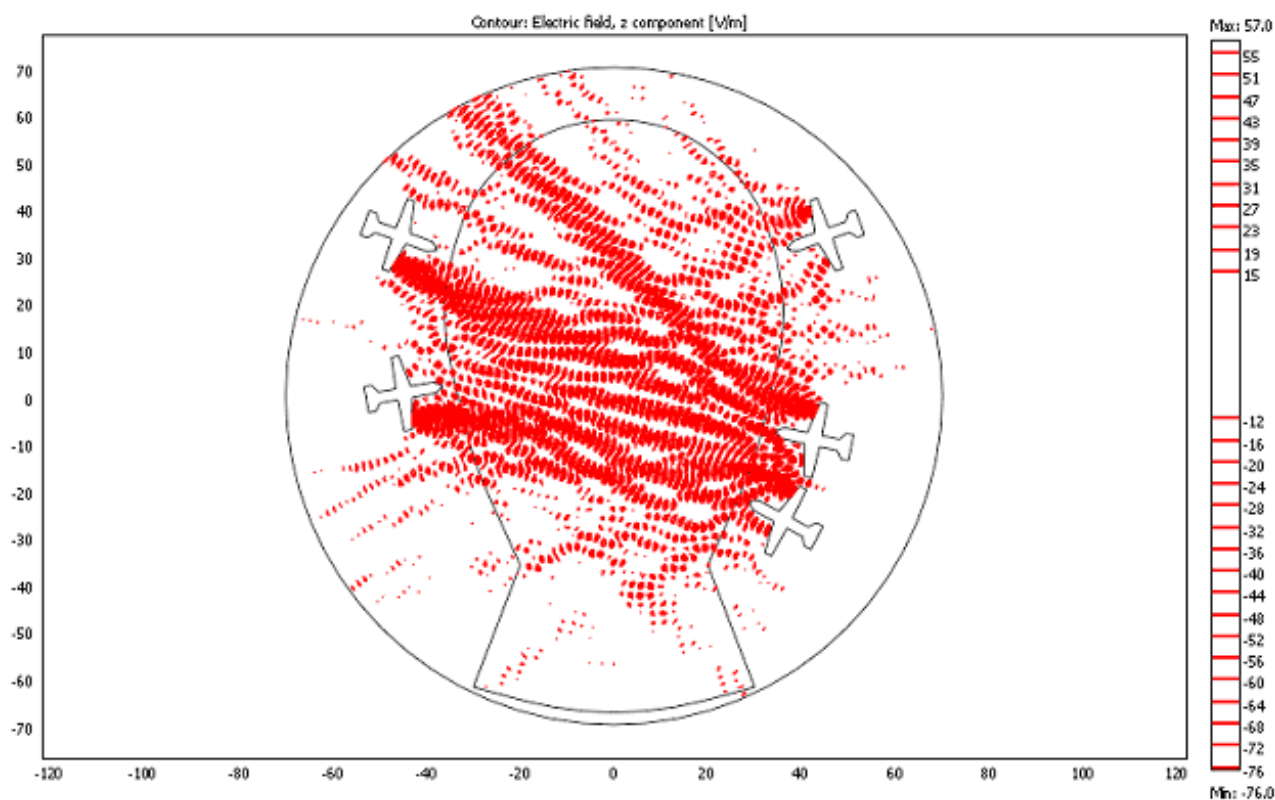


Рис. 3. Розподіл ЕМЗ, що перевищує ГДР на території терміналу

Висновок. Досліджено розподіл електричного поля по території терміналу аеропорту. Установлено місця, у яких перевищено відповідний ГДР ЕМЗ. Необхідні подальші дослідження з метою моделювання ЕМЗ терміналу реального аеропорту (тривимірне моделювання).

Список літератури

1. Федорович Г. В. Экологический мониторинг электромагнитных полей / Г. В. Федорович. – М.: 2004. – 71 с.
2. Антипов В. В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / В. В. Антипов, Б. И. Давыдов, В. С. Тихончук. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 177 с.
3. Грачев Н. Н. Средства и методы защиты от электромагнитных и ионизирующих излучений / Н. Н. Грачев. – М.: МИЭМ, 2005. – 215 с.
4. Санитарные нормы предельно допустимых уровней напряженности электромагнитного поля НЧ, СЧ, ВЧ и ОВЧ диапазонов, излучаемого радиосвязными средствами аэропортов гражданской авиации (№ 4946-89), 1989 г.

А. В. Вишневский, Е. С. Иваницкий

Моделирование экологического мониторинга электромагнитного загрязнения терминала аэропорта

Предложена двумерная модель системы экологического мониторинга электромагнитного загрязнения пассажирского терминала аэропорта.

A. V. Vishnevsky, E. S. Ivanitsky

Electromagnetic pollution ecological monitoring of airport terminal modeling

The two-dimension model of ecological monitoring system of airport's terminal electromagnetic pollution has been considered.