

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

СКОБЛІКОВ ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.314.632:621.3.013

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ЕКРАНІВ
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВІД ВПЛИВУ СИЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Князєв Володимир Володимирович,
Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут
«Молнія» Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
керівник науково-дослідного відділу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Резинкіна Марина Михайлівна,
Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів
Національної академії наук України,
провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук
Глухенький Олександр Іванович
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України,
старший науковий співробітник відділу
стабілізації параметрів електромагнітної енергії

Захист відбудеться 10 жовтня 2013 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 14 » червня 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні тенденції розвитку технічних засобів передбачають мініатюризацію елементної бази, що обумовлює зниження порогу чутливості радіоелектронного обладнання до випромінюваних завад. З іншого боку, з кожним роком рівень штучного електромагнітного випромінювання неухильно зростає. Також досить високими залишаються рівні електромагнітних завад природного походження, спричинені, наприклад, розрядами блискавки. Ці обставини обумовлюють доцільність підвищення електромагнітної сумісності технічних засобів в частині забезпечення їх захисту від впливу сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад. Ефективне вирішення цієї задачі актуально насамперед для галузей техніки, в яких необхідним є забезпечення безвідмовної роботи технічних засобів, серед яких авіабудування, атомна енергетика та телекомунікації.

Загальновідомим методом захисту технічних засобів від сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад є електромагнітне екранування. На практиці, ефективність застосованих металевих екранів залежить від стабільності їх захисних характеристик впродовж всього терміну експлуатації технічних засобів. Існують стандартизовані методи вимірювання ефективності захисних властивостей корпусів-екранів, наприклад як регламентовано у стандартах IEEE Std 299 – 2006 та IEC 61000–5–7: 2001. Однак, ці методи не придатні для оперативного застосування. Компанія Boeing розробила власний спосіб (пат. № US 006225810B1), придатний лише для контролю якості гальванічного контакту між оплітками кабелів та корпусами.

Таким чином, розробка способу оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих корпусів-екранів технічних засобів є актуальною науково-технічною задачею, необхідність вирішення якої визначило напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ». Дослідження проводилися в рамках держбюджетних НДР МОН України «Наукове обґрунтування та практична реалізація розширення можливостей Еталону РЕМП на галузь створення одиниць великих імпульсних напруг та струмів» (№ ДР 0106U012304); «Розробка та реалізація прямого методу дослідження метрологічних характеристик вимірювачів великих імпульсних напруг та струмів («Еталон-СН»))» (№ ДР 0108U010891); та в рамках договору з державним підприємством «КБ «Південне» (м. Дніпропетровськ) «Расчетные методики оценки грозозащиты объектов ракетно-космической техники. Методика определения защитных свойств электромагнитных экранов», у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – розробка способу оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих екранів технічних засобів від впливу сильних електричних полів і потужних електромагнітних завад.

Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі сформульовані такі завдання:

- проаналізувати наявні методи теоретичного розрахунку та експериментальної оцінки захисних властивостей металевих екранів від впливу сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад;

- розробити математичну модель процесу проникнення електромагнітних полів всередину структурно-неоднорідних металевих екранів;

- розробити теоретичний метод розрахунку електромагнітної обстановки всередині структурно-неоднорідного металевих екрана, аналітично оцінити вплив різноманітних параметрів екрана на точність рішень, що отримані цим методом;

- виконати експериментальну перевірку рішень, що отримані розробленим теоретичним методом, шляхом фізичного моделювання процесів проникнення у макет структурно-неоднорідного металевих екрану імпульсних електричних та магнітних полів, які супроводжують блискавку; визначити складову похибки вимірювання неоднорідного електричного поля, що пов'язана з кінцевими розмірами застосованого датчика;

- розробити спосіб оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих екранів технічних засобів від впливу сильних електричних полів, розробити рекомендації щодо практичної реалізації запропонованого способу.

Об'єктом дослідження є електромагнітне екранування технічних засобів від впливу сильних електричних полів і потужних електромагнітних завад.

Предмет дослідження – спосіб оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих екранів технічних засобів від впливу сильних електричних полів і потужних електромагнітних завад.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертаційної роботи базуються на фундаментальних положеннях класичної електродинаміки. Моделювання задач електромагнітного екранування виконується за допомогою методу кінцевих елементів (FEM), а також гібридного методу, який запропоновано в дисертаційній роботі. Під час експериментальних досліджень використано метод фізичного моделювання, зокрема методи генерування імпульсних електромагнітних полів та вимірювання напруженості електричного і магнітного полів, що проникають всередину екрана. Порівняння розрахункових та експериментальних даних виконано методом зіставлення напруженості електричного або магнітного поля в заданих точках комп'ютерної моделі з середніми значеннями множини вимірювань однойменних параметрів у відповідних контрольних точках фізичної моделі екрана.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено тривимірну математичну модель процесу проникнення квазістационарних імпульсних електричних і магнітних полів, які супроводжують блискавку, в порожнину структурно-неоднорідних металевих екранів довільно складної форми та експериментально доведено достовірність цієї моделі з похибкою не більш ніж 20 %;

- вперше виконано розрахунок тривимірної структури електричного і магнітного полів в порожнині структурно-неоднорідного корпусу-екрана за протікання крізь його стінки струму блискавки. Встановлено, що в такому разі суттєвим є проникнення лише магнітного поля;

- удосконалено метод розрахунку складової похибки вимірювання напруженості електричного поля, яка пов'язана зі співвідношенням габаритних розмірів дифе-

ренціального перетворювача та ступенем неоднорідності вимірюваного електричного поля. Обґрунтовано вибір точок для експериментальних досліджень, в яких вказана складова похибки не перевищує 7 %;

– отримав подальший розвиток спосіб «двох антен» для визначення захисних властивостей металевих екранів технічних засобів. Амплітудно-часові параметри електричного поля, випромінюваного зовнішньою антеною, а також чутливість приймача в порожнині екрана запропоновано обирати за результатами розрахункової оцінки структури електричного поля, що проникає в порожнину екрана крізь отвір. Вдосконалений спосіб під час виконання не потребує доступу до порожнини екрана, бездротовий зв'язок між передавачем та автономним приймачем організується акустичним способом, або за допомогою магнітного поля;

– вперше доведено доцільність використання електричного поля з частотою, що дорівнює резонансній частоті металевих екранів, в якості індикатора деградації гальванічних контактів між конструктивними елементами металевих екранів технічних засобів, а також між оплітками кабелів та корпусами екранів, з метою контролю стабільності захисних властивостей цих екранів.

Практичне значення отриманих результатів для електротехнічної галузі, літакобудування та космічної техніки полягає в такому:

– запропоновано спосіб оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих корпусів технічних засобів по електричному полю на резонансній частоті екрана. У процесі застосування розробленого способу відсутня необхідність демонтажу технічного засобу з корпусу, а також втручання в схеми радіоелектронного устаткування. Спосіб дозволяє тестувати систему екранування з урахуванням кабельних ліній та може бути реалізованим у вигляді автономної автоматизованої системи на базі бездротової сенсорної мережі. Спосіб захищено державним патентом України на корисну модель № 61344. Він є найбільш ефективним для оцінки деградації захисних властивостей металевих екранів, що мають початкове затухання більше 20 дБ;

– розроблена програма SOA 2 (реєстр. № 44296 від 13.06.2012) дозволяє розраховувати компоненти і модуль електричного та магнітного полів в довільних точках в порожнині реальних структурно-неоднорідних металевих екранів, які мають кінцеву товщину стінки та певну кількість отворів. За отриманими рішеннями можна оцінити коефіцієнт екранування корпусу, а також оптимізувати компоновку чутливих до випромінюваних електромагнітних завад блоків радіоелектронного пристрою;

– розвинуто методику експериментального визначення рівня стійкості бортового обладнання об'єктів цивільної авіації до впливу радіочастотних полів високої інтенсивності (HIRF) згідно вимогам стандарту KT-DO160D (розділ 20). Обґрунтовано можливість зниження напруженості поля HIRF на величину коефіцієнта екранування корпусу на його першій резонансній частоті. Це дозволяє виконувати сертифікаційні випробування на електротехнічних установках, наявних в Україні;

Результати дисертаційної роботи використано при виконанні НДР МОН України, а також впроваджено на провідних підприємствах України: ДП «КБ «Південне» (м. Дніпропетровськ), ПрАТ «Авіаконтроль» (м. Харків), НДПКІ «Молнія» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка математичної моделі процесу проникнення квазістаціонарних електромагнітних полів в порожнину структурно-неоднорідних металевих екранів складної форми; розробка гібридного методу розрахунку просторово-часової структури електромагнітного поля в порожнині металевих екранів складної форми; вдосконалення методики атестації стійкості бортового обладнання літальних апаратів до впливу потужних радіочастотних полів; розробка способу контролю стабільності захисних властивостей металевих екранів за електричним полем. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на: Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я» (м. Харків, Україна, 2010, 2011 рр.); Міжнародних конференціях з надширококустових та надкоротких імпульсів „UWBUSIS” (м. Севастополь, Україна, 2010, 2012 рр.); Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КриМіКо'2010) (м. Севастополь, Україна, 2010 р.); Міжнародній конференції з електромагнітної екології та електромагнітної сумісності „EMC&EME'2011” (м. Санкт-Петербург, Російська Федерація, 2011 р.); Європейській конференції COMSOL (м. Штутгарт, Німеччина, 2011 р.); Міжнародній конференції з блискавозахисту „ICLP'2012” (м. Відень, Австрія, 2012 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 18 друкованих та 3 електронних виданнях, з яких 8 статей в фахових виданнях України, 3 державних свідоцтва України про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми, 1 патент України на корисну модель, 9 публікацій у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 279 сторінок, з них: 157 сторінок основного тексту, 82 рисунки та 19 таблиць по тексту, з яких 16 рисунків та 7 таблиць на окремих 17 сторінках; 5 додатків на 70 сторінках; список використаних джерел із 161 найменування на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень. Показано наукову новизну, а також викладено основні наукові та практичні результати, що отримані під час виконання роботи. Наведено дані щодо апробації та публікацій результатів досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів теоретичного розрахунку та експериментальної оцінки захисних властивостей металевих екранів від впливу сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад. Досліджено вплив таких електромагнітних завад: сильне електричне поле, магнітне поле та струм, які супроводжують блискавку; електромагнітний імпульс ядерного вибуху (ЕМІ ЯВ); потужні радіочастотні поля радіолокаційних станцій (HIRF). Системати-

зовано спектральні характеристики потужних електромагнітних завад, та визначено межі застосування квазістаціонарного режиму.

Проаналізовано основні аналітичні та числові методи розрахунку структури електромагнітного поля в порожнині електромагнітного екрана. Серед аналітичних методів розглянуто: методи вирішення задач дифракції електричного та магнітного полів на отворах різної форми – рішення Релея для круглих отворів, рішення Г. Кадена для круглих отворів та щілин, рішення В.В. Князева для еліптичних отворів; аналітичні рішення, що отримані В.І. Кравченко для розрахунку амплітудно-часових параметрів імпульсного поля блискавки, що проникають в порожнину однорідного металевих екрана. Також, розглянуто можливості методу кінцевих різниць та методу кінцевих елементів (FEM) для моделювання процесів електромагнітного екранування. Аналітичні методи мають обмеження щодо моделювання екранів складної форми, а числові методи проблематично застосовувати до екранів з відносно тонкими стінками та великою кількістю структурних неоднорідностей.

Значний вклад в розвиток теорії та практики електромагнітного екранування зробили такі вчені як М.І. Баранов, К. Баум, В.В. Васильєв, В.І. Васильєв, Г. Каден, В.В. Князєв, Л.Л. Коленський, В.І. Кравченко, Л.І. Мандельштам, В.М. Михайлов, М.М. Резинкіна, лорд Релей, В.О. Сікарєв, Д.Н. Шапіро, А.Й. Шваб, С.О. Щелкунов, А.А. Щерба, Ф.Юнг та інші.

Серед експериментальних методів визначення захисних властивостей металевих екранів проаналізовано метод двох антен, метод суперпозиції магнітних полів, метод фізичного моделювання, а також метод безконтактного визначення захисних характеристик екрануючих опліток кабелів, розроблений компанією Boeing.

За результатами проведеного аналізу встановлено необхідність розробки:

- методу моделювання тривимірної просторово-часової структури електромагнітного поля всередині структурно-неоднорідних металевих екранів;
- способу оперативного контролю стабільності захисних властивостей електромагнітних екранів для об'єктів авіації та ракетно-космічної техніки (РКТ), а також рекомендацій щодо його реалізації.

У **другому розділі** викладено методикку проведення дисертаційного дослідження, а також сформульовано таку робочу гіпотезу: наявність електричного поля в порожнині металевих екрана є найбільш чутливим індикатором при оцінці структурної цілісності корпусу, яка в свою чергу є основним чинником, що визначає захисні властивості екрана, а дослідження екрануючих властивостей структурно-неоднорідного корпусу є найбільш ефективними на власних частотах корпусу за рахунок виникнення ефекту об'ємного резонансу.

Виконано формулювання задач електромагнітного екранування, на основі якого запропоновано узагальнену математичну модель процесу проникнення електромагнітних полів в порожнину структурно-неоднорідних металевих екранів, яка для електричного поля (E -поля) має такий вигляд

$$\vec{E}_{in}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \vec{E}_{ent}^i(x, y, z, t), \quad (1)$$

де $\vec{E}_{in}(x, y, z, t)$ – результуюча просторово-часова структура вектора напруженості E -поля в порожнині структурно-неоднорідного металевго екрана; $\vec{E}_{ent}^i(x, y, z, t)$ – просторово-часова структура вектора напруженості E -поля, що проникає (дифрагує) через i -ту структурну неоднорідність екрана, часові характеристики цього поля збігаються з параметрами зовнішнього E -поля; N – кількість неоднорідностей в структурі металевго екрана.

Для магнітного поля (H -поля) запропонована математична модель має такий вигляд

$$\vec{H}_{in}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \vec{H}_{ent}^i(x, y, z, t) + \vec{H}_{diff}(t), \quad (2)$$

де $\vec{H}_{in}(x, y, z, t)$ – результуюча просторово-часова структура вектора напруженості H -поля в порожнині структурно-неоднорідного металевго екрана; $\vec{H}_{ent}^i(x, y, z, t)$ – просторово-часова структура вектора напруженості H -поля, що проникає (дифрагує) через i -ту структурну неоднорідність екрана, часові характеристики цього поля збігаються з параметрами зовнішнього H -поля; $\vec{H}_{diff}(t)$ – H -поле, що проникає (дифундує) в порожнину еквівалентного однорідного металевго екрана, просторова структура цієї компоненти вважається однорідною в межах всієї порожнини екрана, часові характеристики цього поля відрізняються від характеристик зовнішнього H -поля; N – кількість неоднорідностей в структурі металевго екрана.

У випадку протікання квазістаціонарного струму крізь металеву оболонку структурно-неоднорідного екрана суттєвим є проникнення лише H -поля. Математична модель проникнення магнітного поля при цьому подібна до моделі проникнення зовнішнього H -поля (2), за виключенням відсутності компоненти $\vec{H}_{diff}(t)$.

В кожній з трьох наведених моделей розрахунок окремих компонент E - або H -полів пропонується виконувати за допомогою вже відомих аналітичних виразів. Так, розрахунок $\vec{E}_{ent}^i(x, y, z, t)$ та $\vec{H}_{ent}^i(x, y, z, t)$ виконується за аналітичними формулами, що отримані в роботах В.В. Князева, а $\vec{H}_{diff}(t)$ – за аналітичними формулами з робіт В.І. Кравченко відповідно для зовнішніх електромагнітних полів гармонічної та імпульсної форми.

Адекватність запропонованих математичних моделей процесів проникнення сильних E -полів та потужних електромагнітних перешкод перевірено експериментально на реальних корпусах бортового радіоелектронного обладнання літальних апаратів (БРЕО ЛА) та макеті об'єкта РКТ.

У **третьому розділі** представлено основні етапи розробки гібридного методу розрахунку тривимірної просторово-часової структури електромагнітного поля в порожнині структурно-неоднорідного металевго екрана, а також теоретичні дослідження джерел похибок в його рішеннях.

Числові методи дозволяють досліджувати металеві екрани довільної форми, але завдяки високим вимогам до обчислювальних ресурсів мають певні труднощі щодо застосування до екранів з відносно тонкими ($d/R < 0,01$) стінками та великою кількі-

стю структурних неоднорідностей. Реальні екрани, зазвичай, мають товщину стінки d менш ніж 3 мм при габаритних розмірах R понад 300 мм. Крім того, існуючі методи за використання доступних засобів обчислювальної техніки, не дозволяють виконувати розрахунок тривимірної просторової структури імпульсних E - та H -полів в порожнині структурно-неоднорідних металевих екранів складної форми.

Гібридний метод (рис. 1), який базується на розробленій математичній моделі процесу проникнення електромагнітних полів в порожнину структурно-неоднорідних металевих екранів складної форми, поєднує переваги аналітичних і числових методів, та містить такі етапи:

1. За допомогою FEM виконується розрахунок розподілу E - або H -полів на поверхні тривимірного еквівалентного однорідного металевого екрана складної форми (рис. 2). Програмний пакет COMSOL Multiphysics (далі COMSOL) використовується для вирішення задач за допомогою FEM.

2. На основі структури E - або H -поля на поверхні еквівалентного однорідного екрана за допомогою зазначених вище аналітичних залежностей розраховуються компоненти $\vec{E}_{ent}^i(x, y, z, t)$, $\vec{H}_{ent}^i(x, y, z, t)$ та $\vec{H}_{diff}(t)$. На цьому ж етапі виконується розрахунок суперпозиції однотипних компонентів.

3. Для H -поля (рис. 1б) виконується розрахунок суперпозиції в просторі та часі компонент, що дифрагують на отворах та дифундують крізь однорідні стінки.

Вдосконалений аналітичний апарат, що базується на математичних рішеннях В.В. Князева, здобувачем реалізовано в лінійці програмних продуктів SOA/SOA2.

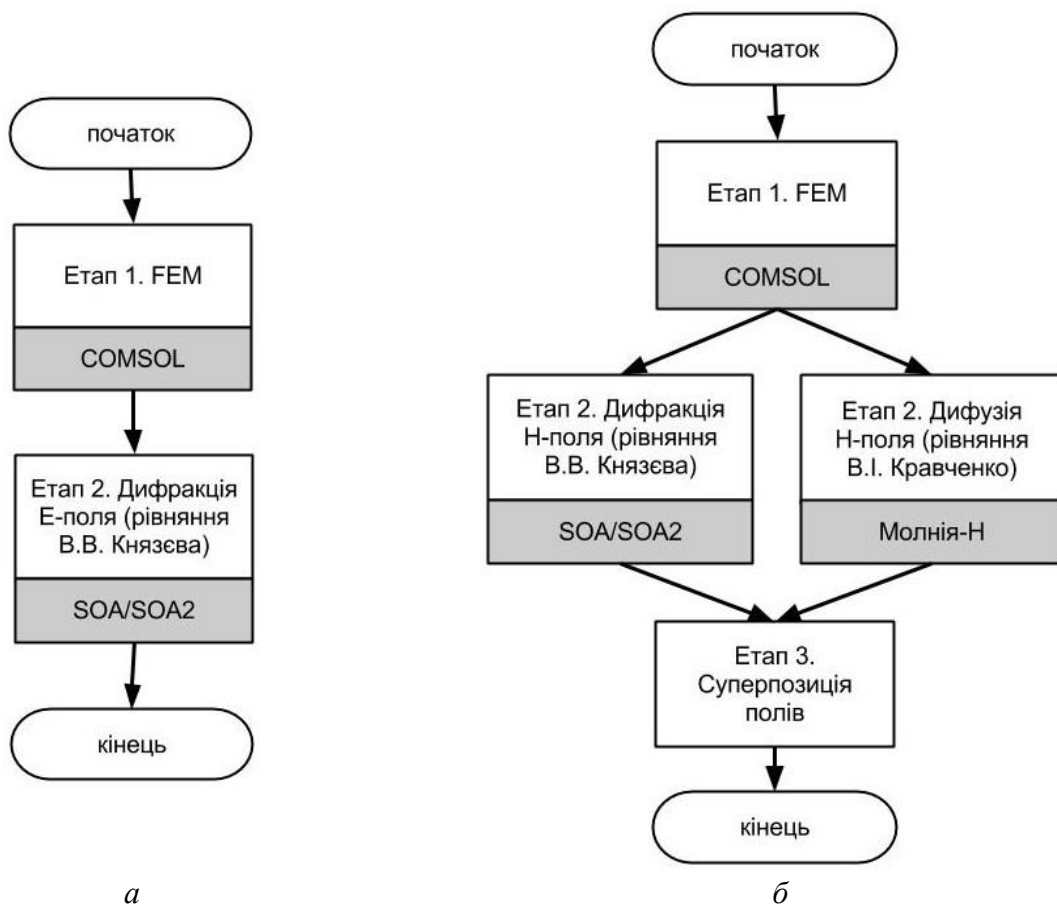


Рисунок 1 – Алгоритми розрахунку напруженості електричного (а) та магнітного (б) полів гібридним методом

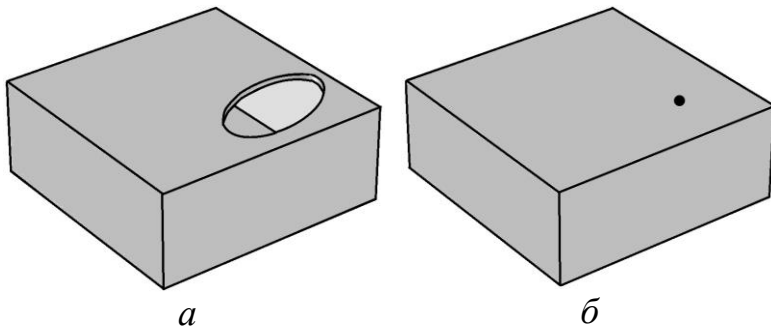


Рисунок 2 – Заміна електромагнітного екрана, що досліджується (а), еквівалентним однорідним (б)

Програма SOA реалізує спрощену версію аналітичного апарату, за допомогою якого виконується приблизний розрахунок модуля дифрагуючих компонент зовнішніх E - або H -полів, в той час як SOA2 реалізує повну версію аналітичного апарату і дозволяє виконати розрахунок окремих компонент E - або H -поля в порожнині структурно-неоднорідного металевого екрана.

Обидві версії SOA/SOA2 дозволяють розглядати довільну кількість отворів з індивідуальними геометричними параметрами, а також довільну кількість контрольних точок в порожнині екрана. Для розрахунку $\vec{H}_{diff}(t)$ використовується сторонній програмний продукт «Молнія-Н».

Детальну увагу в третьому розділі надано теоретичному дослідженню впливу вхідних параметрів гібридної моделі на похибку отриманих рішень для E -поля. Для цього рішення, отримані за допомогою SOA/SOA2, порівнюються з FEM, який завдяки його гнучкості взято за еталонний метод.

Розрахунок похибки рішень гібридного метода відносно рішень FEM виконується за формулою (3).

$$\Delta = \frac{E_{norm}^h - E_{norm}^n}{E_{norm}^n} \times 100 \%, \quad (3)$$

де E_{norm}^h – модуль електричного поля за результатами моделювання гібридним методом; E_{norm}^n – модуль електричного поля за результатами моделювання FEM.

Для аналізу впливу різних геометричних параметрів екрана на результати моделювання гібридним методом розглянуто 7 моделей, які поділено на 4 групи. В цих моделях варіюються форма екрана (куб, циліндр кінцевої довжини), габаритні розміри екрана, форма отвору (круглий, квадратний, еліптичний, щілина), площа отвору, а також орієнтація вектора напруженості E -поля відносно площини отвору. Для розрахунку E_{norm}^h та E_{norm}^n розглядається розподіл напруженості E -поля в порожнині екрана в двох ортогональних площинах, перпендикулярних отвору, в зоні, де напруженість E -поля перевищує 1 % від напруженості зовнішнього E -поля. Результати дослідження наведено в табл. 1. Аналіз свідчить, що гібридний метод для більшості конфігурацій дозволяє отримати рішення, відхилення яких відносно рішень FEM не перевищує 5 %.

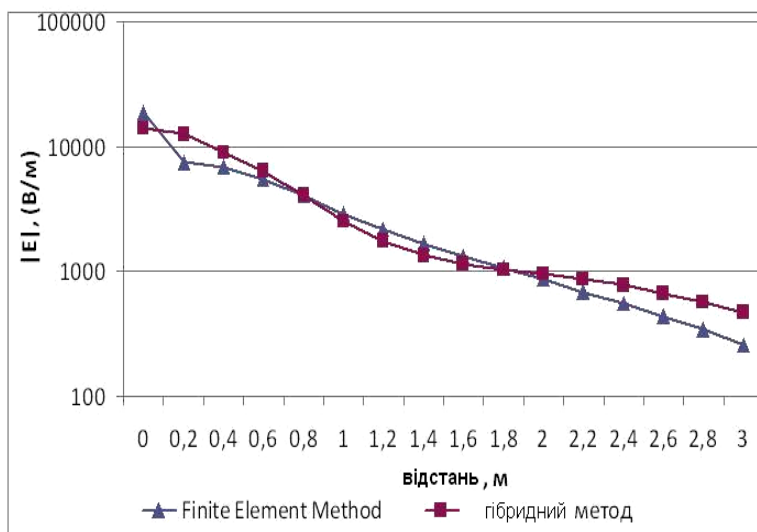
Для застосування гібридного методу до реальних тривимірних металевих екранів запропоновано використання еквівалентних еліптичних отворів для апроксимації отворів довільної форми та щілин. Досліджено вплив способу апроксимації на величину похибки отриманого результату. Проаналізовано три види апроксимації: рівність площ та співвідношень сторін, рівність периметрів, а також рівність сторін реального та еквівалентного еліптичного отворів.

Таблиця 1 – Вплив геометричних параметрів екрана на похибку гібридного методу

Модель	Форма екрана	Форма отвору	Відхилення, %	
			SOA від COMSOL	SOA2 від COMSOL
KE-1	куб	квадрат	-28,36	-1,26
KE-2	куб	круг	-29,8	-3,7
KE-3	куб	еліпс	-31,73	-3,88
KE-4	куб	щілина	-34,8	-32,55
KE-5	циліндр	квадрат	-30,97	-1,47
KE-6	паралелепіпед	квадрат	-26,95	+0,69
KE-7	паралелепіпед	квадрат	-27,9	-0,62

Результати теоретичних досліджень показали, що спосіб апроксимації впливає лише на рішення, що отримані за допомогою повної версії гібридного методу. Для прямокутного отвору, який є найпоширенішим на практиці, мінімальна похибка досягається за умови рівності сторін реального отвору довжині осей еліптичного отвору.

Для демонстрації основних переваг гібридного методу, наведено приклад його використання для моделювання екранів складної форми. В якості такого екрана обрано фюзеляж цивільного літака Airbus A320, на яких діє однорідне електростатичне поле з напруженістю 10^5 В/м. Порівняння розподілу модуля напруженості E -поля всередині кабіни вздовж прямої, що проходить від фронтальних вікон вглиб літака, за результатами розрахунку різними методами наведено на рис. 3. Отримані результати свідчать про те, що у ближній зоні отвору розбіжність у рішеннях FEM та гібридного методу не перевищує 20 %, а в дальній зоні гібридний метод дає стабільне завищення напруженості поля, що створює певний запас при аналізі захисних властивостей електромагнітних екранів.

Рисунок 3 – Розподіл напруженості E -поля вглиб кабіни літака Airbus A320

Розрахунок гібридним методом виконано приблизно за 10 хвилин роботи ПК з 4-ядровим процесором тактовою частотою 2,3 ГГц та 15 Гб оперативної пам'яті; для вирішення задачі за допомогою FEM на тому ж ПК знадобилося 57 хвилин. Такий результат дає кількісну оцінку ефективності гібридного методу у порівнянні з FEM, а також демонструє типове обчислювальне навантаження при моделюванні електромагнітних екранів складної форми. Слід зазначити, що гібридний метод в цілому дозволяє моделювання навіть та-

ких тонкостінних екранів, розрахунок яких є неможливим за допомогою FEM.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень процесу проникнення електромагнітних полів в порожнину структурно-неоднорідних металевих екранів. Ці дослідження об'єднано в два блоки.

Перший блок присвячено перевірці адекватності запропонованої математичної моделі процесу проникнення електромагнітних полів в порожнину екрану в квазістационарному наближенні.

Дослідження проведено шляхом фізичного моделювання впливу імпульсних процесів блискавки на макет об'єкту РКТ (рис. 4), виготовленого зі сплаву АМц ($\epsilon_r \approx 1$, $\mu_r \approx 1$, $\sigma \approx 2,7 \times 10^7$ См/м). Основний отвір макету закривався різними накладками для зміни геометричних параметрів основного отвору: накладка А – однорідна, накладка В – квадратний отвір 180×180 мм, накладка С – щілина 340×20 мм, накладка D – система з 4 однакових отворів діаметром 100 мм, відстань між центрами отворів 150 мм. Датчик для вимірювання напруженості E - та H -полів встановлювався в трьох контрольних точках в порожнині екрану з координатами: КТ1 (0;0,225;0); КТ2 (0;0,225;0,25); КТ3 (0;0,225;0,4). Центр основного отвору має координати (0;0,225;0,45). Значення координат задано у метрах.

Однорідне зовнішнє E -поле, створювалося двома металевими пластинами розміром $3,63 \times 5,21$ м² кожна, розташованими на відстані 3 м. Після проникнення всередину корпусу екрана E -поле стає неоднорідним.

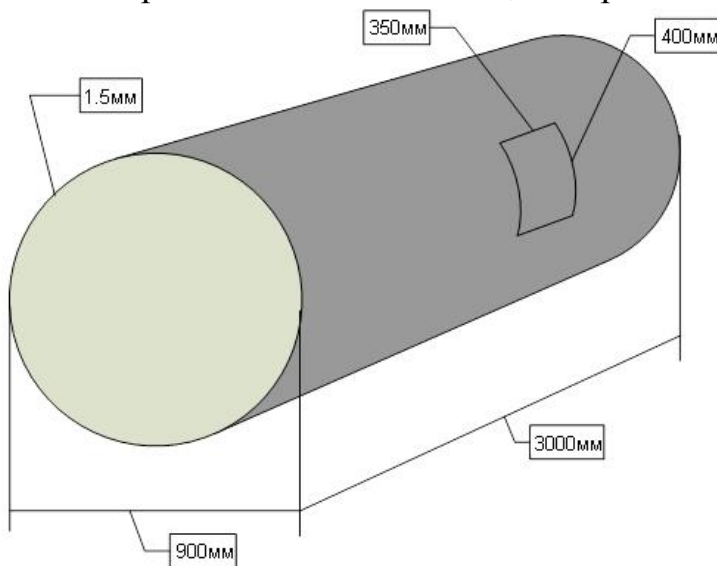


Рисунок 4 – Лінійні розміри корпусу-екрана, що досліджується

Оскільки датчики електричного та магнітного полів мають кінцеві розміри, при вимірюванні параметрів неоднорідного поля виникає похибка, величина якої залежить від лінійних розмірів датчика.

Для неоднорідного E -поля величина похибки залежить від співвідношення розмірів датчика та розмірів і форми отвору, відстані від датчика до поверхні екрана, а також місця його розташування. Вплив

цих параметрів на величину похибки експериментальних даних досліджено за допомогою числового моделювання. Величина похибки розраховувалась за формулою

$$\delta = \frac{\Delta U_i - \Delta U_0}{\Delta U_0} \times 100 \%, \quad (4)$$

де ΔU_i – напруга на виході ємнісного датчика, який розміщено в неоднорідному електричному полі з центром в точці i , в якій напруженість поля дорівнює E_0 ;

ΔU_0 – напруга на виході ємнісного датчика, який розміщено в однорідному еталонному електричному полі з напруженістю E_0 .

Результати дослідження підтверджують теоретичні очікування, що величина похибки даних вимірювання з певного датчика підвищується разом зі ступенем неоднорідності вимірюваного електричного поля. Для досягнення похибки меншої за 10 %, необхідно забезпечити співвідношення $R/a \leq 0,3$ (R – максимальний габаритний розмір перетворювача, a – мінімальний розмір отвору). Також встановлено, що похибка вимірювання електричного поля під час експериментального підтвердження результатів гібридного моделювання в обраних точках не перевищує 7 %.

Результати експериментального дослідження процесів проникнення E - та H -полів у квазістаціонарному наближенні підтвердили переваги електричного поля для оперативного контролю стабільності захисних властивостей екранів.

Другий блок експериментальних досліджень присвячено резонансному режиму. Для розрахунку власних резонансних частот структурно-неоднорідних металевих екранів використано FEM, що реалізований в COMSOL. Ці експериментальні дослідження, проведені на макеті об'єкту РКТ (рис. 4), підтвердили високу точність розрахунку резонансної частоти за допомогою FEM. Перша власна резонансна частота корпусу за результатами розрахунку в COMSOL складає 201,6 МГц, а за результатами експериментів (рис. 5) дорівнює 199,04 МГц.

На спектрограмі видно, що напруженість електричного поля на власній резонансній частоті металевих екрана в екранованій зоні (90,16 дБ) майже дорівнює напруженості зовнішнього поля (95 дБ), що свідчить про зникнення захисних властивостей структурно-неоднорідного електромагнітного екрана на власних резонансних частотах. Цей факт підтверджує положення висунутої гіпотези про переваги дослідження захисних властивостей металевих екранів на їх власних резонансних частотах.

Експерименти показали, що захисні властивості електромагнітного екрана знижуються як при порушенні його структурної цілісності, так і при порушенні гальванічного контакту між корпусом-

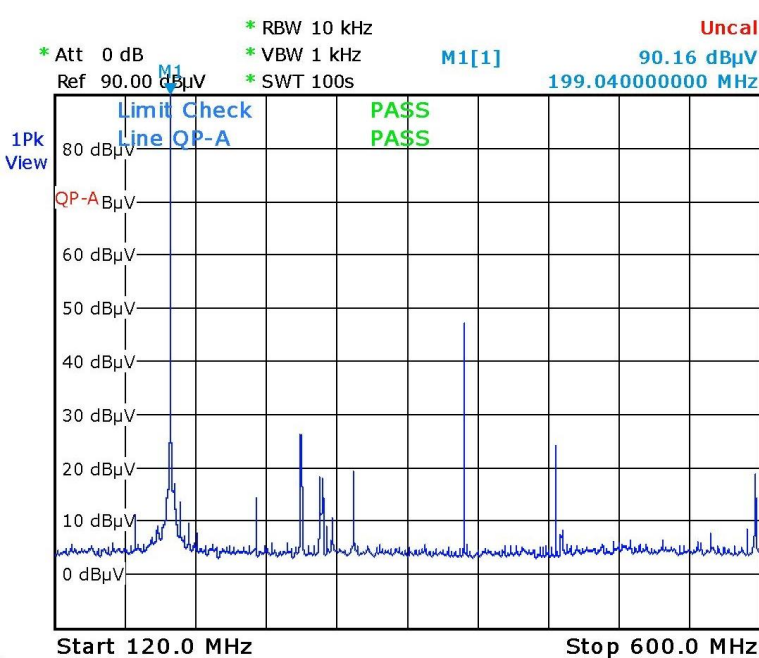


Рисунок 5 – Спектрограма напруженості E -поля в порожнині екрана в резонансному режимі

екраном та екранувальною опліткою підключених до нього електричних кабелів. Використання цього ефекту запропоновано для діагностики системи екранування в цілому.

Дослідження захисних властивостей електромагнітного екрана в резонансному режимі дозволяє досягти максимальної чутливості до порушення його структурної цілісності. Таким чином, достатньо навіть малої напруженості зовнішнього електричного поля для виявлення факту структурної неоднорідності корпусу-екрана. Однак, оскільки розподіл пучностей та ву-

злів електромагнітного поля має чітку структуру, яка мало залежить від положення структурної неоднорідності, в резонансному режимі неможливо виконати локалізацію структурної неоднорідності за структурою електромагнітного поля в порожнині екрана.

Результати, що отримані для квазістаціонарного наближення та резонансного режиму, дозволяють запропонувати новий спосіб оперативного контролю захисних властивостей металевих екранів, а також оптимізувати наявну стандартну методику дослідження стійкості БРЕО ЛА до впливу HIRF (патент № 201103429).

Основною проблемою при дослідженні стійкості БРЕО ЛА до впливу HIRF за стандартом DO-160F (розділ 20) є високі рівні напруженості зовнішнього гармонічного електромагнітного поля, яким необхідно опромінювати досліджуваний блок апаратури у всьому спектрі частот до 18 ГГц. Запропоновано спрощення цієї стандартної методики за рахунок виключення електромагнітних екранів при дослідженні стійкості РЕО та відповідного зменшення напруженості зондувального поля. Величина зменшення розраховується виходячи з коефіцієнту екранування корпусу з розміщеним в ньому РЕО на одній з його резонансних частот. Попередній розрахунок цих частот виконується за результатами комп'ютерного моделювання екрана у резонансному режимі за допомогою FEM. Таким чином, достатнім є дослідження РЕО разом з корпусом лише на нижніх частотах до частоти першого власного резонансу екрана, після цього можна знизити напруженість зондувального поля та впливати ним безпосередньо на РЕО. Наведено детальний алгоритм проведення дослідження стійкості БРЕО ЛА за модифікованою методикою з застосуванням обладнання, наявного в Україні.

Експериментальну апробацію модифікованої методики виконано на прикладі блока БРЕО літака АН-70. За результатами моделювання в COMSOL перша резонансна частота корпусу дорівнює 848 МГц. Виміряна спектрограма коефіцієнту екранування (рис. 6) підтверджує висновок про те, що захисні властивості корпусу є мінімальними на його власних резонансних частотах. Два графіки на спектрограмі зображують результати для двох ортогональних положень датчика електричного поля всередині корпусу.

Нарешті, запропоновано спосіб оперативного контролю стабільності захисних

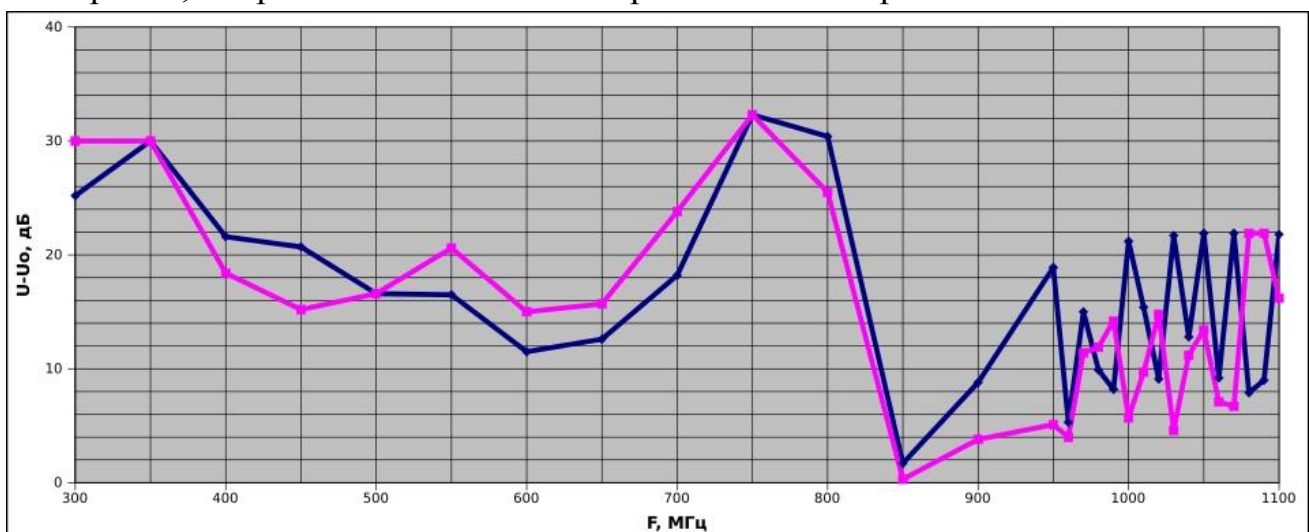


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта екранування від частоти зовнішнього E -поля для блока БРЕО літака АН-70

властивостей металевих екранів. Суть способу полягає в розміщенні на етапі виробництва автономного приймача всередині блока БРЕО. Цей приймач калібрується під певну напруженість електричного поля всередині корпусу. В процесі експлуатації БРЕО приймач перебуває в режимі сну. Для перевірки стабільності захисних властивостей електромагнітного екрана, запропонована наступна послідовність дій:

1. Активація приймача – виконується безконтактним методом за допомогою акустичного сигналу, по радіоінтерфейсу, або за допомогою низькочастотного магнітного поля;

2. Активація зовнішнього передавача зондувального електричного поля – передавач випромінює: гармонічне електромагнітне поле, частота якого дорівнює власній резонансній частоті корпусу, що досліджується; або імпульсне електромагнітне поле, спектр якого перекриває одну з власних резонансних частот корпусу;

3. Вимірювання приймачем рівня електричного поля всередині корпусу – якщо результат перевищує порогове значення, що було встановлено на етапі калібрування, то приймачем подається назовні акустичний, світловий, або електромагнітний сигнал, що вказує на порушення електромагнітної герметичності корпусу, що досліджується.

Практичну реалізацію способу оперативного контролю захисних властивостей електромагнітних екранів запропоновано у вигляді автоматизованої системи на базі бездротової сенсорної мережі (БСМ) за технологією ZigBee/IEEE 802.15.4. Для розробки та фізичного моделювання БСМ, здобувачем, на базі радіомодулів DIGI XBee Pro, розроблено відлагоджувальний стенд XBee Microlab (рис. 7), а також наведено рекомендації щодо побудови енергоефективної бездротової мережі.

Подальший розвиток способу контролю електромагнітної герметичності електромагнітних екранів пропонується у двох напрямках. Першим є локалізація положення структурних неоднорідностей, для реалізації якої вимірювання електричного поля повинно одночасно проводитися декількома приймачами всередині корпусу.

Другим напрямком розвитку способу контролю є його адаптація до використання під час роботи РЕО. Для цього приймач всередині корпусу повинен відрізнити випромінювання РЕО всередині корпусу від зовнішнього зондувального випромінювання, що може проникати всередину. Досягти цього можливо за рахунок кодування зондувального випромінювання унікальною інформаційною послідовністю. В цьому випадку зовнішній передавач ідентифікується, наприклад, за послідовністю та довжиною сеансів випромінювання та пауз гармонічного електромагнітного поля. В термінах теорії бездротової комунікації це означає, що для контролю електромагнітної герметичності корпусу РЕО в «гарячому режимі» використовується кореляційний прийом зондувального випромінювання зовнішнього передавача.



Рисунок 7 – Відлагоджувальний стенд XBee Microlab

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача розробки способу оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих екранів технічних засобів від впливу сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад, а також надано рекомендації щодо впровадження даного способу для підвищення електромагнітної сумісності технічних засобів з високими вимогами до надійності.

За результатами виконання дисертаційної роботи отримано висновки:

1. Відзначено, що основним фактором зниження захисних властивостей металевих екранів технічних засобів, особливо під час експлуатації в агресивних середовищах, є порушення їх структурної цілісності. Деградація захисних властивостей екрана, яка носить, як правило, прихований характер, підвищує чутливість технічних засобів до впливу сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад. Показана необхідність розробки практичних методик, які дозволяють виявити деградацію захисних властивостей металевих екранів в процесі експлуатації технічних засобів.

2. Розроблено математичну модель процесу проникнення сильних електричних та магнітних полів в порожнину структурно-неоднорідних металевих екранів складної форми. Запропонована модель дозволяє описати тривимірну просторову і часову структуру квазістаціонарних електричного і магнітного полів як гармонічної, так і імпульсної форми, в порожнині структурно-неоднорідного металевих екрана. Математична модель, в тому числі, дозволяє описати структуру магнітного поля, створеного струмом, що протікає крізь стінки екрана, наприклад, у випадку прямого удару блискавки. Адекватність математичної моделі підтверджено експериментальними дослідженнями за використання високовольтного обладнання та засобів вимірювальної техніки, що пройшли державну атестацію.

3. Запропоновано гібридний метод розрахунку тривимірної структури електромагнітного поля в порожнині структурно-неоднорідних металевих екранів складної форми з довільною товщиною провідного шару. Проведений порівняльний аналіз ефективності гібридного методу по відношенню до методу кінцевих елементів, взятому за еталонний, показав, що застосування гібридного методу дозволяє знизити обчислювальне навантаження на 30-90 %. Використання структури E -поля в порожнині структурно-неоднорідного металевих екрана, розрахованої гібридним методом, забезпечує деякий запас (до 20 %) при визначенні захисних властивостей екрана. Проведене порівняння результатів комп'ютерного моделювання з результатами експериментальних досліджень не виявили помітного впливу ефекту корони на кромках отворів на процес проникнення E -поля в порожнину структурно-неоднорідного екрана.

4. За результатами експериментальних досліджень структурно-неоднорідного металевих екрана на власних резонансних частотах, запропоновано удосконалення існуючої методики оцінки стійкості бортового радіоелектронного обладнання літальних апаратів до впливу HIRF в діапазоні частот до 18 ГГц. Враховуючи коефіцієнт екранування на першій резонансній частоті корпусу, в рамках вдосконаленої методики знижується рівень зондувального випромінювання, яке цьому разі впливає безпосередньо на досліджуване радіоелектронне обладнання.

5. Розроблено практичний спосіб оперативного контролю стабільності захисних властивостей металевих екранів технічних засобів від впливу сильних електричних полів та потужних електромагнітних завад, що використовує E -поле на одній з резонансних частот досліджуваного екрана для виявлення факту порушення структурної цілісності екрана. Розроблено рекомендації щодо реалізації запропонованого способу на базі бездротової сенсорної мережі з використанням автономного датчика E -поля, встановлюваного в порожнині екрана на етапі виробництва технічного засобу. Для реалізації запропонованої системи внесення змін у конструкцію технічного засобу не потребується. Активація датчика і передача інформації назовні відбувається за допомогою акустичних хвиль або низькочастотного магнітного поля. Для виключення помилкових спрацьовувань системи, запропоновано опромінення досліджуваного екрана E -полем, модульованою кодовою послідовністю.

6. Подальший розвиток розробленого способу рекомендуються в напрямку реалізації спільної обробки результатів від декількох інтелектуальних датчиків, розташованих в порожнині екрана, що дозволить розширити можливості способу, і зокрема, реалізувати локалізацію структурних неоднорідностей екрана, а також оцінку захисних властивостей екрана під час роботи технічного засобу. Наступні роботи по практичному впровадженню способу рекомендується направити на удосконалення структури автономних інтелектуальних датчиків E -поля, в тому числі підвищення ступеня інтеграції їх компонентів та їх мініатюризацію.

7. Результати роботи впроваджено на ДП „КБ „Південне”, НДПКІ „Молнія” НТУ „ХПІ”, ПрАО „Авіаконтроль”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Скобликов А.Ю. Автоматизация процедуры обработки статистических данных метрологической аттестации средств измерения импульсных электрических процессов / А.Ю. Скобликов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – № 11. – С. 171 – 180.

2. Скобликов А.Ю. Разработка способа физического моделирования беспроводной сенсорной сети / А.Ю. Скобликов, С.Ю. Скобликов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 185 – 193. *Здобувачем розроблено спосіб фізичного моделювання бездротової сенсорної мережі та побудовано макет пристрою, що реалізує розроблений спосіб.*

3. Скобликов А.Ю. Методика оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства / А.Ю. Скобликов // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – № 4. – С. 44 – 48.

4. Скобликов А.Ю. Анализ точности гибридного метода при расчете электрического поля внутри неоднородного электромагнитного экрана / А.Ю. Скобликов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 16. – С. 162 – 172.

5. Скобликов А.Ю. Результаты моделирования процесса проникновения электрического поля внутрь структурно-неоднородного электромагнитного экрана /

А.Ю. Скобликов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПИ». – 2011. – № 4. – С. 66 – 71.

6. Скобликов А.Ю. Альтернативная методика испытаний устойчивости бортового оборудования летательных аппаратов к воздействию высокоинтенсивных радиочастотных полей / В.В. Князев, А.Ю. Скобликов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПИ». – 2011. – № 49. – С. 94 – 102. *Здобувачем запропоновано спрощення стандартної методики оцінки стійкості БРЕО до впливу HIRF.*

7. Скобликов А.Ю. Метод диагностики электромагнитной герметичности электромагнитных экранов / В.В. Князев, А.Ю. Скобликов // Вісник Харківського університету повітряних сил «Системи обробки інформації». – Харків : ХУПС. – 2011. – № 6(96). – С. 123 – 128. *Здобувачем проведено експеримент з дослідження напруженості електромагнітного поля всередині електромагнітного екрана на його резонансних частотах.*

8. Скобликов А.Ю. Методика проверки адекватности математических моделей защитных свойств корпусов электромагнитных экранов / В.В. Князев, А.Ю. Скобликов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 125 – 137. *Здобувачем наведено методичні рекомендації та отримано дані експериментальних досліджень процесу проникнення електромагнітних полів молнії в структурно-неоднорідний макет корпусу РКТ.*

9. Пат. 61344 Україна, МПК G 01 R 31/02. Спосіб діагностики електромагнітної герметичності електромагнітних екранів / В.В. Князев, О.Ю. Скобліков. – № 201103429 заявл. 23.03.2011; опубл. 11.07.2011. Бюл. № 13. *Здобувачем запропоновано виконання діагностики електромагнітної герметичності електромагнітних екранів за електричним полем на їх резонансних частотах; використання акустичних сигналів для активації приймача; кодування часової форми зондувального електромагнітного поля.*

10. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33321. Україна. Комп'ютерна програма інтерактивного аналізу експериментальних даних и генерации отчетов «Метрологическая статистика» / О.Ю. Скобліков (Україна). Дата реєстр. 17.05.2010.

11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33865. Україна. Комп'ютерна програма аналітичного розрахунку впливу структурних неоднородностей електромагнітного екрана на його екранируючі свойства «Screening Orifces Analytics» / О.Ю. Скобліков (Україна), В.В. Князев (Україна). Дата реєстр. 24.06.2010. *Здобувачем розроблено алгоритм роботи та інтерфейс комп'ютерної програми, виконана перевірка її працездатності та підготовка супровідної документації.*

12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 44296. Україна. Комп'ютерна програма «Screening Orifces Analytics v.2 (SOA 2)» / О.Ю. Скобліков (Україна). Дата реєстр. 13.06.2012.

13. Скобликов А.Ю. Воздействие мощных электромагнитных помех на телекоммуникационные системы и методы защиты от них / А.Ю. Скобликов // 14-й Ме-

ждународный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Т. 1. – Харьков : ХНУРЭ. – 2010. – С. 112.

14. Skoblikov O. 3D Numerical Simulation for Solving Problems of Electromagnetic Screening / O. Skoblikov // Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я. Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції / Під ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Т. IV. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2010. – С. 127.

15. Skoblikov O. Software for Processing Metrological Certification Results of Short Impulse Gauges / O. Skoblikov // 5th IEEE International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2010). – Sevastopol. – 2010. – P. 256 – 258.

16. Скобликов А.Ю. Гибридный метод расчета влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства / А.Ю. Скобликов, В.В. Князев // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). – Севастополь : Вебер. – 2010. – С. 918 – 919. *Здобувачем розроблено гібридний метод розрахунку впливу структурних неоднорідностей електромагнітного екрана на його захисні властивості.*

17. Скобліков О.Ю. Вирішення задач електромагнітного екранування числовим методом / В.В. Князев, О.Ю. Скобліков // Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я. Тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції / Під ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – С. 110. *Здобувачем розроблено числові тривимірні моделі структурно-неоднорідних електромагнітних екранів, виконано аналіз захисних властивостей таких екранів.*

18. Skoblikov O. Numerical Simulation and Measurement Results for Shielding Properties of an Aircraft Shell / O. Skoblikov, V. Knyazyev // 9th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology (EMC&EME'2011). – St. Petersburg. – 2011. – P. 147 – 151. *Здобувачем розроблено числові тривимірні моделі структурно-неоднорідних електромагнітних екранів, та виконано порівняння результатів моделювання з експериментом.*

19. Skoblikov O. Electromagnetic Shielding of Impulse Magnetic Fields Using Thin-Walled Shells [Electronic resource] / O. Skoblikov // European COMSOL Conference 2011 (Stuttgart, Germany). – Stuttgart. – 2011.

20. Skoblikov O. Shielding Properties of Conductive Shells Exposed to Electromagnetic Impulse of Lightning [Electronic resource] / O. Skoblikov, V. Knyazyev // International Conference on Lightning Protection (ICLP'2012). – Vienna. – 2012. – P. 1 – 8. *Здобувачем проведено експериментальну перевірку рішень гібридного методу в квазістаціонарному наближенні; виконано експериментальні дослідження структури електромагнітного поля в порожнині екрана в резонансному режимі; запропоновано спосіб діагностики електромагнітної герметичності екранів, та надано рекомендації щодо практичної реалізації цього способу.*

21. Skoblikov O. Simulation Methods for Penetration of Electric Field Inside Structurally Irregular Conductive Screens [Electronic resource] / O. Skoblikov // 6th IEEE International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2012). – Sevastopol. – 2012. – P. 84 – 87.

Скоблiков О.Ю. Визначення захисних властивостей металевих екранiв технiчних засобiв вiд впливу сильних електричних полiв. – На правах рукопису.

Дисертацiя на здобуття наукового ступеня кандидата технiчних наук за спецiальнiстю 05.09.13 – технiка сильних електричних та магнiтних полiв. – Нацiональний технiчний унiверситет «Харкiвський полiтехнiчний iнститут», Харкiв, 2013.

Дисертацiя присвячена розробцi способу контролю стабiльностi захисних властивостей металевих екранiв технiчних засобiв вiд впливу сильних електричних полiв та потужних електромагнiтних завад. Запропоновано математичну модель процесу проникнення електромагнiтних полiв у квазистацiонарному наближеннi в порожнину реальних структурно-неоднорiдних металевих екранiв кiнцевих розмiрiв. Розроблено гiбридний метод моделювання та вiдповiднi комп'ютернi програми, що дозволяють розраховувати тривимiрну структуру iмпульсних електричного та магнiтного полiв в порожнинi таких екранiв. Дослiджено вплив геометричних параметрiв екрану на точнiсть результатiв гiбридної моделi. Експериментально перевiрено рiшення гiбридного методу та методу кiнцевих елементiв в квазистацiонарному режимi, та дослiджено ефект деградацiї захисних властивостей неоднорiдних екранiв у резонансному режимi. Запропоновано вдосконалення стандартної методики визначення стiйкостi бортового обладнання лiтальних апаратiв до впливу електромагнiтних полiв високої iнтенсивностi. Запропоновано новий спiсiб оперативного контролю стабiльностi захисних властивостей металевих екранiв за електричним полем на резонансних частотах корпусу, та надано рекомендацiї щодо практичної реалiзацiї способу.

Ключовi слова: сильне електричне поле, блискавка, HIRF, захист технiчних засобiв, структурно-неоднорiдний електромагнiтний екран, моделювання електромагнiтних процесiв, гiбридний метод, контроль електромагнiтної герметичностi металевих екранiв.

Скоблiков А.Ю. Определение защитных свойств металлических экранов технических средств от воздействия сильных электрических полей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена разработке способа контроля стабильности защитных свойств металлических экранов технических средств от воздействия сильных электрических полей и мощных электромагнитных помех. Известно, что наиболее существенным фактором деградации металлического экрана является нарушение его структурной целостности, то есть гальванического контакта между его элементами. Учитывая этот факт, в работе проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса проникновения электромагнитных

полей молнии, электромагнитного импульса ядерного взрыва, а также радиочастотных полей высокой интенсивности (HIRF) в полость структурно-неоднородных, имеющих отверстия и щели, ферромагнитных металлических экранов в квазистационарном и резонансном режимах.

Предложена математическая модель процесса проникновения электромагнитных полей в квазистационарном приближении в полость реальных структурно-неоднородных металлических экранов конечных размеров при полевом или кондуктивном воздействии мощной электромагнитной помехи. Разработан гибридный метод моделирования структурно-неоднородных металлических экранов, сочетающий в себе гибкость численных и вычислительную эффективность аналитических методов. Созданы соответствующие компьютерные программы, позволяющие выполнять расчет трехмерной пространственной структуры и временной зависимости импульсных электрического и магнитного полей в полости структурно-неоднородных металлических экранов. В отличие от численных методов, например метода конечных элементов, сравнительно невысокие требования к объему вычислительных ресурсов позволяют с помощью гибридного метода эффективно выполнять итеративный расчет сложных моделей при вариации входных параметров. В диссертации исследовано влияние геометрических размеров и формы экрана, его ориентации по отношению к вектору напряженности внешнего электрического поля, а также влияние формы отверстий в его структуре на точность результатов гибридной модели. Преимущества в производительности гибридного метода по сравнению с методом конечных элементов показаны на примере расчета структуры электрического поля внутри трехмерной модели самолета Airbus A320. Данный пример также демонстрирует высокую эффективность гибридного метода при моделировании структурно-неоднородных металлических экранов, имеющих тонкий проводящий слой, расчет которых методом конечных элементов затруднителен или даже невозможен.

С помощью гибридного метода впервые выполнен расчет трехмерной структуры электромагнитного поля в полости структурно-неоднородного металлического корпуса при протекании в нем импульсного тока молнии. Показано, что в таком случае существенным является проникновение в полость экрана только магнитной компоненты электромагнитного поля.

Выполнена экспериментальная проверка адекватности решений гибридного метода путем физического моделирования прямого и близкого ударов молнии в макет объекта ракетно-космической техники. Исследования проведены с использованием высоковольтного испытательного стенда ВВС-1.2, в котором генерировались импульсные электрические поля амплитудой около 300 кВ/м и формой 0,1/10 мс, и магнитные поля амплитудой 380 А/м и формой 2/50 мкс, что соответствует требованиям действующего ГОСТ 30585-98 на испытание стойкости радиоэлектронного оборудования к воздействию грозовых разрядов. В работе исследована и учтена погрешность, возникающая при измерении неоднородного электрического поля емкостным датчиком конечных размеров. Моделирование токовой задачи проводилось при силе тока 3,14 кА. Отклонение результатов гибридного моделирования от экспериментальных значений в ближней зоне неоднородности не превышает 20 %.

Экспериментально исследован эффект деградации защитных свойств неоднородных экранов в резонансном режиме. Предложено усовершенствование стандартной методики определения стойкости бортового оборудования летательных аппаратов к воздействию HIRF.

Предложен новый способ оперативного контроля стабильности защитных свойств металлических экранов по электрическому полю на резонансных частотах корпуса (патент № 201103429). Приведены рекомендации по практической реализации способа на базе беспроводной сенсорной сети. Разработан стенд для физического моделирования и отладки беспроводных сенсорных сетей, на базе которого возможно проведение экспериментальных исследований при дальнейшем усовершенствовании предложенного способа оперативного контроля.

Ключевые слова: сильное электрическое поле, молния, HIRF, защита технических средств, структурно-неоднородный электромагнитный экран, моделирование электромагнитных процессов, гибридный метод, контроль электромагнитной герметичности металлических экранов.

Skoblikov O.Yu. Determining Protective Properties of Metal Screens of Technical Facilities under the Impact of Strong Electric Fields. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical sciences, speciality 05.09.13 – Technics of Strong Electric and Magnetic Fields. – National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute», Kharkiv, 2013.

The thesis describes design of an online method of determining protective properties of metallic screens for technical facilities under the impact of strong electric fields and powerful electromagnetic disturbances. A mathematical model describing the process of quasi-static electromagnetic fields penetration inside really-shaped and structurally inhomogeneous metallic screens of finite size is proposed. A newly designed hybrid method based on the model, together with corresponding software, allows computation of 3D structure of pulsed electric and magnetic fields in the cavities of such screens. Additionally, the impact of screen geometric parameters on the accuracy of results of the hybrid model is investigated. The degradation of protective properties of structurally irregular screens for resonant mode is studied experimentally. An enhancement of standard method for avionics HIRF immunity test is proposed. Finally, the thesis addresses new online control method, designed for stability evaluation of metallic screens protective properties with the help of electric fields on resonant frequencies of the screens. The guidelines for its implementation are given.

Keywords: strong electric field, lightning, HIRF, protection of technical facilities, structurally irregular electromagnetic screen, simulation of electromagnetic processes, hybrid method, monitoring of electromagnetic impermeability of metallic screens.



Підписано до друку 05.06.2013 р. Формат 60х84/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 253

Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФОП Миронов М.В.)
Свідоцтво ВО4 № 022953 від 31.03.1994
61026, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1
