

УДК 538.69.331.45

В.В. Коваленко<sup>1</sup>, О.М. Тихенко<sup>1</sup>, В.П. Колумбет<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Досліджено особливості екранування електромагнітних випромінювань в умовах їх впливу як на людей, так і на технічні засоби. Показано, що для підвищення ефективності перфорованих екранів необхідно враховувати співвідношення розмірів отворів, відстаней між ними та довжиною екранованої хвилі, також надано відповідний графічний матеріал. Для підвищення захисних властивостей таких екранів отвори необхідно виготовляти у вигляді хвилеводів. Ефективним методом зниження відбивальних властивостей таких екранів є те, що вхідні отвори хвилеводів повинні мати певну кривизну, радіус якої розраховується, виходячи з експериментальних даних.

**Ключові слова:** електромагнітне навантаження, електромагнітний екран, височастотні випромінювання, перфорований екран, поглинальна здатність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Не дивлячись на значну увагу, що приділяється дослідженням у галузі електромагнітної екології та захисту працюючих від впливу електромагнітних полів та випромінювань, як окремі задачі, такі проблеми в цілому залишаються далекими від вирішення на прийнятному рівні.

Це обумовлено низкою причин як об'єктивного, так і суб'єктивного характеру. До об'єктивних можна віднести якісні та кількісні зміни електромагнітного навантаження на виробниче, побутове та оточуюче середовища – збільшення амплітуд та розширення частотного спектра електромагнітних полів та випромінювань, генерованих обладнанням масового використання. Об'єктивними чинниками є результати досліджень медиків та гігієністів, які свідчать про негативний вплив на біологічні об'єкти електромагнітних полів та випромінювань, які вважалися безпечними. Слід зауважити, що існує і протилежний процес. Так, у національні санітарні норми України був закладений гранично допустимий рівень випромінювання надвисоких частот, який виявився неадекватним і цей показник збільшується у чотири рази, що відповідає європейському нормативу.

Суб'єктивними причинами є застаріла нормативна база з електромагнітної безпеки, зокрема з переліку матеріалів і конструкцій для екранування електромагнітних полів та випромінювань. Виготовлені з нормативних матеріалів електромагнітні екрани у багатьох випадках недостатньо ефективні, а конструкції з них мають великі габарити, вагу та вартість. Тому на сьогоднішній день актуальною задачею є дослідження можливостей і практичне втілення електромагнітного захисту, який відповідає нагальним потребам сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як в Україні, так в усьому світі проблематиці захисту лю-

дей від впливу електромагнітних полів та випромінювань приділяється багато уваги [1 – 3]. Специфікою цієї галузі є те, що значна частина матеріалів таких досліджень та прикладних розробок мають обмежений доступ через використання у військовій галузі та для технічного захисту інформації. Але аналіз доступних джерел свідчить, що основним напрямом розвитку захисту людей від впливу електромагнітних полів та випромінювань є розроблення багатопшарових і композитних захисних матеріалів та виготовлення спеціальних, для конкретних умов, конструкцій з традиційних металевих матеріалів. При цьому технології виготовлення матеріалів та інженерні рішення досить складні [4]. Так, підвищення екрануючих характеристик радіопоглинальних матеріалів досягаються за рахунок вмісту у пористий матеріал вологи [5]. За досить добрих технічних характеристик у таких матеріалах можливі проблеми зі стабільністю захисних властивостей. Крім того, виготовлення екрана потрібної конфігурації з постійним та рівномірним вмістом вологи є проблематичним.

На сьогоднішній день найбільш ефективними поглинальними матеріалами є композитні матеріали з різними регулярними структурами. У роботі [6] показано, що керування захисними властивостями екрана здійснюються зміною концентрації металевих включень у діелектричній матриці. Але діапазон керуваності невеликий. При цьому головною технологічною задачею є рівномірність розподілу металевих субстанцій у тілі екрана. Більш ефективними є поверхні з додаванням у діелектричну матрицю дрібнодисперсного графіта [7], але потрібна ефективність досягається за складних комбінацій шарів, що не зовсім прийнятне у реальних виробничих умовах.

Досягнення аналогічних результатів можливе за рахунок додавання у металополімерний матеріал регулярної металеві структури [8]. Проте і у цьому випадку виникають певні технологічні труднощі як

під час виготовлення, так і при монтажі екрана необхідних властивостей і конфігурації. У роботі [9] досліджено поглинальні властивості усіх найбільш ефективних захисних матеріалів. Зокрема показано, що регулярні сітчасті та ґратчасті структури недостатньо ефективні за високих інтенсивностей випромінювань, але такі конструкції дуже привабливі через простоту виготовлення та малу вартість. Дослідження, наведені у [10], свідчать що одним з можливих напрямів робіт з підвищення ефективності електромагнітних екранів за рахунок збільшення їх поглинальних властивостей є вдосконалення конструкцій перфорованих екранів, що є слушним і перспективним.

**Мета роботи** – розробка методичних засад проектування поглинальних екранів для захисту від впливу високочастотних електромагнітних випромінювань.

### Виклад основного матеріалу

При визначенні ефективності перфорованих екранів виникають дві основні задачі: розрахунок частоти зрізу (тобто максимальної частоти випромінювання, для якого отвори обраного діаметра є непроникними) та ефективності поглинання частки випромінювання частот, нижчих за частоту зрізу. У цьому твердженні немає протиріччя через обов'язкову часткову проникність екрана внаслідок дифракційних явищ. У загальному випадку такі розрахунки досить складні, але існують спрощені напівемпіричні співвідношення, цілком прийнятні для вирішення прикладних задач, наведені, наприклад, у [10]. Так частота зрізу для круглого отвору визначається як

$$f_3 = 1,75 \cdot 10^5 / d, \text{ МГц,}$$

де  $d$  – діаметр отвору. Відповідно втрати енергії випромінювання на поглинання визначаються як:

$$K_n = 32 \cdot a/d, \text{ дБ,}$$

де  $a$  – товщина стінки екрана.

Наведене співвідношення впливає з теорії хвилеводів. При цьому величину  $a$  можна вважати довжиною хвилеводу.

Очевидно, що ефективність екранування за рахунок поглинання лінійно залежить від цього параметра. Таким чином, керуваність захисних властивостей такого екрана може бути забезпечена виготовленням отворів у вигляді хвилеводів необхідної довжини (рис. 1).

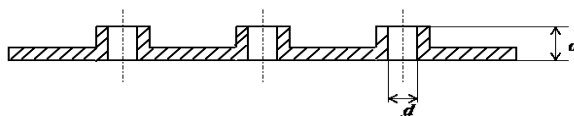


Рис. 1. Розріз електромагнітного екрана з отворами у вигляді хвилеводів

Для екрана такої конфігурації критичним є співвідношення розмірів отворів  $d$  та відстаней між ними  $l$ , а також довжина падаючої електромагнітної хвилі  $\lambda$ . Попередні дослідження [11] показали, що ефективність екранування для фіксованої відстані між отворами залежить лінійно від параметра  $(\lambda/d)^3$  (рис. 2).

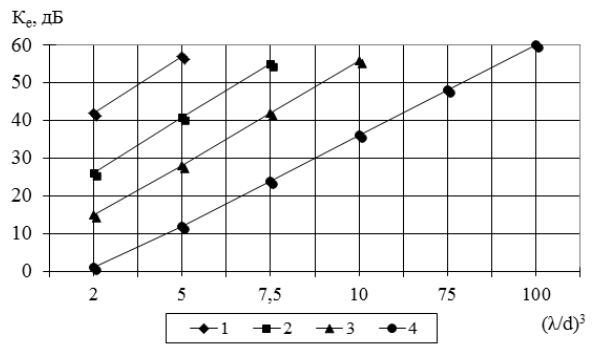


Рис. 2. Залежність ефективності екранування від параметрів перфорації (відстані між отворами  $l$ : 1-50 мм, 2-20 мм, 3-10 мм, 4-5 мм)

Комбінація двох наведених вище критеріїв дозволяє з прийнятною для реальних умов точністю визначати необхідну ефективність екранування та параметри екрана з точки зору розумної достатності.

Але за показаної на рис. 1 форми екрана значна частина сумарної ефективності екранування припадає на відбиття електромагнітних хвиль поверхнями, перпендикулярними фронту хвилі, що у багатьох випадках є шкідливим через відбиття випромінювання у небажаних напрямках. Це стосується як джерел випромінювань, розташованих усередині приміщень (особливо з точки зору забезпечення електромагнітної сумісності обладнання), так і зовнішніх джерел – потужних радіовипромінювачів.

У таких умовах доцільною є мінімізація частки плоских ділянок екрана, що сприяє розсіюванню випромінювання і підвищенню його поглинання. Конфігурацію такого екрана наведено на рис. 3.

Перевагами такого екрана є, крім достатньої ефективності, компактність і технологічність виготовлення. Наприклад, дослідний зразок виготовлявся штамповкою зі стандартного листа електротехнічної сталі товщиною 0,8 мм. Очевидно, що ефективність екрана значною мірою буде залежати від кривизни вхідних отворів для різних частот випромінювань та характеру джерел.

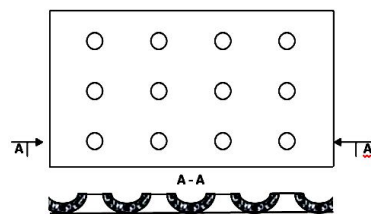


Рис. 3. Фронтальний вигляд та розріз поглинального електромагнітного екрана

Останнє обумовлене локалізацією джерела у просторі та просторовими розподілами напрямків поширення випромінювання. Тому, проектуванню електромагнітного екрана повинні передувати вимірювання частотно-амплітудних характеристик електромагнітного випромінювання, яке потребує екрану-

вання, та визначення просторових закономірностей його поширення. Останнє можливо здійснити й розрахунковими методами. Наприклад у [12] необхідні параметри хвильових електромагнітних полів визначаються на основі сферичного гармонічного аналізу з прийнятними припущеннями і спрощеннями. Випробування електромагнітних екранів, виготовлених на основі запропонованих підходів, довели їх високу ефективність як у виробничих, так і у побутових умовах. Але роботу не можна вважати повністю завершеною. Натурні вимірювання показали, що за певних співвідношень геометричних характеристик на частотах 600-800 МГц спостерігається різке зниження коефіцієнта екранування. Можливою причиною є резонансні явища, що потребує проведення подальших експериментальних та теоретичних досліджень.

### Висновки

1. Підвищення ефективності екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких та вищих частот досягається використанням перфорованих екранів з отворами у вигляді хвилеводів.
2. Перевагою розроблених екрануючих поверхонь є забезпечення екранування переважно за рахунок поглинання електромагнітної енергії, що мінімізує відбиття електромагнітних хвиль у небажаних напрямках.
3. Параметри перфорації та кривизни вхідних перфорованих отворів обираються, виходячи з отриманого графічного матеріалу і наведених співвідношень та експериментально визначених амплітудно-частотних характеристик екранованого випромінювання.
4. Для підвищення ефективності та спрощення процесу проектування екрана обов'язковим є попереднє визначення як амплітудно-частотних характеристик екрануючих поверхонь, так і ідентифікація поля з точки зору закономірностей його просторового поширення.

### Список літератури

1. Панова О.В. *Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис... канд. техн. наук: 05.26.01 / Панова Олена Василівна – К., 2014. – 151 с.*
2. Рябов Ю.Г. *Экранирование встроенных трансформаторных подстанций / Ю.Г. Рябов, И.Б. Гуров // Технологии ЭМС. – 2014. – №3. – С. 21-28.*
3. Xingcun C.T. *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding / C.T. Xingcun. – CRS Press, 2009. – 342 p.*
4. *Островский О.С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько // Физическая инженерия поверхности. – 2003. – Т. 1, № 2. – С. 10-17.*
5. *Влияние влажности на экранирующие характеристики радиопоглощающих материалов / Н.В. Насонова, Т.А. Пулко, Т.А. Аль-Адеми и др. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2013. – № 2. – С. 86-91.*
6. *Защитные свойства электромагнитных экранов на основе металлокерамических материалов в диапазоне СВЧ / [Клапченко В.И., Краснянский Г.Е. и др.] // К.: Гігієна населених місць, 2010. – Вип. 56. – С. 219-226.*
7. *Зотов И.С. Исследование электродинамических характеристик композитных материалов с регулярными структурами: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.06 / Зотов Илья Станиславович. – Ч., 2011. – 124 с.*
8. Патент 103339 Україна, МПК G12B17/00. *Электромагнитный экран с вибрковим поглинанням / Волошкина О.С., Левченко Л.О., Панова О.В., Коваленко В.В. та інші.; заявлено 24.06.2015; опубл. 10.12.2015. Бюл. № 23.*
9. *Панова О.В. Экранирование электромагнитных полей та забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання / О.В. Панова // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Вип. 22. – С. 207-213.*
10. *Демский Д.В. Метод расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: дис... канд. техн. наук: 05.12.14. – М., 2014. – 114 с.*
11. *Глыва В.А. Исследования геометрических критериев электромагнитных экранов / В.А. Глыва, Е.В. Панова // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 1. – С. 10-17.*
12. *Кирпанев А. В. Электромагнитное поле: теория идентификации и её применение / А.В. Кирпанев, В.Я. Лавров. – М.: Вузовская книга, 2012. – 278 с.*

Надійшла до редколегії 15.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

### ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.В. Коваленко, О.Н. Тихенко, В.П. Колумбет

*Исследованы особенности экранирования электромагнитных излучений в условиях их влияния как на людей, так и на технические средства. Показано, что для повышения эффективности перфорированных экранов необходимо учитывать соотношение размеров отверстий, расстояний между ними и длиной экранированной волны, а также представлен соответствующий графический материал. Для повышения защитных свойств таких экранов, отверстия необходимо изготавливать в виде волноводов. Эффективным методом снижения отражающих свойств таких экранов является то, что входные отверстия волноводов должны иметь определенную кривизну, радиус которой рассчитывается, исходя из экспериментальных данных.*

**Ключевые слова:** электромагнитная нагрузка, электромагнитный экран, высокочастотные излучения, перфорированный экран, поглотительная способность.

### INNOVATIVE APPROACHES TO INCREASE EFFICIENCY SCREENING HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION

V.V. Kovalenko, O.M. Tykhenko, V.P. Kolumbet

*Electromagnetic radiation shielding characteristics in conditions of their impact on both human and technical means have been studied. Shown that for efficiency perforated screens necessary to consider the aspect ratio holes, the distance between them and the wave length of shielded and granted the appropriate graphic material. To increase the protective properties of these screens, holes should produce as waveguides. One effective method of reducing reflective properties of these screens is that the waveguides inlets must have a curvature radius of which is calculated based on the experimental data.*

**Keywords:** electromagnetic load, electromagnetic screen, high-frequency radiation, perforated screen, absorption ability.