

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет  
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено  
В.о. зав. кафедри \_\_\_\_\_  
Андрій МОВЧАНЮК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-науковою програмою «Інтелектуальні технології  
радіоелектронної техніки»**

**за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» на тему:  
«Ефективність багатопарових електромагнітних екранів»**

Виконав

студент 2 курсу, групи РЕ-11 мн

Терещенко Дмитро Валерійович \_\_\_\_\_

Керівник:

Професор, д.т.н., Зіньковський Юрій Францевич \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор, д.т.н., Васильєв Володимир Миколайович \_\_\_\_\_

підпис

Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

## Зміст

<b>Вступ .....</b>	<b>3</b>
<b>Розділ 1. Електромагнітні екрани як конструктивні елементи РЕС .....</b>	<b>6</b>
1.1 Елементи радіоелектронних засобів за конструктивними ознаками ....	6
1.2 Екранування та електромагнітна сумісність .....	15
<b>Розділ 2. Ефективність та коефіцієнт екранування екрану .....</b>	<b>33</b>
2.1 Оцінка ефективності процесу екранування.....	33
2.2 Магнітні та немагнітні екрани .....	48
<b>Розділ 3. Ефективність та характеристики багатошарових екранів.....</b>	<b>59</b>
3.1 Ефективність екранування з використанням спеціальних матеріалів ...	59
3.2 Технології виробництва багатошарових електромагнітних екранів .....	67
<b>Розділ 4. Використання електромагнітних екранів .....</b>	<b>73</b>
4.1 Вимірювання параметрів екрану в камері електромагнітної сумісності	73
4.2 Аналіз отриманих результатів .....	88
<b>Висновки .....</b>	<b>97</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>98</b>

## Вступ

У сучасному світі радіоелектронні засоби та електронні пристрої відіграють надзвичайно важливу роль і різних сферах нашого життя, починаючи від комунікацій та транспорту, і закінчуючи медичною діагностикою та промисловим виробництвом. Однак, разом із зростанням функціональності та складності цих пристроїв, постійно зростають і вимоги до їх надійності та безпеки експлуатації.

З ростом кількості електроприладів, зв'язувалось, що електроприлади можуть заважати один одному. Нормальній роботі приладів можуть заважати електричні та магнітні поля, але у природі, майже завжди, вони існують разом, тому й екранування зазвичай від електромагнітного поля. Для методичного вивчення їх розділено окремо. Для екранування електричного поля використовується матеріал із високою провідністю, а для магнітного – матеріали із високою магнітною проникністю. Тому вирішення проблеми захисту електронних пристроїв від впливів магнітного поля стає дедалі важливим завданням.

У даній магістерській роботі досліджується ефективність та ролі багат шарових електромагнітних екранів як одного з найефективніших способів захисту електронних пристроїв від впливу магнітного поля. Екранування є комплексним підходом, що базується на використанні матеріалів та конструкцій, які здатні ефективно блокувати та розсіювати електромагнітні хвилі, запобігаючи їх проникненню до внутрішніх елементів пристроїв.

Актуальність теми обумовлена зростанням кількості електроприладів та щільності їх розташування у побуті чи на виробництві, що збільшує важливість відокремлення приладів одне від одного, оскільки при роботі вони можуть випромінювати електромагнітне поле, яке буде заважати приладам поруч. Для забезпечення стабільної роботи приладів необхідно використовувати екрани, оскільки, особливо на виробництвах, приділяється недостатньо уваги захисту електронних пристроїв від впливів магнітного поля, що може значно зменшити строк експлуатації обладнання.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності багат шарових електромагнітних екранів, їх впливу на зниження рівня електромагнітних перешкод, покращення електромагнітної сумісності пристроїв та пошук можливостей збільшити області використання електромагнітних екранів. Робота розглядає різні аспекти екранування, включаючи вибір оптимальних матеріалів, конструкційних параметрів та технологій виготовлення багат шарових екранів.

Об'єкт дослідження – є електричні, магнітні та електромагнітні багат шарові екрани, їх характеристики та властивості структури, вплив на електричні та магнітні характеристики, а також ефективності екранування та забезпечення електромагнітної сумісності в радіоелектронних засобах.

Дослідження також включає в себе вивчення оптимальної структури, конструкції та параметрів багат шарових екранів, які забезпечують найкращу ефективність екранування і знижують небажане випромінювання електромагнітних сигналів з пристроїв. Для досягнення оптимальних екранувальних характеристик включає аналіз взаємодії між шарами екранів, властивостями матеріалів та методами їхнього виготовлення.

Предмет дослідження – особливості проектування електричних, магнітних та електромагнітних багат шарових екранів, методи та технології їх виготовлення та використання в різних пристроях та системах, а також можливість оптимізації їхньої ефективності.

Методи дослідження ефективності багат шарових електромагнітних екранів включають наступні підходи:

- аналіз наукових джерел, публікацій, статей та інших джерел інформації, для систематизації та узагальнення знань про об'єкт дослідження та тенденцій його розвитку;
- математичний аналіз теоретичних моделей, розрахунки та виведення аналітичних виразів для оцінки ефективності екранування;
- тестування різних екранів та їх комбінацій на лабораторному стенді, аналіз наявних екранів у вже готових виробів з можливою модифікацією;
- порівняння, виокремлення найоптимальнішого та найефективнішого методу, перевірка їх ефективності за допомогою комп'ютерного моделювання та виготовлення на макетах;
- проведення експериментів для вимірювання електромагнітних властивостей та оцінки ефективності екранування,
- комп'ютерне моделювання для симуляції електромагнітних полів та їх взаємодії з багат шаровими екранами, передбачає використання програм Matcad для розрахунків та для побудови графіків, Solidworks – для моделювання екранів та подальшої симуляції за допомогою розширення Comsol Multiphysics, вирішення задач, які потребують обладнання, яке не наявне у лабораторії;
- емпіричні дослідження, які включають збір експериментальних даних з реальних пристроїв, що використовують

багатошарові електромагнітні екрани, та їх аналіз для встановлення взаємозв'язку між конструкцією екранів та їх ефективністю;

– синтез, розроблення нових або оптимізація існуючих багатошарових екранів на основі здобутих знань і даних.

Ці методи дослідження використовуються для отримання глибокого розуміння ефективності багатошарових електромагнітних екранів, встановлення взаємозв'язку між їх конструкцією та ефективністю, а також для розробки нових та вдосконалення існуючих екранів. Комбінація цих методів дозволяє отримати більш повне та точне розуміння проблеми екранування та розробити ефективніші рішення для радіоелектронних засобів.

Отже, в даній магістерській роботі досліджується важливість захисту електроприладів від впливів магнітного поля та роль екранування як ефективного способу вирішення цієї проблеми. Розуміння і вивчення механізмів екранування та його впливу на функціонування електронних пристроїв є важливим кроком у поліпшенні якості та надійності сучасних технологічних рішень.

Екранування дозволяє ефективно зменшити вплив магнітного поля на пристрої, запобігаючи електромагнітним перешкодам та забезпечуючи нормальну роботу електроніки. Воно є важливим фактором для забезпечення електромагнітної сумісності та безперебійної роботи різноманітних пристроїв в умовах зростаючого електромагнітного шуму.

У цьому контексті, дана магістерська робота ставить перед собою завдання дослідити ефективність багатошарових електромагнітних екранів та їхній вплив на зниження рівня електромагнітних перешкод та поліпшення електромагнітної сумісності. Результати цього дослідження можуть мати важливу практичну цінність і допомогти в розробці нових технологій та підходів для захисту електронних пристроїв від негативного впливу магнітного поля.

Далі будуть розглянуті різні аспекти екранування, включаючи вибір оптимальних матеріалів, конструкційних параметрів та технологій виробництва багатошарових екранів. Вивчення та аналіз цих аспектів є важливим для розуміння принципів ефективного захисту електронних пристроїв та подальшого розвитку сучасних технологій у сфері радіоелектроніки.

## **Розділ 1. Електромагнітні екрани як конструктивні елементи РЕС**

### **1.1 Елементи радіоелектронних засобів за конструктивними ознаками**

Радіоелектроніка є важливою галуззю сучасної технології, яка забезпечує розвиток і функціонування різних пристроїв, систем зв'язку, медичних і наукових приладів та багато інших. Ключовою складовою радіоелектронних засобів є елементи, що використовуються в їхній конструкції. Вони визначають функціональність, надійність та продуктивність таких пристроїв.

Елементи радіоелектронних засобів є складовими частинами електронних пристроїв, що забезпечують їхню функціональність. Вони можуть бути різних типів і матеріалів, залежно від призначення і характеристик пристрою. Основні конструктивні ознаки елементів радіоелектронних засобів включають форму, розміри, матеріали, технології виготовлення та електричні параметри. До найпоширеніших елементів радіоелектронних засобів відносяться резистори, конденсатори, котушки індуктивності, діоди, транзистори, мікросхеми та інші. У цьому підрозділі будуть розглянуті основні елементи радіоелектронних засобів.

Радіоелектронні засоби – це електронні пристрої та системи, призначені для збору, передачі, прийому, обробки, зберігання, відтворення та передачі різноманітних сигналів, у тому числі радіохвиль, світлових, звукових та інших.

Найбільш відомим науковцем, який запропонував класифікацію елементів радіоелектронних засобів за конструктивними ознаками, є Анатолій Іванович Ліндерман, відомий український радіоінженер та викладач.

Згідно з класифікацією Ліндермана, елементи радіоелектронних засобів можна розподілити на три основні категорії:

1. Пасивні елементи – це елементи, які не мають активного джерела енергії, а лише перетворюють сигнали, що проходять через них. До пасивних елементів відносяться резистори, конденсатори, котушки і трансформатори.

2. Активні елементи – це елементи, які мають в собі активне джерело енергії, що дозволяє їм підсилювати, змінювати або генерувати сигнали. До активних елементів відносяться лампи, транзистори, інтегральні мікросхеми тощо.

3. Прилади – це елементи, які мають в собі один або кілька пасивних і/або активних елементів та використовуються для вимірювання параметрів сигналу. До приладів відносяться осцилографи, вольтметри, амперметри, генератори сигналів тощо.

Ця класифікація дозволяє краще розуміти природу та властивості елементів радіоелектронних засобів, а також використовується для вибору відповідних компонентів при проектуванні та розробці електронних пристроїв.

Крім Ліндермана, існує декілька відомих вчених та дослідників, які розробляли класифікації елементів радіоелектронних засобів.

Харксміт та Сміт (Harkness and Smith) є відомими дослідниками, які розробили класифікацію елементів згідно з їхніми електричними властивостями, включаючи провідники, діелектрики та напівпровідники. У їхній класифікації враховано різні типи матеріалів, що використовуються в радіоелектронних засобах.

Однією з головних категорій є провідники. Провідники є матеріалами, які мають високу провідність електричного струму. До цієї категорії можуть відноситися метали, які є відмінними провідниками, наприклад, мідь, алюміній, золото тощо.

Другою категорією є діелектрики, які характеризуються високою електричною ізоляцією. Це матеріали, які практично не проводять електричний струм. До діелектриків можуть належати пластик, скло, кераміка та інші матеріали з високою діелектричною проникністю.

Третьою категорією є напівпровідники, які мають проміжну провідність між провідниками та діелектриками. Напівпровідники, такі як кремній, германій та інші матеріали, мають здатність до керування електричним струмом шляхом додаткової домішки або зміни температури.

Ця класифікація відображає основні типи матеріалів, які використовуються в радіоелектронних засобах і враховує їхні електричні властивості. Вона є важливою для розуміння та аналізу функціонування радіоелектронних пристроїв та систем.

Класифікацію елементів радіоелектронних засобів залежно від їхньої функції, такої як комутація, підсилення, фільтрація представив Арчер (Archer). У цій класифікації елементи групуються відповідно до різних функціональних ролей, які вони виконують у системі.

Однією з основних категорій є елементи для комутації. Ці елементи відповідають за перемикання сигналів в системі, забезпечуючи правильну маршрутизацію сигналів між різними вузлами.

Іншою важливою категорією є елементи для підсилення сигналів. Ці елементи використовуються для посилення слабких сигналів, що дозволяє їм

подолати втрати сигналу під час передачі та забезпечує достатню потужність для подальшої обробки чи передачі.

Класифікація також включає елементи для фільтрації. Ці елементи використовуються для відсівання небажаних частот з сигналу, що дозволяє забезпечити потрібну чистоту сигналу та позбавитися від інтерференції.

Ця класифікація допомагає у розумінні ролі різних елементів в радіоелектронних засобах і сприяє систематизації їхнього використання у різних додатках та пристроях

Вчений Розен (Rosen) розробив класифікацію елементів радіоелектронних засобів, яка базується на їхньому розташуванні та фізичних властивостях. Ця класифікація враховує такі параметри, як розмір, форма та матеріал, з якого виготовлені елементи.

За допомогою класифікації Розена можна відокремити елементи за їхнім розташуванням у пристрої або системі. Наприклад, елементи можуть бути класифіковані як зовнішні (знаходяться поза корпусом пристрою), внутрішні (розташовані всередині корпусу) або поверхневі (розташовані на поверхні пристрою).

Також, згідно з класифікацією Розена, елементи можуть бути відокремлені за їхніми фізичними властивостями, такими як розмір, форма та матеріал. Наприклад, елементи можуть бути класифіковані за розміром на мікроелементи, мініатюрні елементи, середні елементи та великі елементи. Щодо форми, елементи можуть бути класифіковані як прямокутні, круглі, кристалічні тощо. Класифікація також враховує матеріал, з якого виготовлені елементи, наприклад, метал, пластик, кераміка тощо.

Ця класифікація Розена допомагає у систематизації елементів радіоелектронних засобів залежно від їхнього розташування та фізичних характеристик. Вона є корисним інструментом для організації та розуміння різних типів елементів в радіоелектронних пристроях та системах.

Вчений Девід Дж. Лейсі, розробив класифікацію елементів радіоелектронних засобів, яка базується на їхньому використанні та призначенні, включаючи генератори, підсилювачі, модулятори та інші. Ця класифікація дозволяє групувати елементи залежно від їх ролі в системі та функціонального призначення.

За допомогою класифікації Лейсі можна виділити різні категорії елементів засновано на їх ролі у роботі пристрою або системи. Наприклад, елементи можуть бути класифіковані як генератори (елементи, які генерують



сигнали або хвилі), підсилювачі (елементи, які підсилюють сигнали), модулятори (елементи, які змінюють властивості сигналу) та інші.

Ця класифікація допомагає організувати та розуміти різні типи елементів радіоелектронних засобів залежно від їхньої функції та ролі у системі. Вона є важливим інструментом для проектування та розробки радіоелектронних пристроїв та систем, дозволяючи виокремити і розрізнити елементи за їхнім призначенням.

Кожна з цих класифікацій має свої переваги та використовується відповідно до конкретних потреб та контексту дослідження.

Класифікацію елементів радіоелектронних засобів за конструктивними ознаками запропонував американський вчений Роберт Богер у своїй роботі "Elements of Radio Engineering". У цій класифікації елементи радіоелектронних засобів розділяються залежно від їхньої фізичної структури, конструкції та механізму роботи. Вона надає систематичний підхід до класифікації різних компонентів, таких як резистори, конденсатори, індуктивності, транзистори тощо, залежно від їхнього фізичного вигляду та основних принципів функціонування.

В класифікації "Елементи радіоелектронних засобів" Роберта Богера, елементи розподіляються на наступні категорії:

**Активні елементи:** ця категорія включає елементи, які здатні виробляти або контролювати сигнали. Приклади таких елементів: транзистори, польові ефектні транзистори (FET), операційні підсилювачі тощо.

**Пасивні елементи:** ця категорія охоплює елементи, які не мають здатності підсилювати сигнали, але виконують інші функції, такі як фільтрація, збереження енергії тощо. Сюди входять резистори, конденсатори, індуктивності, діоди, трансформатори тощо.

**Гібридні елементи:** це елементи, що поєднують в собі як активні, так і пасивні властивості. Наприклад, інтегральні мікросхеми, в яких присутні активні елементи (транзистори) та пасивні компоненти (резистори, конденсатори тощо).

**Інші елементи:** ця категорія включає елементи, які не підпадають під попередні категорії або мають специфічні функції. Сюди можуть входити, наприклад, кварцеві резонатори, антени, елементи регулювання потоку тощо.

Використання такої класифікації допомагає систематизувати та розуміти різноманітні елементи, які використовуються в радіоелектроніці.[1]

В класифікації Роберта Богера екранування може бути віднесене до пасивних елементів. Екранування використовується для забезпечення захисту від небажаних електромагнітних сигналів або зовнішніх впливів, що можуть спотворити роботу радіоелектронного пристрою. Часто для екранування використовуються спеціальні матеріали, які мають високу провідність і здатні відбивати електромагнітні хвилі. Такі матеріали встановлюються навколо елементів, що потребують захисту, утворюючи екран або екрануючий контур. Екранування є важливою складовою частиною електронних пристроїв, особливо в умовах збільшеного електромагнітного шуму та перешкод.

Класифікація елементів радіоелектронних засобів є важливою задачею, яка допомагає упорядкувати та систематизувати різні компоненти та модулі, що використовуються у цих засобах. Вона дозволяє встановити спільні ознаки та критерії класифікації, що спрощує аналіз, проектування та розробку нових радіоелектронних пристроїв.

Проте, окрім конструктивних ознак та функцій, дослідження у галузі радіоелектронних засобів також активно зосереджуються на проблемах екранування та електромагнітної сумісності. Ці аспекти стають все більш важливими, оскільки в сучасному технологічному середовищі дедалі більше пристроїв працюють у високочастотному діапазоні, а їхнє правильне функціонування може бути під загрозою внаслідок взаємодії з електромагнітними полями.

Дослідження у галузі екранування та електромагнітної сумісності спрямовані на розробку методів та технологій, що дозволяють забезпечити ефективне екранування елементів радіоелектронних засобів, запобігають непотрібному випромінюванню електромагнітних сигналів та забезпечують їхню взаємну сумісність. Для цього використовуються різноманітні матеріали, конструкції та технології, які дозволяють ефективно захистити елементи від зовнішніх електромагнітних полів та мінімізувати спотворення сигналів у внутрішніх комунікаційних шляхах.

Вчені, які займалися дослідженням елементів радіоелектронних засобів за конструктивними ознаками та враховували проблеми екранування та електромагнітної сумісності, включають в себе таких науковців, як Кларенс Воррен (Clarence W. de Silva), Гленн Лайнг (Glenn R. Lax), Джеймс Дрейк (James C. Drake), Фредерік Емметт Терман (Frederick E. Terman), Роджер Ф. Хартл (Roger F. Hartley) та інші. Вони проводили дослідження з метою забезпечення якості та ефективності елементів радіоелектронних засобів, що є важливим у виробництві та експлуатації радіоелектронних пристроїв та систем.

Кларенс Воррен (Clarence W. de Silva) є видатним канадським вченим, який присвятив свою наукову діяльність дослідженню елементів радіоелектронних засобів та їх конструктивних ознак. Він спеціалізується на проблемах екранування та електромагнітної сумісності, зокрема в контексті електроніки із сумісними системами.

Професор Воррен зробив значний внесок у розуміння та розвиток методів екранування, які дозволяють захистити електронні пристрої від шумів, електромагнітних перешкод та зовнішніх впливів. Його дослідження охоплюють різні аспекти екранування, включаючи аналіз матеріалів, структурних рішень та електричних властивостей, які впливають на ефективність захисту від електромагнітних полів.

Крім того, займається вивченням проблем електромагнітної сумісності, яка включає у себе розуміння взаємовпливу електронних пристроїв із сумісними системами. Він розробляє методи та стратегії для забезпечення високої електромагнітної сумісності в різних електронних пристроях, що забезпечує їх нормальну роботу без негативних впливів на оточуючі системи.

Гленн Лайнг (Glenn R. Lax) є відомим американським вченим, який зробив значний внесок у галузі електромагнітної сумісності та екранування. Він спеціалізується на дослідженнях, спрямованих на розробку методів покращення ефективності екранування та зменшення негативного впливу електромагнітних полів на елементи радіоелектронних засобів.

Вчений проводив дослідження, щоб зрозуміти фізичні властивості матеріалів, які використовуються для екранування, та їх вплив на ефективність захисту від електромагнітних перешкод. Він розробляв нові методи та стратегії екранування, зокрема використання спеціальних матеріалів, структур та конструкцій, що забезпечують надійний захист електронних пристроїв від електромагнітного шуму та перешкод.[2]

Крім того, зосереджувався на розробці методів та стандартів електромагнітної сумісності, які забезпечують взаємовплив електронних систем без негативних наслідків. Він вивчав вплив електромагнітних полів на роботу різних типів електронних пристроїв та розробляв рекомендації щодо їх проектування та розміщення з метою мінімізації перешкод та забезпечення стабільної роботи.

Дослідження Гленна Лайнга в сфері екранування та електромагнітної сумісності мають велике значення для розробки інноваційних рішень у сфері радіоелектроніки та забезпечення безперебійної роботи електронних систем у сучасному електромагнітному середовищі.

Джеймс Дрейк (James C. Drake) є відомим американським вченим, який присвятив свою наукову кар'єру дослідженню проблем екранування та електромагнітної сумісності в радіоелектронних засобах. Його роботи охоплюють різні аспекти екранування, включаючи конструкційні рішення та використання спеціальних матеріалів, що забезпечують ефективний захист від електромагнітних перешкод.

Дослідження зосереджені на розумінні впливу електромагнітного шуму та перешкод на електронні пристрої та системи. Він досліджує електромагнітні поля, що генеруються елементами радіоелектронних засобів, і розробляє стратегії їх екранування для забезпечення надійної роботи пристроїв у забруднених електромагнітних середовищах.

Джеймс Дрейк також звертає увагу на використання спеціальних матеріалів, які мають високу електромагнітну сумісність, тобто здатність працювати в електромагнітно сумісних системах без взаємних перешкод. Він досліджує різні матеріали, їхні властивості та застосування для екранування електронних пристроїв і систем.

Наукові роботи вченого мають велике значення для розробки та вдосконалення екранувальних технологій, що допомагають забезпечувати надійну роботу радіоелектронних засобів в умовах електромагнітного середовища з високим рівнем перешкод та шуму.

Фредерік Емметт Терман (Frederick E. Terman) був видатним американським вченим і педагогом, який вніс вагомий внесок у галузь радіоелектроніки. Він відомий своїми дослідженнями та викладацькою діяльністю в Стенфордському університеті, де він створив впливову школу радіоелектроніки і сприяв розвитку цієї галузі національного рівня.

Роботи науковця охоплюють різні аспекти радіоелектронних засобів, зокрема вони стосуються проектування та конструкції електронних пристроїв, включаючи елементи радіоелектронних засобів. Він був одним з піонерів в галузі радіоелектроніки і вніс вагомий внесок у розвиток транзисторної технології, що стала основою сучасної електроніки.

Він вивчав методи та технології екранування, що дозволяють зменшити вплив електромагнітних полів на елементи радіоелектронних засобів і підвищити їх надійність та ефективність.

Фредерік Терман відіграв важливу роль у розвитку електронної промисловості в Сполучених Штатах Америки, сприяючи співпраці між університетами, науковими закладами та промисловими компаніями. Його

внесок в галузь радіоелектроніки визнаний як значний, і він вважається одним із засновників сучасної електроніки.

Серед українських науковців, які займалися дослідженням елементів радіоелектронних засобів за конструктивними ознаками та проблемами екранування та електромагнітної сумісності, можна виділити наступних:

1. Зіньковський Юрій Францевич – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України. Працював в КПІ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", кафедра радіоконструювання та виробництва радіоелектронної апаратури РТФ.

2. Володимир Синюк - доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України. Він працював в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу та займався дослідженням елементів радіоелектронних засобів з використанням методів екранування та електромагнітних екранів.

Дослідження сприяли покращенню якості та надійності радіоелектронних засобів, зокрема шляхом впровадження ефективних методів екранування та застосування електромагнітних екранів. Його роботи отримали визнання як в Україні, так і за її межами, сприяючи подальшому розвитку радіоелектронної індустрії та впровадженню нових технологій в цій галузі.

3. Ігор Марущак - кандидат технічних наук, доцент. Він працює в Національному університеті "Львівська політехніка" та займається дослідженням елементів радіоелектронних засобів з використанням методів екранування та електромагнітних екранів.

У своїй науковій роботі зосереджується на вивченні проблем екранування та застосуванні електромагнітних екранів для забезпечення електромагнітної сумісності та зниження електромагнітних перешкод в радіоелектронних засобах. Він досліджує різні аспекти екранування, включаючи оптимальний вибір матеріалів, конструкційні рішення та методи зменшення негативного впливу електромагнітних полів.

4. Віталій Шаповал - кандидат технічних наук, доцент. Він працює в Харківському національному університеті радіоелектроніки та займається дослідженням елементів радіоелектронних засобів з використанням методів екранування та електромагнітних екранів. Його роботи спрямовані на вирішення актуальних проблем електромагнітних перешкод і сприяють впровадженню ефективних технологій у розробці та виробництві радіоелектронних засобів.

Українські вчені також внесли свій внесок у дослідження класифікації елементів радіоелектронних засобів. Один з прикладів українського вченого, який вивчав цю проблематику, є Юрій Францевич Зіньковський. Він активно досліджував екранування та електромагнітну сумісність, а також розробляв методи класифікації елементів радіоелектронних засобів за їх конструктивними ознаками. Його наукові дослідження спрямовані на вдосконалення методів екранування та покращення ефективності радіоелектронних систем.

Отже, багато вчених, як зарубіжних, так і українських, зосереджували свої дослідження на екрануванні та електромагнітній сумісності елементів радіоелектронних засобів. Це обумовлено важливістю цих аспектів для забезпечення надійності, ефективності та безпеки пристроїв. Дослідники працюють над зменшенням втрат сигналу та мінімізації негативного впливу електромагнітних полів, оскільки зростаюча складність технологій та електронних пристроїв призводить до збільшення електромагнітних перешкод та інтерференції між різними компонентами та системами.

. Недостатній рівень екранування та несумісність з електромагнітними стандартами можуть призводити до спотворень сигналу, перешкод, шуму та збоїв в роботі пристроїв. Зростання використання бездротових технологій та мереж збільшує взаємодію радіоелектронних пристроїв між собою. Відсутність належного екранування та електромагнітної сумісності може призводити до перешкод та втрати якості сигналу в мережах, а також порушення приватності та безпеки даних. Врахування цих аспектів є необхідним для забезпечення стійкості та безпеки радіоелектронних систем.

Отже, приділення більшої уваги екрануванню та електромагнітній сумісності є важливим для досягнення оптимальної продуктивності, надійності та безпеки радіоелектронних засобів у сучасному технологічному середовищі та запобігають непотрібному випромінюванню електромагнітних сигналів з пристроїв.

## 1.2 Екранування та електромагнітна сумісність

Враховуючи розвиток радіоелектронної техніки та появу нових високочастотних пристроїв, дослідження з екранування та електромагнітної сумісності стають необхідними для забезпечення оптимальної продуктивності, надійності та безпеки радіоелектронних засобів у сучасному технологічному середовищі.

Дослідження екранування та електромагнітної сумісності в Україні розпочалися ще у радянські часи і були пов'язані з розвитком радіоелектронної промисловості. Українські вчені активно досліджували проблеми екранування та електромагнітної сумісності в електроніці, телекомунікаціях, авіації та інших галузях.

У 1963 році була створена в Україні перша спеціалізована лабораторія з екранування та електромагнітної сумісності в Інституті радіотехніки та електроніки НАН України. У подальшому, засновані в Україні науково-дослідні інститути та лабораторії продовжували проводити дослідження в цій області.

З розвитком радіоелектронної техніки та появою нових високочастотних пристроїв зростає потреба у дослідженнях з екранування та електромагнітної сумісності. Це пояснюється тим, що високочастотні пристрої можуть бути чутливими до електромагнітних перешкод, які можуть вплинути на їхню продуктивність, надійність та безпеку.

Екранування використовується для захисту радіоелектронних елементів від зовнішніх електромагнітних полів, запобігаючи їхньому впливу на пристрої. Це дозволяє забезпечити нормальну роботу пристроїв та уникнути спотворень сигналів. Крім того, екранування допомагає запобігти непотрібному випромінюванню електромагнітних сигналів з пристроїв, що може негативно вплинути на інші електронні пристрої або створити електромагнітні перешкоди.

Електромагнітна сумісність, у свою чергу, займається взаємодією різних пристроїв та систем у електромагнітному спектрі. Дослідження в цій області спрямовані на забезпечення взаємної сумісності пристроїв, що дозволяє їм працювати разом без спотворень сигналів або взаємних перешкод.

Дослідження з екранування та електромагнітної сумісності є необхідними для досягнення оптимальної продуктивності, надійності та безпеки радіоелектронних засобів у сучасному технологічному середовищі. Вони дозволяють уникнути негативного впливу електромагнітних полів на пристрої, забезпечують ефективний захист від електромагнітних перешкод та

сприяють безперебійній роботі електронних систем. Тому велика увага приділяється цим аспектам в дослідженнях українських вчених та дослідників радіоелектронних засобів.[3]

Українські вчені розробляли нові методики екранування, вивчали вплив електромагнітних полів на елементи радіоелектронних засобів та розробляли заходи для забезпечення електромагнітної сумісності. Вони також внесли вагомий внесок у вивчення взаємодії електромагнітних полів з матеріалами та розробку нових матеріалів для екранування.

Наукові дослідження українських вчених у сфері екранування та електромагнітної сумісності мають важливе значення для розвитку сучасних технологій, забезпечення надійності та безпеки електронних систем та пристроїв.

Зокрема, у роботі "Електромагнітне екранування елементів радіоелектронних засобів" Володимир Синюк досліджував ефективність електромагнітних екранів для захисту від небажаного впливу електромагнітних полів на елементи радіоелектронних засобів. Він також розробив методику розрахунку параметрів електромагнітних екранів та запропонував нові конструкції екранів з використанням спеціальних матеріалів.

Науковець Володимир Синюк, як відомий український вчений в галузі радіоелектроніки, він займався дослідженням різних видів антен та методів підвищення ефективності їх роботи, що пов'язано зі створенням та використанням електромагнітних полів.

Наукове дослідження Ігоря Марущака "Особливості використання екранування для зниження електромагнітної сумісності електронних пристроїв" було присвячене питанням екранування та його використання для зниження електромагнітної сумісності електронних пристроїв. Дослідження було проведено в рамках науково-дослідного інституту радіотехніки та електроніки при Національному університеті "Львівська політехніка". У своїх роботах Марущак активно використовує методи екранування та електромагнітних екранів для покращення електромагнітної сумісності електронних засобів.

Віталій Шаповал - український науковець, який працює в галузі радіоелектроніки та телекомунікацій. Він проводив дослідження елементів радіоелектронних засобів з використанням методів екранування та електромагнітних екранів. Він є автором багатьох наукових праць на цю тему, включаючи такі статті, як "Електромагнітні екрани: принципи побудови та



застосування" та "Електромагнітні поля в екранованих просторах". У своїх дослідженнях він досліджував вплив екранування на електромагнітні поля та розробляв нові методи та технології для побудови більш ефективних електромагнітних екранів.

Віталій Шаповал каже, що екранування - це застосування матеріалів з високим коефіцієнтом відбивання електромагнітних хвиль для зменшення електромагнітних випромінювань або забезпечення захисту від зовнішніх електромагнітних впливів. Електромагнітний екран - це елемент конструкції радіоелектронних засобів, який захищає елементи засобу від електромагнітного випромінювання, а також зменшує електромагнітні перешкоди, що викликаються взаємодією з іншими радіоелектронними засобами.

Наукове визначення екранування від Ігоря Марущака може залежати від контексту, але загально визнаним є визначення екранування як процесу, що полягає у створенні електричного або магнітного поля, яке перешкоджає поширенню електромагнітних хвиль за межі екрану. Це може бути досягнуто за допомогою матеріалів, які володіють високою провідністю, таких як метали, або матеріалів, які мають високу діелектричну проникність, таких як кераміка або скло. Відповідно, екранування може бути використано для захисту електронних пристроїв від зовнішніх електромагнітних сигналів або для запобігання випромінюванню електромагнітних хвиль від електронних пристроїв у навколишнє середовище.

Екранування в радіоелектроніці - це процес захисту від електромагнітного впливу на пристрій або електронний компонент шляхом обмеження взаємодії між ним та зовнішнім електромагнітним полем. Екрани можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як метал, карбонові матеріали, фольга, провідники та інші, і вони можуть мати різні конструктивні форми, залежно від потреб захисту.

Юрій Францевич Зіньковський визначив екранування в радіоелектроніці як захист від електромагнітного випромінювання, що може викликати перешкоди в роботі електронних засобів. Екранування полягає в обмеженні рівня електричних і магнітних полів в окремих ділянках електронних пристроїв або систем за допомогою екранів. Екрани можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як метал, фольга або спеціальні матеріали з провідними властивостями.

Екранування в радіоелектроніці визначають різні науковці, проте загальна суть визначення полягає в тому, що екранування є процесом

зменшення чи блокування електричних чи магнітних полів від одного об'єкта до іншого.

Наприклад, Зіньковський Юрій Францевич визначає екранування як процес захисту від небажаних електричних чи магнітних полів, що можуть викликати перешкоди в роботі електронних пристроїв.

Ігор Марущак визначає екранування як технічний захід, який забезпечує захист від електричного або магнітного впливу, що може виникнути від зовнішнього середовища або внутрішніх джерел.

Віталій Шаповал визначає екранування як забезпечення електричної та магнітної сумісності техніки та обладнання шляхом запобігання несанкціонованого випромінювання та прийому електромагнітних випромінювань від зовнішніх джерел.

Отже, визначення екранування може залежати від контексту дослідження та підходу науковців, тобто беремо за основу, що екранування в електроніці - це процес використання екранів або оболонок з провідного матеріалу для захисту електронних компонентів, пристроїв або систем від зовнішніх електромагнітних полів. Екранування має на меті запобігти витоку або проникненню небажаних електромагнітних сигналів до пристроїв, а також запобігти зовнішнім електромагнітним перешкодам, які можуть впливати на нормальну роботу електронних компонентів.

Екрани можуть бути виготовлені з провідних матеріалів, таких як метали або провідні полімери. Вони накривають або оточують вразливі електронні компоненти, створюючи бар'єр, який блокує електромагнітні поля. Екрани можуть мати різну форму та розмір, від металевих корпусів до спеціальних пластин або оболонок, що прикріплюються до пристроїв.[4]

Ефективність екранування залежить від властивостей матеріалу, геометрії екрану, якості заземлення та інших факторів. Правильне застосування екранування може забезпечити зниження електромагнітних перешкод, захист від несанкціонованого доступу до електронних сигналів, а також покращення електромагнітної сумісності між різними пристроями та системами.

Зіньковський Ю. Ф. відомий як вітчизняний науковець в галузі електродинаміки та радіоелектроніки, говорив, що найпростіше джерело електромагнітного поля - це елементарний вібратор. Елементарний вібратор – це система з електричного заряду, який змінює свою швидкість руху відносно початкової точки, створюючи тим самим змінну електричну струм зі змінною напругою, який і є джерелом електромагнітного поля. За допомогою таких

вібраторів можна створювати електромагнітні хвилі різних частот, що знаходять широке застосування в радіозв'язку та інших галузях техніки

Найпростіше джерело електричного поля – елементарний вібратор (рис 1.1). Провідник, довжина якого набагато менша довжини електромагнітної хвилі, випромінюваної вібратором. Струм у вібраторі незмінний по всій його довжині кожної миті.

Елементарний вібратор є важливим поняттям в радіоелектроніці, яке використовується для опису електромагнітних хвиль. Його можна уявити як точкове джерело, яке випромінює електромагнітні хвилі в усіх напрямках.

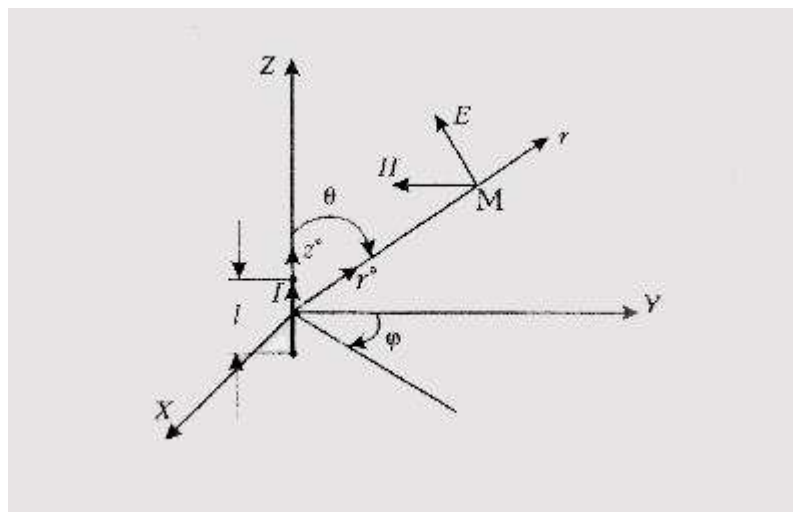


Рисунок 1.1 – елементарний вібратор

У сферичній системі координат  $E_\phi = H_r = H_\theta = 0$  і значимими складовими поля є напруженості  $E_r$ ,  $E_\theta$ ,  $H_\phi$ . Для прямокутної системи координат вектори  $E$  і  $H$  дорівнюють:

$$\begin{cases} E = \frac{k^2}{4\pi\epsilon_a} \left[ \frac{x}{k^2 r^2} - \frac{jx}{kr} - \xi \right] \frac{e^{jkr}}{r}, \\ H = \frac{\omega k}{4\pi} \left( 1 - \frac{j}{kr} \right) r^0 p_0 \frac{e^{-jkr}}{r}. \end{cases} \quad (1.1)$$

Тут  $k = 2\pi/\lambda$  – стала розповсюдження;  $\epsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність;  $x = 3(p_0 r^0) r^0 - p_0$ ;  $r^0$  – орт напрямку спостереження хвилі;  $\epsilon = r^0(r^0 p_0)$ .

Вектор  $E$  лежить у площині векторів  $p_0$  і  $r^0$ , тобто в площині, яка проходить через вісь вібратора і точку спостереження. Вектор  $H$

перпендикулярний до площини, яка проходить через вісь вібратора і точку М, вектори Е і Н взаємно перпендикулярні.[5]

Вираз для визначення Е можна розчленити на три складових, які зменшуються з відстанню як  $1/r$ ,  $1/R^2$  і  $1/r^3$ / Вираз для Н розбивається на дві складові, які зменшуються з відстанню як  $1/r$  і  $1/r^2$ . Це дає можливість за критеріями інженерної практики умовно виділити навколо джерела поля три області (зони) – ближню, проміжну і дальню.

В ближній зоні  $r \ll \lambda/2\pi$ , тобто  $kr \ll 1$ , в проміжній  $r \approx \lambda/2\pi$  ( $kr = 1$ ), в дальній зоні  $r \gg \lambda/2\pi$  ( $kr \gg 1$ ). При малих значеннях  $kr$  величинами, пропорційними  $1/r$  і  $1/r^2$  для складових вектора Е і величиною  $1/r$  для вектора Н можна умовно знехтувати. При цьому многочлени у правій частині системи можуть бути скорочені і спрощені (але спрощуючи моделі полів треба мати на увазі, що цільові показники, коефіцієнти екранування, розраховані за спрощеними виразами, можуть мати значні інструментальні чи навіть методичні похибки). У спрощених виразах для вектора Е основною складовою буде величина, пропорційна  $1/r^3$ , а для вектора Н – відповідно з  $1/r^2$

В ближній зоні  $kr \ll 1$ , тому  $e^{-jkr} \approx 1$ , і тоді система може бути ще більше спрощена:

$$\begin{cases} E = \frac{x}{4\pi\epsilon_a} \frac{e^{-jkr}}{r^3}, \\ H = -\frac{j\omega}{4\pi} r^o p_o \frac{e^{-jkr}}{r^2}. \end{cases} \quad (1.2)$$

або

$$\begin{cases} E = \frac{X}{4\pi\epsilon_a} \frac{1}{r^3}, \\ H = -\frac{j\omega}{4\pi} r^o p_o \frac{1}{r^2}, \end{cases} \quad (1.3)$$

На основі виразів вище можуть бути досліджені деякі основні характеристики ближнього поля.

Наукове дослідження Ігоря Марущака зосереджене на дослідженні основних характеристик ближнього поля, що формується найпростішим

джерелом електромагнітного поля - елементарним вібратором. Він визначив, що ближнє поле залежить від частоти коливання вібратора, його геометричних розмірів та відстані від джерела поля до точки спостереження.

Дослідження також дозволили з'ясувати, що ближнє поле складається з двох компонент: електричного та магнітного поля. Він також досліджував взаємодію між джерелом поля та матеріалами, які знаходяться в його ближньому полі, та вивчав методи екранування для зменшення ефектів випромінювання.

Отже, Ігор Марущак довів, що найпростіше джерело електромагнітного поля – елементарний вібратор – може бути використане для дослідження основних характеристик ближнього поля, що має важливе значення для радіоелектронних систем та застосування у практиці.

Віталій Шаповал також досліджував характеристики електромагнітного поля елементарного вібратора в радіоелектронних системах. Він зазначав, що таке джерело поля може бути представлене як джерело випромінювання, що створює електричне і магнітне поля, які залежать від змін струму та напруги в елементі.

Вчений проводив дослідження основних характеристик ближнього поля, таких як амплітуда, фаза та напрямок поля, що є важливими параметрами для розробки та вдосконалення радіоелектронних систем. Він також звертав увагу на взаємодію елементарних вібраторів та їх вплив на оточуюче середовище.

У своїх дослідженнях акцентував увагу на використанні методів екранування та електромагнітних екранів для зменшення впливу електромагнітного поля на навколишнє середовище та на інші елементи радіоелектронних систем.

Зіньковський Ю. Ф. проводив дослідження деяких основних характеристик ближнього поля, зокрема, розподілу поля в зоні ближнього поля, спектральних властивостей поля, енергетичної спектроскопії та інших параметрів. Дослідження таких характеристик можуть допомогти в розумінні фізичних процесів, що відбуваються в електромагнітному полі, та в розробці більш ефективних електронних пристроїв та систем.

На малих відстанях від джерела електричне поле синфазне на основі виразів з електричним моментом вібратора і відповідає за структурою електростатичному полю диполя. В зоні індукції  $r \ll \lambda$  чи  $r/V \ll T$  (період зміни поля), але вирази для елементарного вібратора виведені в припущенні, що  $\lambda \gg l$ , тому ближня зона характеризується нерівністю  $l \ll r \ll \lambda/2\pi$  у зв'язку

з чим запізненням поля можна знехтувати. Отже, повільніше змінюється поле у часі (менша частота), тим більша відстань від джерела зони випромінювання.

В ближній зоні електричні і магнітні вектори електромагнітного поля зміщені за фазою на  $\pi/2$ , завдяки чому в деякі моменти у часі електричний вектор перевищує магнітний, в інші моменти, зміщені на  $\pi/4$ , магнітний вектор перевищує електричний.

У зв'язку із зміщенням векторів  $E$  і  $H$  на  $90^\circ$  комплексний вектор Пойнтінга виявляється уявною величиною, але це не означає, що в ближній зоні зовсім відсутнє випромінювання (за випромінювання відповідні компоненти поля, пропорційні  $1/r$ , які присутні у формулах вище)

З наведених виразів видно, що амплітуда електричного поля зменшується як  $1/r^3$ , а магнітного - як  $1/r^2$ .

В дальній зоні  $r \gg \lambda/2\pi$ ,  $kr \gg 1$ , тобто в зоні випромінювання в рівняннях величиною  $1/r^2$  і  $1/r^3$  у порівнянні з  $1/r$  можна знехтувати. Тому рівняння в дальній зоні чи зоні випромінювання перетворюються до виду:

$$\begin{cases} E = -\frac{k^2 \xi}{4\pi \epsilon_a} \frac{e^{-jkr}}{r}, \\ H = \frac{\omega k}{4\pi} r^o p_o \frac{e^{-jkr}}{r}, \end{cases} \quad (1.4)$$

чи

$$\begin{cases} E = -E_\partial^r \frac{e^{-jkr}}{r}, \\ H = H_\partial^r \frac{e^{-jkr}}{r}. \end{cases} \quad (1.5)$$

Тут  $E_\partial^r$ ,  $H_\partial^r$  стали, які описують властивості джерела електромагнітного поля і середовища і не залежать від відстані до точки спостереження поля.

Аналіз виразів свідчить, що в дальній зоні вектори  $E$  і  $H$  змінюються синфазно. У ближній зоні між електричним і магнітним векторами зсув за фазою дорівнює  $\pi/2$ .

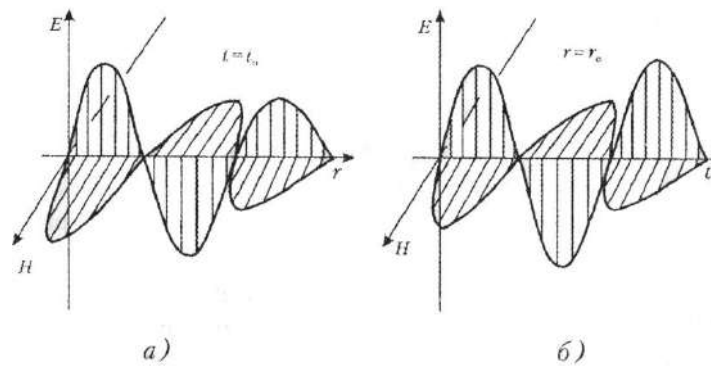


Рисунок 1.2 – зміна електромагнітного поля з відстанню (а) і в часі (б)

В напрямку своєї осі  $z$  вібратор не випромінює,  $E$  і  $H$  дорівнюють нулю. Ці вектори досягають максимального значення у площині, перпендикулярній до осі вібратора, і яка проходить через його середину, кут  $\theta \approx \pi/2$ . Це призводить до того, що в дальній зоні поле носить чисто поперечний характер і являє собою сферичну хвилю.

З наведених виразів видно, що амплітуди електричного і магнітного полів зменшуються з відстанню однаково пропорційно  $1/r$ .

Зінковський Ю. Ф. в своїх наукових працях досліджував ближню зону електромагнітного поля, яка знаходиться на відстані порівнянній з довжиною хвилі від джерела випромінювання. В цій зоні електричний і магнітний вектори електромагнітної хвилі мають складну структуру та не можуть бути представлені як прості хвилі. Тому він висловлював думку, що для детального вивчення електромагнітного поля в ближній зоні потрібні спеціальні методи та математичні моделі.

Він стверджував, що ближнє поле є найбільш складним і недостатньо вивченим аспектом електромагнітного поля, оскільки його особливості значно відрізняються від властивостей далекого поля.

Щодо основних характеристик ближнього поля, вчений зазначав, що воно характеризується високою інтенсивністю поля, що залежить від відстані від джерела, а також від напрямку і частоти поля. Крім того, він звертав увагу на те, що ближнє поле складається з електричного та магнітного векторів, які знаходяться під різними кутами між собою і залежать від характеристик джерела поля.

Зінковський також вивчав ближню зону поля, яка визначається відстанню від джерела до точки, де поля електричного та магнітного векторів мають рівну інтенсивність. Він стверджував, що в цій зоні поля мають змінну напрямленість і форму, що ускладнює їх дослідження.

У ближній зоні електромагнітного поля характеристики поля залежать від відстані від джерела поля та форми антени, а не від кута, під яким спостерігач дивиться на неї. У проміжній зоні відстань від джерела поля вже значно більша, а кут, під яким спостерігач дивиться на антену, починає впливати на параметри поля. У дальній зоні відстань до джерела поля є дуже великою, а характеристики поля визначаються головним чином кутом між джерелом поля та спостерігачем.

Вчений також розглядав електричний та магнітний вектори в ближній зоні. У цій зоні електричний та магнітний вектори взаємодіють між собою та з вільними струмами в навколишніх об'єктах, таких як провідники та діелектрики. Ця взаємодія може призводити до значних змін в електричних та магнітних характеристиках поля в ближній зоні, що робить її важливим об'єктом досліджень в радіоелектроніці.

Отже, в ближній зоні електричний і магнітний вектори необхідно розглядати окремо, оскільки співвідношення їх напруженостей (хвильовий опір) не є незмінним.

В дальній зоні ці складові утворюють плоску хвилю, тобто при розгляданні плоских припущення, що вони утворені дальнім полем.

Проміжна зона – перехідна від ближньої до дальньої. Тут  $r \approx \lambda/2\pi$ ,  $kr \approx 1$ . Тому при аналізі виразів, не можна знехтувати жодним з їх складових компонентів, тобто у проміжній зоні реактивне (зв'язане з джерелом) поле і поле випромінювання обидва виявляються значимими. Повні вирази дозволяють точно дослідити режими джерела і структуру поля на будь-яких відстанях і в будь-які характерні моменти часу коливального і випромінювального процесу.

Зінковський Юрій Францевич в своїх наукових дослідженнях вказував на те, що в ближній зоні електромагнітного поля (також називається "зоною Френеля") електричний та магнітний вектори змінюються швидко і складно залежать від відстані до джерела поля.

У ближній зоні електричний вектор має складові, орієнтовані уздовж різних напрямків і змінюється в часі. Також в ближній зоні магнітний вектор може мати велику амплітуду і може бути напрямлений у різних напрямках, залежно від точки вимірювання.

Також вказував на те, що при переході з ближньої зони до дальньої зони електромагнітного поля (також називається "зоною Фраунгофера") вектори електричного та магнітного поля змінюються відносно просто і можуть бути описані законом звукового коливання.



Отже, Зіньковський Ю.Ф. доводив, що в ближній зоні електромагнітного поля необхідно враховувати складну залежність електричного та магнітного векторів від відстані до джерела поля, а при переході до дальньої зони можна використовувати простіші моделі опису поля.

В кінці першої чверті періоду коливальний струм, що протікає по вібратору знизу вгору, зарядив верхню половину додатно, а нижню - від'ємно, силові лінії напруженості електричного поля починаються на верхній половині вібратора і закінчуються на нижній (рис 1.3,а).

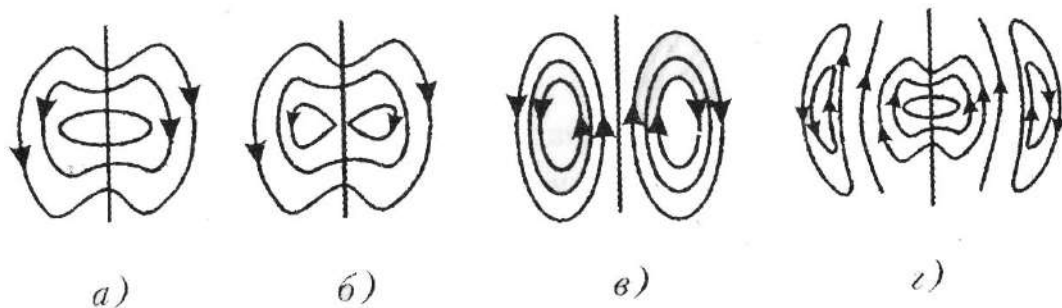


Рисунок 1.3 – Силові лінії напруженості електричного поля вібратора: а) перша чверть періоду коливань; б) те ж саме, друга чверть; в) частина відокремлених ліній поля хвилі, що зароджується; г) віддалення відокремленої частини поля

Під час другої чверті періоду заряд обох половин вібратора зменшується, частина енергії в ході реактивного процесу повертається до її джерела, а та, що залишилась у зовнішній частині поля, переміщується в зовнішнє середовище і починається відокремлення зовнішніх ліній поля (зароджується хвиля) (рис. 1.3, б).

В кінці другої чверті періоду обидві половини вібратора знову незаряджені, енергія внутрішньої частини поля повернулась до джерела і закінчилось відокремлення зовнішніх ліній поля. Під час третьої чверті періоду коливань струм, який протікає зверху вниз, заряджає верхню половину додатно, нижню – від'ємно. До кінця третьої чверті періоду поле поблизу вібратора аналогічне зображеному на рис. 1.3, а, але лінії поля мають зворотний напрям. Відокремлена частина поля віддалилась (рис. 1.3, г) в зовнішнє середовище і т.д. Силові лінії векторів  $E$  і  $H$  електромагнітного поля, що розповсюджуються, поля випромінювання, поля зародженої хвилі є замкнутими (рис. 1.4) і не зв'язані з джерелом, що їх породжує.

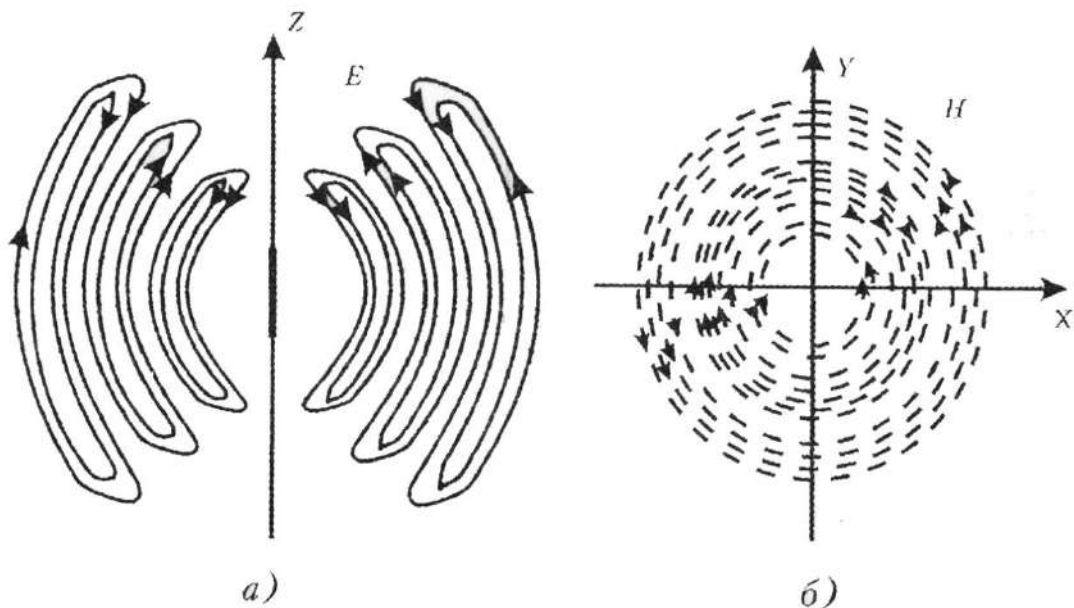


Рисунок 1.4 – Структури силових ліній векторів  $E(a)$  і  $H(b)$  електромагнітних полів в дальній зоні у фіксований момент часу

Взагалі можна виділити чотири типи електромагнітних зв'язків між джерелом і приймачем електромагнітної енергії через електричне, магнітне, електромагнітне поле (просторові) і через електричні провідники, які безпосередньо (гальванічно, кондуктивно) з'єднують джерело і приймач.

Щодо повного екранування Зіньковський Юрій Францевич зазначав, що воно досягається за допомогою екранувального матеріалу, який повністю забезпечує електромагнітний бар'єр між джерелом перешкод та приймачем.

Він також зазначав, що повне екранування може бути досягнуте шляхом використання екранувального матеріалу, який забезпечує електричне та магнітне екранування. Електричне екранування досягається за рахунок здатності екранувального матеріалу ефективно поглинати електричне поле, тоді як магнітне екранування забезпечується за рахунок здатності матеріалу поглинати магнітне поле.

У своїх дослідженнях розглядав вплив різних факторів на ефективність екранування, включаючи частоту сигналу, тип екранувального матеріалу та геометрію системи екранування. Він також розробив численні методики та рекомендації щодо вибору та застосування екранувальних матеріалів залежно від конкретних умов використання.

Повне екранування може бути одержане, якщо подавлені усі чотири типи зв'язків, які можуть непередбачено для конструкторів, виробничників, експлуатаційників створитися внаслідок неідеального функціонування апаратури, обумовленого її великою функціональною конструктивною складністю.

Конструктор, аналізуючи електромагніту обстановку частотами можливих випромінювачів полів, повинен на самих ранніх життєвих циклах апаратури оцінити загрози неалгоритмічних зв'язків для застосування адекватних засобів захисту шляхом екранування.

Необхідно також оцінити характер джерела поля і визначити, до якого класу він відноситься – до електричних чи до магнітних вібраторів. Малий струм джерела і висока напруга є прикметами електричного вібратора і дають можливість розглядати його ближнє поле як електричне (вектор  $E$  за інтенсивністю значно перевищує вектор  $H$ ). Навпаки великий струм і мала напруга джерела дають можливість розглядати його ближнє поле як магнітне.

Використання екранування в галузі електромагнітного захисту почалося в другій половині 20 століття, коли стали активно розробляти електронні пристрої та системи зв'язку, які потребували захисту від зовнішніх електромагнітних полів. З того часу, екранування стало невід'ємною частиною конструкції багатьох електронних пристроїв та систем.

Екранування почали використовувати після виявлення впливу одних приладів на інші, це назвали електромагнітною сумісністю (ЕМС).

Зіньковський Юрій Францевич, звертав увагу на важливість ЕМС, особливо в контексті розвитку сучасної електроніки і технологій. Він наголошував на тому, що відповідність електронних систем вимогам електромагнітної сумісності є необхідною для забезпечення безпеки та стабільності роботи всіх пристроїв, що працюють в одному просторі.

Зазначав, що в умовах постійного зростання кількості електронних пристроїв, які використовуються в різних галузях людської діяльності, питання ЕМС стає все більш актуальним і потребує ретельного вивчення та застосування відповідних технологій.

Електромагнітна сумісність — здатність радіоелектронних засобів і випромінювальних пристроїв одночасно функціонувати з обумовленою якістю в реальних умовах експлуатації з урахуванням впливу ненавмисних радіозавад і не створювати неприпустимих радіозавад іншим радіоелектронним засобам.

Погоджуючись з висновками вченого щодо електромагнітної сумісності, серед яких:

1. Всі пристрої, що мають електромагнітні взаємодії з іншими пристроями, повинні задовольняти вимогам електромагнітної сумісності.
2. Електромагнітна сумісність має бути врахована на всіх етапах розробки та виготовлення електронних пристроїв.
3. Для забезпечення електромагнітної сумісності необхідно використовувати спеціальні матеріали, екранування, фільтри, компенсаційні елементи та інші засоби.
4. Важливим елементом електромагнітної сумісності є використання правильних схем підключення та заземлення електронних пристроїв.
5. Для забезпечення електромагнітної сумісності необхідно використовувати стандарти та нормативні документи, що регулюють електромагнітні випромінювання та їх вплив на електронні пристрої.
6. Забезпечення електромагнітної сумісності є важливою задачею в різних галузях, таких як медицина, транспорт, авіація, телекомунікації, наука та інші.

У реальних умовах в місці розташування електрообладнання діє велика кількість різного роду випромінювань, облік яких можливий за допомогою методів теорії ймовірності та математичної статистики. Забезпечення нормальної роботи спільно працюючих технічних засобів є метою ЕМС як наукової проблеми. Предметом же вивчення можна вважати виявлення закономірностей взаємодії спільно працюючих технічних засобів, на базі яких формуються рекомендації для досягнення ЕМС.

Зінковський Юрій Францевич розглядав різноманітні проблеми, пов'язані з електромагнітною сумісністю. Зокрема, він вивчав вплив електромагнітних перешкод на роботу електронних пристроїв та систем, способи зниження рівня електромагнітних випромінювань, методи оцінки електромагнітної сумісності та інші аспекти цієї проблематики.

Зокрема, він вивчав вплив електромагнітних перешкод на роботу радіоелектронних пристроїв та систем, зокрема систем зв'язку, систем автоматичного управління, систем енергетики, систем транспорту, медичних та інших систем. Він також досліджував проблеми електромагнітної сумісності в галузі військової техніки, де велике значення має забезпечення функціонування електронних систем у складних умовах бойових дій та наявності великої кількості електромагнітних перешкод.

Однією з головних проблем, які розглядав Зіньковський, була проблема зниження рівня електромагнітних випромінювань. Він досліджував способи зниження рівня електромагнітних випромінювань за допомогою екранування та інших методів, а також вивчав питання нормування рівня електромагнітних випромінювань, що забезпечує безпеку людини та електронної техніки.

Присвячував увагу методам оцінки електромагнітної сумісності, які дають змогу визначити, наскільки ефективно працює система в умовах високочастотних електромагнітних перешкод. Одним з методів є моделювання електромагнітних полів від пристроїв та систем, які можуть стати джерелом перешкод. Це дозволяє виявляти можливі проблеми та забезпечувати оптимальний рівень електромагнітної сумісності.

Іншим методом є проведення експериментальних вимірювань електромагнітних полів, які можуть виникати в результаті роботи пристроїв та систем. Ці вимірювання дають можливість виявити можливі перешкоди та забезпечити належний рівень електромагнітної сумісності.

Третім методом є використання стандартів та нормативних документів, які встановлюють вимоги до електромагнітної сумісності та методи її оцінки. Наприклад, Європейський Союз має ряд директив, які регулюють електромагнітну сумісність пристроїв та систем.

Виникає необхідність постійного вдосконалення методів оцінки електромагнітної сумісності в зв'язку з розвитком технологій та зростанням кількості пристроїв та систем, які працюють в електромагнітному спектрі. Це дозволяє забезпечувати належний рівень електромагнітної сумісності та запобігати можливим проблемам, які можуть виникнути в результаті перешкод.

Юрій Францевич Зіньковський працював над розробкою методів оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС) для забезпечення функціонування електронних пристроїв і систем в умовах електромагнітного поля (ЕМП).

Він розробив методи моделювання електромагнітного поля в різних середовищах та методи оцінки параметрів поля, які дозволяють визначити рівень його впливу на електронні системи та пристрої. Він також працював над розробкою методів експериментальної перевірки ЕМС для підтвердження правильності моделей та оцінки ризиків вченого була розробка методів та стандартів ЕМС для забезпечення безпеки електронних систем та пристроїв в умовах різних видів ЕМП, включаючи електростатичні розряди, блискавки, електромагнітні поля від електронних пристроїв та інші джерела ЕМП.

Він також працював над розробкою методів підвищення ЕМС, включаючи використання екранування, захисту від електромагнітного перешкоджання, зменшення електромагнітної вразливості, а також методів випромінювання та приймання електромагнітних сигналів.

Проблема ЕМС виникає при наявності трьох складових: по-перше, має бути джерело завад (шумів), по-друге, повинна бути схема-приймач, чутлива до шумів (завад), по-третє, необхідно наявність каналу зв'язку для передачі завад від джерела до приймача.

При аналізі проблеми завад перш за все слід визначити: що є джерелом завад, що служить їх приймачем і яким чином джерело та приймач пов'язані один з одним. Звідси випливає, що можливі три способи усунення проходження завад:

- придушення шумів в джерелі;
- створення приймача, нечутливого до завад;
- мінімізація передачі завад через канал зв'язку.

У деяких випадках необхідно застосовувати два або навіть всі три зазначених способи придушення шумів.

Для придушення шумів у джерелі можна екранувати джерело, виставивши екрани навколо силового елемента (трансформатора, потужних елементів схеми). Також можна розмістити потужні елементи на відстані від чутливих елементів для зменшення впливу.

Для зменшення впливу на провідники, використовують екрановані дроти, на жаль це неможливо на друкованих платах. Найчастіше це використовують у дротах, які передають інформацію на великі відстані, наприклад, вита пара у комп'ютерній техніці.

Для мінімізації впливу потужних елементів, наприклад, високовольтних трансформаторів, використовують одразу декілька методів. По-перше, їх завжди екранують та використовують металевий корпус, що ще більше зменшує вплив, також їх розташовують на великій відстані від апаратури та від житлових зон.

Для зменшення впливів від зовнішніх джерел можна екранувати чутливі елементи схеми від інших елементів та від впливів ззовні корпусу. Це дуже актуально для чутливих датчиків, наприклад датчиків звуку, датчиків випромінювання людини, тобто датчиків, які вимірюють величини, які зазвичай нижче, ніж рівень шумів навколо. Також це актуально для високочастотних

схем, адже вплинути на роботу таких схем можуть найменші наведення струмів завад.[6]

Ці методи можна використовувати на великих об'єктах, використання на, наприклад, друкованій платі чи елементах схеми з розмірами менше 1 мм, є недоцільним на значно збільшує розміри апаратури, тому в таких випадках використовують екранування плівками.

До плівкового екранування можна віднести мідну фольгу, металізований папір, графітовий шар. Використання таких матеріалів є доцільним у дротах та відносно невеликих об'єктах, оскільки зберігається гнучкість та залишається можливість виготовляти об'єкти одразу з екрануванням.

У радіотехніці ефективне екранування використовується для забезпечення електромагнітної сумісності та захисту електронних пристроїв від зовнішніх електромагнітних перешкод. Ось кілька прикладів:

1. Екрановані кабелі: кабелі, які використовуються в радіочастотних пристроях, можуть бути екрановані, щоб запобігти перетинанню електромагнітних полів між сусідніми проводами, а також для запобігання зовнішнім електромагнітним перешкодам.

2. Екрановані пристрої: багато радіочастотних пристроїв, таких як приймачі, передавачі та підсилювачі, можуть бути екрановані, щоб захистити їх від зовнішніх електромагнітних перешкод.

3. Екрановані кімнати: у деяких випадках може бути необхідно екранувати цілу кімнату для забезпечення електромагнітної сумісності. Такі кімнати мають екранувальні поверхні, які забезпечують повне відбивання електромагнітних хвиль.

4. Екрановані контейнери: у навколишньому середовищі можуть бути присутні зовнішні електромагнітні перешкоди, які можуть вплинути на електронні пристрої. Ефективний спосіб захисту від цього - використання екранованих контейнерів.

В радіотехніці використовують різноманітні процеси екранування для захисту від електромагнітних перешкод. Деякі з найбільш ефективних процесів екранування включають:

1. Використання металевих корпусів для захисту електронних компонентів від електромагнітних перешкод.

2. Використання металевих пластин та екранів для зменшення рівня електромагнітної інтерференції між електронними компонентами.

3. Використання спеціальних матеріалів, таких як ферит, для поглинання електромагнітних хвиль та зменшення рівня електромагнітних перешкод.

4. Використання екранованих кабелів для передачі сигналів з електронних компонентів, що забезпечує зменшення рівня електромагнітної інтерференції між сигналами.

5. Використання спеціальних фільтрів для зменшення рівня електромагнітних перешкод на входних та вихідних портах електронних компонентів.

Ці процеси екранування застосовуються в багатьох пристроях радіотехніки, таких як мобільні телефони, комп'ютери, телевізори, радіоприймачі та інші.[7]

Отже, екранування дуже важливий і невід'ємний елемент сучасного конструювання, оскільки дуже багато приладів, що можуть викликати завади скупчуються в невеликому просторі, тому потрібно виокремити найефективніші та оптимальні серед досліджуваних варіантів.



## Розділ 2. Ефективність та коефіцієнт екранування екрану

### 2.1 Оцінка ефективності процесу екранування

Екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів є важливою технікою для забезпечення електромагнітної сумісності та захисту електронних пристроїв. Політика екранування полягає у створенні фізичної перешкоди між джерелом електромагнітного випромінювання та потенційно вразливими пристроями, щоб зменшити або усунути вплив цих полів на пристрої. Принцип екранування базується на використанні матеріалів з високою провідністю або феромагнітними властивостями, які здатні поглинати або відбивати електромагнітні хвилі.

В практичній площині радіотехніки чітко розподілення полів по частоті та характеристикам потужності на окремо електричні, магнітні або електромагнітні досить проблематично, але важливо для розуміння в методологічній площині. Було визначено сутність явищ та ефектів з фізичної точки зору, завдяки чому створюються умови для забезпечення необхідного рівня ефективності екранування.

Ефективність електростатичних екранів залежить від ефекту електростатичної індукції, яке відбувається в режимі їх роботи. У цьому режимі металевий екран впливає на внутрішню та зовнішню поверхні, створюючи індуковані заряди протилежних знаків. Ці заряди формують екрануюче поле та поле повторного випромінювання відповідно. У біполярній системі індукованих зарядів внутрішньої та зовнішньої поверхні екрану взаємно компенсуються. Ідеально ізольований електростатичний екран, в таких умовах, має ефективність, що дорівнює нулю.

Однак, в електростатичному екрануванні виникає проблема нейтралізації поля повторного випромінювання. Для досягнення необхідної ефективності електростатичні екрани повинні бути заземлені, щоб забезпечити нейтралізацію цього поля. На практиці це досягається електричним з'єднанням екранів з масивними металевими деталями та компонентами обладнання, такими як шасі та рами, або виводом на централізоване заземлення. Це забезпечує ефективне екранування і допомагає уникнути впливу повторного випромінювання.

На заземленому електростатичному екрані, заряд повторного випромінювання, який не має зв'язку і не компенсований, розподіляється рівномірно по поверхні екрану, системі заземлення та корпусі. Це призводить до зниження поверхневої щільності заряду та напруженості поля повторного

випромінювання на поверхні електростатичного екрану. В результаті, поле повторного випромінювання нейтралізується.

Ефективність заземленого електростатичного екрану залежить від загальної маси його заземлення. Чим більше маса заземлення, тим більш ефективним є екранування. Однак, використання моделей та співвідношень, які базуються на хвильових режимах, для розрахунку показників екранування електростатичних екранів, може призвести до неефективних ідеалізованих результатів, які не відповідають практичній дійсності.[8]

Магнітне екранування, також відоме як магнітостатичне або квазістатичне екранування, використовується для захисту пристроїв електронної техніки від зовнішніх магнітних полів або взаємного впливу між їх складовими частинами при дії постійного магнітного поля або низько-частотних струмів. Для виготовлення магнітних екранів використовуються спеціальні матеріали з високою магнітною проникністю ( $\mu$ ), низькою залишковою індукцією ( $B_r$ ) і низькою коерцитивною силою ( $H_c$ ). Ці матеріали дозволяють забезпечити проведення зовнішнього магнітного потоку переважно через екран, зменшуючи вплив на екрануєме середовище зовні або всередині екрану. Залишкова намагніченість екрану має менший вплив на ефективність екранування, коли значення  $B_r$  матеріалу є меншим. Форма екрана майже не впливає на ефективність екранування, хоча щілини і отвори в екрані можуть погіршити екранування через зменшення магнітної проникності. Заземлення екранів не є обов'язковим. Однак, враховуючи значну різницю між магнітною проникністю середовищ, виникають зміни кутових координат поширення полів і екранів, що необхідно враховувати при конструкторських розрахунках екранів і визначенні їх ефективності. Інтегральна ефективність магнітного екрану може бути оцінена за формулою  $S=0,22\mu (1 - (1 - d / R_e)^3)$ , де  $R_e$  - радіус еквівалентної сфери,  $d$  - товщина екрану. Коефіцієнт екранування такого екрана можна наблизити за допомогою формули  $B = 20\lg(0,7\mu(d / R_e))$ .

Для матеріалів, що мають однакові властивості у всіх напрямках (ізотропні матеріали), магнітна індукція  $B$  пропорційна напруженості магнітного поля  $H$  з коефіцієнтом пропорційності  $\mu$ :  $B = \mu H$ . При збільшенні насиченості  $\mu$  феромагнітних матеріалів їх магнітна індукція зменшується. З цієї причини для екранування від сильних магнітних полів використовуються подвійні або потрійні екрани, виготовлені з різних матеріалів. Зовнішній екран, який насичується при високих значеннях напруженості магнітного поля  $H$ , зазвичай виготовляється з матеріалу, такого як сталь, а внутрішній екран виготовляється з матеріалу, який має високу початкову магнітну

проникність, наприклад, пермалою. Електростатичний і магнітостатичний режими характеризуються діапазоном частот від нуля до декількох кілогерц, тому поля, які підлягають екрануванню, можуть бути описані спрощеним рівнянням Максвелла для статичних полів:  $\text{rot } \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}$ ;  $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ . Електростатичний і магнітостатичний режими відрізняються тим, що другий забезпечує однаковий і невеликий ефект екранування у всьому діапазоні частот від нуля до  $10^4$  Гц. Принцип дії магнітного екрана – шунтування силових ліній поля за рахунок підвищеної магнітної провідності матеріалу екрана.

Електромагнітне екранування має складний характер початкових даних для розрахунків і не має єдиного принципу дії, що застосовується у всьому широкому діапазоні частот. Цей діапазон включає відносно широкі діапазони в декілька (три, чотири) десятинних порядків. Щоб отримати достовірні результати розрахунків, які добре відповідають практиці, необхідно визначити, до якого з двох основних режимів належать умови електромагнітного екранування, що розглядаються.

У хвильових режимах роботи екранів, які включають діапазони високих частот (НВЧ: 109...1011 Гц) або значно віддалені від джерела випромінювання на радіочастотах, ефект екранування визначається фізичними явищами і процесами взаємодії падаючих, відбитих і заломлених хвиль на межах різко неоднорідних середовищ і металевих матеріалів екранів. Для моделювання цих хвиль використовуються рівняння Максвелла, закони Снелліуса, коефіцієнти Френеля та інші методи. Моделі щільності екранування мають аналітичний характер і зберігають властивості подібності при використанні відомих аналітичних методів моделювання.

У діапазонах радіочастот (від сотень кілогерц до десятків гігагерц) для режимів КХ, СХ, ДХ, УКХ радіозв'язку, враховуючи обмежені розміри компонентів та деталей радіоапаратури, екрануючі поля у внутрішньому середовищі пристрою відіграють важливу роль. У цих діапазонах переважають реактивні та перерозподільні процеси, а хвильові ефекти менш значущі. Як результат, аналітичні методи, які засновані на хвильовому підході, використовуються у квазістатичних і електродинамічних режимах роботи екранів (електромагнітне екранування), але вони мають характер напіваналітичних або наближених методів.[9]

Ці аналітичні методи надають ідеалізовані результати, які не завжди точно відповідають експериментальним даним. Часто вони показують завищені значення коефіцієнтів екранування або надто малі товщини екранів та інші недоліки.

Математичні рівняння, що враховують взаємодію полів і екранів на радіочастотах, можуть бути представлені у вигляді диференціальних рівнянь в часткових похідних другого порядку:

$$A \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} + C \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + a \frac{\partial^2 U}{\partial x} + b \frac{\partial^2 U}{\partial z} + cU = F(x, z, \tau), \quad (2.1)$$

де  $x, z$  – просторові координати,  $t$  – час,  $U$  — інтегральні опори, індуктивності, ємності, струми і напруги в екранах. Також приймається припущення про залежність коефіцієнтів  $A, B, C, a, b, c$  мають залежність тільки від  $z$  та  $x$ .

Рівняння, які містять часткові похідні, можуть використовуватись для опису нестационарних дифузійних процесів. Ці процеси можуть включати поширення тепла або дифузію електромагнітних полів усередині металевих матеріалів екранів за допомогою масоперенесення електронів. У таких процесах електрони, що піддаються впливу екрануючих полів, переходять у напівхаотичні рухи, що породжують слабо керовані вихрові струми.

Використання рівнянь з частковими похідними для моделювання процесів при екрануванні обмежене через вимоги, які на них накладаються. Ці вимоги вимагають спрощення ефектів взаємодії полів, зводячи їх до простіших механічних аналогів, таких як тертя, і використання усереднених оцінок їх основних параметрів.[10]

Можливі обмеження, пов'язані з використанням рівнянь з частковими похідними для моделювання процесів екранування, можуть бути подолані шляхом застосування чисельних математичних методів до моделей дифузійних процесів полів в екрани. Ці чисельні моделі дозволяють створювати програмні моделі та автоматично виконувати моделювання з використанням обчислювальних методів. Вони дозволяють досліджувати процеси на глибину окремих просторових елементів і навіть точок, що знаходяться в товщі екранів, і мають практичне значення для екранування.

При використанні чисельних методів моделювання, точність процесу може бути підвищена шляхом збільшення параметрів та показників дискретизації, таких як кількість відліків і рівні квантування значень. Проте, це може призвести до збільшення вимог до апаратної пам'яті, необхідної для зберігання великих обсягів даних, особливо в разі великих масштабів та розмірів багатовимірних модельних структур.

Існує метод дискретизації, відомий як "вторинні джерела", який добре підходить для обчислювальних можливостей сучасних персональних комп'ютерів (ПК). Цей метод має чіткий фізичний зміст і складається з двох етапів.

На першому етапі формуються проміжні аналого-дискретні моделі процесів дифузної взаємодії у вигляді інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду[11]. На другому етапі ці аналого-дискретні моделі алгебризуються за допомогою відомих методів, наприклад, за допомогою формули Сімпсона, і перетворюються в дискретні чисельні матричні моделі. Потім переходять до програмних моделей, де автоматично розраховуються ефекти дифузійної взаємодії полів і екранів. Для цього використовуються метод Гауса та розрахунок цільових показників екранування шляхом вимірювання співвідношення між напруженостями полів або вихровими струмами на першому етапі, які зменшуються або існують завдяки використанню екранів.

Електромагнітне екранування у хвильовому режимі на частотах НВЧ в діапазоні від  $10^9$  до  $10^{10}$  Гц і вище виконується за допомогою двох основних ефектів взаємодії хвиль з екранами: поглинання і відбиття електромагнітної енергії екраном.

Поглинання енергії в екрані відбувається шляхом перетворення електромагнітної енергії в теплову, включаючи втрати через вихрові струми. Ефективність екранування поглинанням залежить від таких факторів, як частота поля (чим вища частота, тим ефективніше поглинання), магнітна проникність матеріалу екрана та його електропровідність.

Відбиття енергії пов'язане з невідповідністю хвильових опорів металу екрана та діелектрика, що оточує екран. Це відбиття пов'язане з різницею у властивостях поширення хвиль із металу в діелектрик. Чим більше ця невідповідність, тим ефективніше екранування.

З цього можна зробити висновок, що ефективність екранування у хвильовому режимі на НВЧ залежить від співвідношення поглинання і відбиття електромагнітної енергії екраном.

У хвильовому режимі роботи екрана довжина хвилі наближається до розмірів екрана. В цьому діапазоні частот для розрахунку екранів потрібно враховувати струми зміщення, використовуючи повні рівняння електродинаміки. Однак важливою відмінністю екранування у хвильовому режимі від діапазону нижчих частот є змінний характер залежності коефіцієнта екранування від частоти. Це пояснюється хвильовою природою

НВЧ і призводить до резонансу коефіцієнта екранування при певних співвідношеннях поперечного розміру екрана до довжини хвилі.

Отже, при розрахунку екранів необхідно враховувати не тільки поперечну електромагнітну хвилю ТЕМ, яка є основною у квазістаціонарному режимі, але й хвилі вищого порядку, такі як поперечно-магнітна ТМ, яка відображає екранування магнітного поля, і поперечно-електрична ТЕ, яка відображає екранування електричного поля. Таким чином, цей підхід вимагає урахування різних типів хвиль при аналізі екранування.

У випадку екранування кабельних ліній часто виникають питання щодо екрануючих властивостей діелектриків. Якщо ми розглядаємо діелектричну пластину з незначними втратами, то опір можна виразити як  $Z_\delta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ . У формулі для ефективності екранування  $S = E_e/E_0$  (де  $E_0$  - напруженість поля в середовищі без екрану,  $E_e$  - напруженість поля з екраном), гіперболічні функції відсутні, оскільки відсутні періодичні процеси поглинання енергії. Якщо електрична товщина екрану задовольняє умову  $\beta d = m\pi$ , де  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\beta$  – хвильовий коефіцієнт,  $d$  – товщина екрану, то коефіцієнт екранування  $S = 1$ , що означає, що діелектрична пластина не екранує.

Загалом, теорія електромагнітних екранів базується на розв'язку основних рівнянь електродинаміки, а саме перших двох.

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = j + \frac{\delta D}{\delta t} \\ \operatorname{rot} E = -\frac{\delta B}{\delta t} \end{cases} \quad (2.2)$$

де  $j$  – густина струму провідності,  $D$  – електричне зміщення,  $D = \varepsilon_\alpha E$ ,  $B$  – магнітна індукція,  $B = \mu_\alpha H$ .

За умови гармонічних полів вирази набувають значення

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \\ \operatorname{rot} E = -j\omega\mu H \end{cases} \quad (2.3)$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність середовища, а  $j\omega\varepsilon E$  – вторинні струми зміщення. Врахування цих струмів є обов'язковим на високих частотах.

При наявності полів, в яких сторонні струми та заряди відсутні, хвильові рівняння стають однорідними:

$$\begin{cases} \Delta E - \mu\sigma \frac{\delta E}{\delta t} - \varepsilon\mu \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} = 0 \\ \Delta H - \mu\sigma \frac{\delta H}{\delta t} - \varepsilon\mu \frac{\delta^2 H}{\delta t^2} = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Для непровідного середовища ( $\sigma = 0$ ):

$$\begin{cases} \Delta E - \varepsilon\mu \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} = 0 \\ \Delta H - \varepsilon\mu \frac{\delta^2 H}{\delta t^2} = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Для провідного середовища ( $\sigma \neq 0$ ), за умови плоскої хвилі, рівняння (2.4) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \Delta E - \mu\sigma \frac{\delta E}{\delta t} - \frac{1}{v^2} \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} = 0 \\ \Delta H - \mu\sigma \frac{\delta H}{\delta t} - \frac{1}{v^2} \frac{\delta^2 H}{\delta t^2} = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

де  $v = (\varepsilon\mu)^{-1/2}$  – фазова швидкість поширення електромагнітних збурень в середовищі. Після диференціювання, отримаємо:

$$\begin{cases} \Delta E + \left(-j\omega\mu\sigma + \frac{\omega^2}{v^2}\right) E = 0 \\ \Delta E + (-j\omega\mu\sigma + \omega^2\varepsilon\mu) E = 0 \\ \Delta H + \left(-j\omega\mu\sigma + \frac{\omega^2}{v^2}\right) H = 0 \\ \Delta H + (-j\omega\mu\sigma + \omega^2\varepsilon\mu) H = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Також дуже часто використовуються рівняння в циліндричній системі координат, оскільки це більш доцільно при розрахунках кабельних систем. Основні рівняння:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = -i\omega\mu H_r \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -i\omega\mu H_\varphi \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial E_\varphi}{\partial r} + \frac{E_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} = -i\omega\mu H_z \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \sigma E_r \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \sigma E_\varphi \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = \sigma E_z \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = -i\omega\mu H_r \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -i\omega\mu H_\varphi \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial E_\varphi}{\partial r} + \frac{E_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} = -i\omega\mu H_z \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \sigma E_r \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \sigma E_\varphi \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = \sigma E_z \quad (2.19)$$

Ці співвідношення застосовуються до металу. Для діелектрика значення  $\sigma = 0$ , тому права частина другої групи рівнянь стає рівною нулю.

Для вирішення поставленої задачі, яка полягає у визначенні екрануючої дії циліндричного екрану щодо енергії, що поширюється в радіальному напрямку від джерела збудження (розташованого в центрі екрану) до екрану та поза ним, необхідно використовувати альтернативний підхід.[12]

Щільність потоку потужності в цьому напрямку визначається законом Пойнтінга і залежить від компонент електричного поля  $E_z$  і магнітного поля  $H_\varphi$ . Вона обчислюється як  $\text{Re}0,5[E_z H_\varphi^*]$ . Хвильовий опір, який впливає на цей потік в металевому або діелектричному середовищі, також можна виразити за допомогою тих самих компонент:

$$Z = \frac{E_z}{H_\varphi} \quad (2.20)$$

Отже, для подальшого аналізу спростимо рівняння, враховуючи циліндричну систему координат і умову, що провідники розташовані вздовж екрану і орієнтовані вздовж вісі  $z$ , як показано на рис. 2.1. З урахуванням цих



умов, ми будемо мати три складові електромагнітного поля:  $E_z$ ,  $H_\varphi$  і  $H_r$ . Компоненти  $H_z$ ,  $E_\varphi$  і  $E_r$  будуть дорівнювати нулю[13].

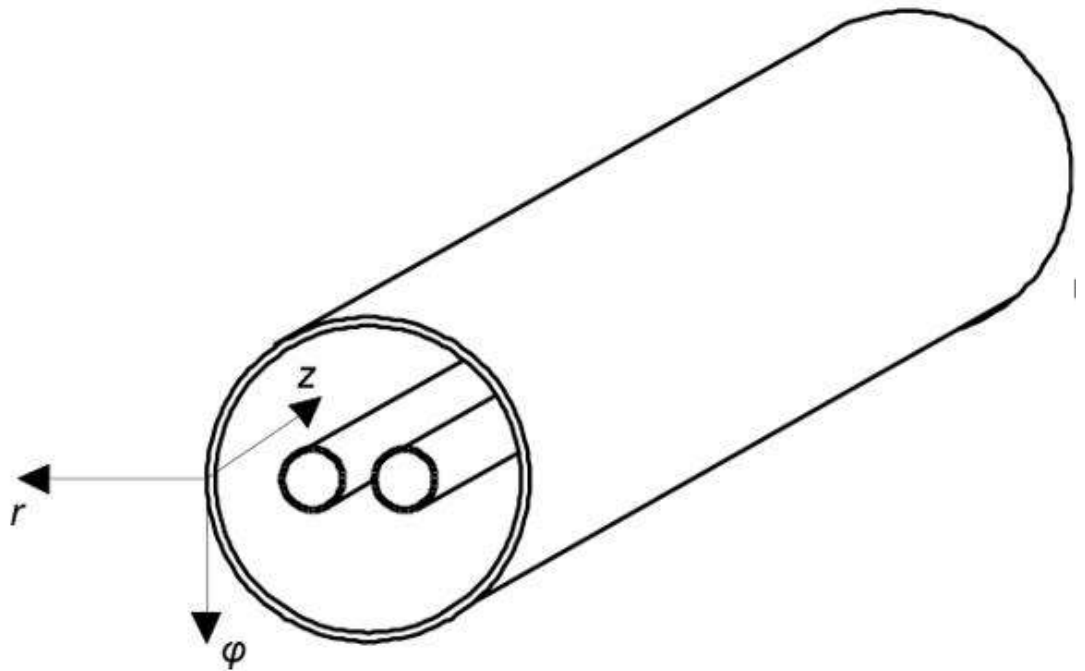


Рисунок 2.1 – Циліндричний екран

З цього рівняння можна записати так:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} = -i\omega\mu H_r, \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = i\omega\mu H_\varphi, \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = \sigma E_z. \quad (2.23)$$

Продиференціювавши  $H_r(\varphi)$  та  $H_\varphi(r)$  та підстановки в останній вираз, отримуємо диференціальне рівняння другого порядку відносно  $E_z$ .

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} = \begin{cases} k^2 E_z, \\ 0 \end{cases}, \quad (2.24)$$

де  $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$  – коефіцієнт вихрових струмів.

Зміна  $E_z$  по осі  $z$  є набагато менше змін по іншим координатам, тому вона не враховується.

Розв'язання цього диференційного рівняння для діелектрика:

$$E = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (A_n r^n + B_n r^{-n}) \cos n\varphi. \quad (2.25)$$

де  $A_n$  і  $B_n$  – постійні інтегрування.

Якщо вважати парою провідників джерелом збудження, розташованих зі зсувом по  $\varphi$  у  $180^\circ$ , то в розкладі на гармоніки будуть присутні лише непарні гармоніки. Парні гармоніки будуть дорівнювати нулю:

$$E = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (A_n r^n + B_n r^{-n}) \cos n\varphi. \quad (2.26)$$

Тоді можна визначити іншу складову поля  $H_\varphi$ .

$$H_\varphi = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{1}{i\omega\mu} E = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (A_n n r^{n-1} + B_n n r^{-(n+1)}) \cos n\varphi. \quad (2.27)$$

У виразах для  $E_z$  і  $H_\varphi$ , перші члени, які зростають зі збільшенням  $r$ , представляють відбиті хвилі, тоді як другі члени, які зменшуються зі збільшенням  $r$ , відповідають падаючим хвилям:

$$\left. \begin{aligned} E_z^n &= \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B_n r^{-n} \cos n\varphi \\ H_\varphi^n &= -\frac{1}{i\omega\mu} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B_n n r^{-(n+1)} \cos n\varphi \end{aligned} \right\} \text{при } r \geq a, \quad (2.28)$$

$$\left. \begin{aligned} E_z^e &= \sum_{n=1,3,5}^{\infty} A_n r^n \cos n\varphi \\ H_\varphi^e &= \frac{1}{i\omega\mu} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} A_n n r^{n-1} \cos n\varphi \end{aligned} \right\} \text{при } r \leq a, \quad (2.29)$$

де  $a$  – половина відстані між парою провідників.

В такому випадку, хвильові опори діелектрика під час руху енергії в радіальному напрямку для будь-якої величини, включаючи  $n$ , вимірюються за наступними формулами:

$$\left. \begin{aligned} Z_r^n &= \frac{E_z^n}{H_\varphi^n} = -i \frac{\omega \mu r}{n} = Z_{\partial}^n \\ Z_r^e &= \frac{E_z^e}{H_\varphi^0} = i \frac{\omega \mu r}{n} = Z_{\partial}^e \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

З отриманих результатів стає очевидним, що хвильові опори для падаючої та відбитої хвиль (2.30) відрізняються лише знаками, що свідчить про протилежні напрямки поширення цих хвиль.

Тепер ми визначимо значення  $E_z$ ,  $H_\varphi$  і  $Z_r$  для металу. Для провідникового середовища, яким є метал, диференціальне рівняння має наступний вигляд:

$$\frac{\delta^2 E_z}{\delta r^2} \cdot \frac{1}{r} \frac{\delta E_z}{\delta r} \cdot \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 E_z}{\delta \varphi^2} = k^2 E_z \quad (2.31)$$

Розв'язуємо рівняння за допомогою методу розділу змінних у вигляді відтворення двох функцій:

$$E_z = R(r)\Phi(\varphi) \quad (2.32)$$

В результаті маємо два рівняння:

$$R'' + \frac{1}{r}R' - \left(k^2 + \frac{n^2}{r^2}\right)R = 0 \quad (2.33)$$

$$\Phi'' + n^2\Phi = 0 \quad (2.34)$$

Перше рівняння є диференціальним рівнянням Бесселя  $n$ -го порядку та має таке рішення:

$$R = A_n I_n(kr) + B_n K_n(kr), \quad (2.35)$$

Де  $A_n$ ,  $B_n$  – постійні інтегрування,  $I_n$ ,  $K_n$  – видозмінні функції Бесселя першого та другого роду  $n$ -го порядку[14].

Розв'язок другого рівняння має такий вигляд:

$$\Phi = C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi \quad (2.36)$$

В результаті, повне  $E_z$  для металу буде рівне:

$$E_z = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} [A_n I'_n(kr) + BK'_n(kr)] \cos n\varphi \quad (2.37)$$

Відповідно,

$$H_\varphi = \frac{k}{i\omega\mu} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} [A_n I'_n(kr) + BK'_n(kr)] \cos n\varphi \quad (2.38)$$

Перші члени виразів для  $E_z$  і  $H_\varphi$ , які включають функцію  $I_n$ , характеризують відбиту хвилю. Ці члени збільшуються зі зростанням аргументу. З іншого боку, члени, які включають функцію  $K_n$ , зменшуються зі зростанням аргументу і відповідають падаючій хвилі.

Відповідно до цього, значення хвильових опорів металу для будь-якої складової  $n$  будуть такими:

Для відбитої хвилі:

$$Z_r^b = \frac{E_z^b}{H_\varphi^b} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma} \frac{I_n(kr)}{I'_n(kr)}} = Z_M^b \quad (2.39)$$

Для падаючої хвилі:

$$Z_r^n = \frac{E_z^n}{H_\varphi^n} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma} \frac{K_n(kr)}{K'_n(kr)}} = Z_M^n \quad (2.40)$$

Маючи на увазі великі значення аргументу ( $kr \geq 5$ ), які практично характерні для металевих середовищ  $\frac{K_n(z)}{K'_n(z)} \rightarrow -1$  та  $\frac{I_n(z)}{I'_n(z)} \rightarrow 1$ , отримуємо

$$Z_M^n = -\sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}}, \quad (2.41)$$

$$Z_M^b = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}}, \quad (2.42)$$

У середині екрану, в діелектрику, діють одночасно основне поле, яке є полем джерела збудження ( $E_z^n = E_n$ ) і ( $H_\varphi^n = H_n$ ), а також відбите поле, яке є полем реакції екрану ( $E_z^b = E_n^b$ ) і ( $H_\varphi^b = H_n^b$ ). Обидва ці поля присутні і взаємодіють всередині екрану.

Аналогічно формулі (3.5) розглядається закон зміни електричного і магнітного поля по  $\varphi$  в діелектрику і металі, і цей закон виражається через  $\cos n\varphi$ :

$$\sum_{n=1,3,5}^{\infty} E_n(1-P_n)\cos n\varphi, \quad (2.43)$$

$$\sum_{n=1,3,5}^{\infty} H_n(1+P_n)\cos n\varphi, \quad (2.44)$$

де  $P$  – коефіцієнт реакції екрана, який характеризує поле відбитої від екрана хвилі,

$$P = \frac{Z_{\partial} - Z_M}{Z_{\partial} + Z_M}. \quad (2.45)$$

Електромагнітне поле в діелектрику за екраном може бути виражене через ефективність екранування  $S_n$ .

$$\sum_{n=1,3,5}^{\infty} E_n S_n \cos n\varphi \quad (2.46)$$

$$\sum_{n=1,3,5}^{\infty} H_n S_n \cos n\varphi \quad (2.47)$$

Для знаходження значень  $P_n$ ,  $S_n$ ,  $D_n$ ,  $C_n$  скористаємося умовою безперервності тангенціальних складових електричного ( $E_z$ ) і магнітного ( $H_{\varphi}$ ) полів на межі діелектрик-екран ( $r=r_e$ ) і екран-діелектрик ( $r=r_e+t$ ).

Відповідно для будь-якої  $n$  складової можна написати:

$$E_n(1-P_n) = C_n I_n(kr_e), \quad (2.48)$$

$$H_n(1+P_n) = \frac{k}{i\omega\mu} \left[ C_n I_n'(kr_e) + D_n K_n'(kr_e) \right], \quad (2.49)$$

$$E_n S_n = C_n I_n[k(r_e+t)] + D_n K_n[k(r_e+t)], \quad (2.50)$$

$$H_n S_n = \frac{k}{i\omega\mu} \left\{ C_n I_n'[k(r_e+t)] + D_n K_n'[k(r_e+t)] \right\}. \quad (2.51)$$

Використовуючи формули (2.30) і (2.38) для хвильових опорів  $Z_d$  і  $Z_m$ , отримаємо:

$$E_n(1 - P_n) = C_n I_n(kr_e) + D_n K_n(kr_e), \quad (2.52)$$

$$E_n S_n = C_n I_n[k(r_e + t)] + D_n K_n[k(r_e + t)], \quad (2.53)$$

$$E_n S_n = N \left\{ C_n I_n' [k(r_e + t)] + D_n K_n' [k(r_e + t)] \right\}, \quad (2.54)$$

$$\text{де } N = \frac{Z_d}{Z_m}$$

Склавши вирази (2.48) та (2.49) і (2.50) та (2.51) і використовуючи властивості рекурентних співвідношень для бesselевих функцій, отримаємо наступні результати:

$$x I_n'(x) = x I_{n-1}(x) - n I_n(x), \quad (2.55)$$

$$x K_n'(x) = -x K_{n-1}(x) - n K_n(x), \quad (2.56)$$

Отримаємо:

$$2E_n S_n = C_n N I_{n-1}[k(r_e + t)] + D_n N K_{n-1}[k(r_e + t)], \quad (2.57)$$

$$2E_n = C_n N I_{n-1}(kr_e) + D_n N K_{n-1}(kr_e). \quad (2.58)$$

Розв'язавши задані рівняння відносно  $C_n$  та  $D_n$  отримаємо:

$$C_n = \frac{2E_n N \left\{ K_{n-1}[k(r_e + t)] - K_{n-1}(kr_e) S_n \right\}}{M}, \quad (2.59)$$

$$D_n = \frac{2E_n N \left\{ I_{n-1}[k(r_e + t)] - I_{n-1}(kr_e) S_n \right\}}{M}, \quad (2.60)$$

$$\text{де } M = N^2 \left\{ I_{n-1}[k(r_e + t)] K_{n-1}[k(r_e + t)] - I_{n-1}(kr_e) K_{n-1}(kr_e) \right\}.$$

Для знаходження ефективності екранування  $S_n$  підставимо значення  $C_n$  та  $D_n$  в рівняння (2.20)

$$\begin{aligned}
S_n & \left[ 1 + \frac{2N \{ I_{n-1}(kr_e)K_n[k(r_e+t)] + K_{n-1}(kr_e)I_n[k(r_e+t)] \}}{N^2 \{ I_{n-1}[k(r_e+t)]K_{n-1}(kr_e) - I_{n-1}(kr_e)K_{n-1}[k(r_e+t)] \}} \right] = \\
& \frac{2N \{ I_{n-1}[k(r_e+t)]K_n[k(r_e+t)] + K_{n-1}[k(r_e+t)]I_n[k(r_e+t)] \}}{N^2 \{ I_{n-1}[k(r_e+t)]K_{n-1}(kr_e) - I_{n-1}(kr_e)K_{n-1}[k(r_e+t)] \}}.
\end{aligned} \tag{2.61}$$

Якщо  $I_{n-1}(x)K_n(x) + K_{n-1}(x)I_n(x) = \frac{1}{x}$ , отримаємо кінцеву формулу розрахунку ефективності екранування циліндричного екрану:

$$\begin{aligned}
S_n & = \frac{1}{k(r_e+t) \{ I_{n-1}(kr_e)K_n[k(r_e+t)] + K_{n-1}(kr_e)I_n[k(r_e+t)] \}} x \\
& x \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{N \{ I_{n-1}[k(r_e+t)]K_{n-1}(kr_e) - I_{n-1}[k(r_e+t)] \}}{2 \{ I_{n-1}(kr_e)K_n[k(r_e+t)] + K_{n-1}(kr_e)I_n[k(r_e+t)] \}} \right\}}
\end{aligned} \tag{2.62}$$

## 2.2 Магнітні та немагнітні екрани

Екранування є важливим аспектом при проектуванні та виробництві радіоелектронних засобів. Воно відіграє вирішальну роль у забезпеченні надійної роботи електронних пристроїв та систем, а також у запобіганні небажаним впливам електричних та магнітних завад. Для досягнення оптимальної ефективності екранування, вчені та дослідники займаються розробкою різних методів та класифікацією елементів радіоелектронних засобів залежно від їхньої взаємодії з цими завадами.

Одним із напрямків досліджень є розробка екранів для магнітних та немагнітних завад. Магнітні завади виникають внаслідок магнітного поля, яке може впливати на роботу електронних пристроїв і спотворювати передавання сигналів. Немагнітні завади, у свою чергу, пов'язані з електричними полями та електромагнітним випромінюванням. Їх вплив може призводити до перешкод у передаванні сигналів та спотворень у роботі електронних пристроїв.

Україна має активну наукову спільноту, яка займається дослідженнями в галузі електроніки, радіотехніки та електротехніки. В області магнітних та немагнітних екранів, які використовуються для електромагнітного захисту пристроїв та систем, також проводяться дослідження українськими вченими.

Українські вчені внесли значний внесок у дослідження та розробку методів екранування. Вони проводять аналіз електричних та магнітних властивостей різних матеріалів з метою виявлення найефективніших способів захисту. В рамках своїх досліджень вони розробляють нові матеріали, які мають високу електричну чи магнітну проникність і можуть бути використані для створення ефективних екранів.

Методи екранування також варіюються залежно від типу завади, з якою вони працюють. Наприклад, для електричних завад, таких як електромагнітне випромінювання, ефективним методом може бути використання металевих екранів, які відбивають електричне поле та забезпечують захист від непотрібних впливів. З іншого боку, для магнітних завад, які мають магнітне поле, можуть використовуватися спеціальні матеріали з високою магнітною проникністю для приведення магнітних полів належним чином.

Хоча розділення електричних та магнітних завад на практиці неможливе, існують елементи, для яких можна знехтувати якоюсь із цих складових завад, також кардинально відрізняються методи екранування від цих завад. Тому з точки зору дослідження екранування доцільне їх розділення за особливостями та властивостями.



Магнітні екрани базуються на використанні матеріалів з високою проникністю в магнітному полі, які здатні відбивати або поглинати магнітні компоненти електромагнітних хвиль. Немагнітні екрани використовують діелектричні матеріали з високою електричною проникністю для відбивання або поглинання електричних компонентів електромагнітних хвиль. Обидва типи екранів можуть бути ефективними, але вибір залежить від конкретного застосування та потреби.

За діапазоном частот магнітні екрани зазвичай працюють краще в низькочастотному діапазоні, тоді як немагнітні екрани можуть бути більш ефективними у високочастотному діапазоні. Це пов'язано з фізичними властивостями матеріалів, які використовуються для їх виготовлення.

За механічною міцністю магнітні екрани, зазвичай, мають високу механічну міцність, що дозволяє їм витримувати великі навантаження та зберігати свою ефективність протягом тривалого часу. Немагнітні екрани, зі свого боку, можуть бути більш вразливими до механічних пошкоджень та зношування.

Вартість та доступність матеріалів для магнітних та немагнітних екранів можуть варіювати. У деяких випадках, вибір матеріалів може залежати від фінансових обмежень або доступності на ринку.

За блокуванням завад магнітні екрани здатні блокувати магнітні компоненти електромагнітних хвиль, такі як магнітні поля та індукцію. Немагнітні екрани забезпечують блокування електричних компонентів електромагнітних хвиль, таких як електричні поля та напруга.

За підходами та матеріалами магнітні екрани можуть використовувати матеріали з високою магнітною проникністю, такі як феромагнетики (залізо, нікель, кобальт), що здатні відбивати або поглинати магнітні компоненти електромагнітних хвиль. Немагнітні екрани використовують діелектричні матеріали з високою електричною проникністю, такі як кераміка, скло, пластмаси, полімери. Ці матеріали здатні блокувати електричні компоненти електромагнітних хвиль.

Володимир Гнатюк проводив дослідження з метою розробки нових матеріалів та конструкцій екранів, які забезпечують ефективне приглушення електромагнітних полів та запобігають перешкодам у роботі радіоелектронних пристроїв. Він досліджував властивості різних матеріалів, їхню електричну та магнітну проникність, а також розробляв методи виготовлення та оптимізації екранів для максимального зниження електромагнітних завад.

У роботах використовувалися різні матеріали та конструкції для магнітних та немагнітних екранів залежно від конкретних потреб та умов застосування.

Для магнітних екранів, призначених для блокування магнітних полів, використовуються спеціальні феромагнітні матеріали, такі як пермалоїди (нікелеві сплави), ферити (оксиди металів, наприклад, залізо, нікель, марганець) тощо. Ці матеріали володіють високою магнітною проникністю, що дозволяє ефективно відбивати та приглушувати магнітні поля.[15]

Для немагнітних екранів, які призначені для блокування електричних полів, використовуються матеріали з високою електропровідністю, наприклад, метали (алюміній, мідь, сталь) або спеціальні провідні полімери. Ці матеріали здатні приводити в замкнення електричні потоки та захищати електронні пристрої від електричних завад.

Володимир Гнатюк також розробляв комбіновані конструкції екранів, які поєднували як магнітні, так і немагнітні матеріали. Це дозволяло забезпечити комплексний захист від обох видів завад та покращити ефективність екранування.

Крім вибору матеріалів, звертав увагу на конструкцію екранів, включаючи їхню геометрію, розмір, товщину та спосіб монтажу. Ці параметри впливають на ефективність екранування та здатність екрану захищати внутрішні електронні компоненти від завад.

Використання відповідних матеріалів та оптимізованої конструкції екранів, розроблених Володимиром Гнатюком, сприяє створенню більш стійких до електромагнітних завад радіоелектронних пристроїв, забезпечуючи надійну роботу та зменшуючи ймовірність виникнення небажаних перешкод у спільному функціонуванні різних електронних пристроїв.

Ще один український фізик, який вніс вагомий внесок у вивчення електромагнітної сумісності та захисту від електромагнітних перешкод Микола Калиткин. Він досліджував різні типи екранів, включаючи магнітні та немагнітні, для ефективного екранування радіочастотних сигналів.

Вивчав різні типи діелектричних матеріалів з метою вибору таких, що забезпечують ефективне блокування радіочастотних сигналів. Деякі з типів діелектричних матеріалів, які він досліджував, включають:

Керамічні матеріали: такі як оксиди металів (наприклад, оксид алюмінію, оксид цирконію) та оксиди різних елементів (наприклад, титановий діоксид),

використовуються для створення екранів. Вони мають високу діелектричну проникність і можуть блокувати проникнення радіочастотних сигналів.

Полімерні матеріали: такі як поліетилен, поліпропілен, поліуретан та інші, є популярними варіантами для створення діелектричних бар'єрів. Вони мають низьку провідність та високу діелектричну проникність, що сприяє їхній ефективності у блокуванні радіочастотних сигналів.

Склокерамічні матеріали: які поєднують властивості скла та кераміки, також використовуються для створення екранів. Вони мають високу діелектричну проникність і можуть добре блокувати радіочастотні сигнали.

Композитні матеріали: створені шляхом поєднання діелектричних матеріалів з іншими компонентами, такими як метали або карбонові волокна, також можуть бути використані для створення ефективних екранів. Вони поєднують в собі переваги різних матеріалів для досягнення кращої ефективності екранування радіочастотних сигналів.[16]

Вибір конкретного типу діелектричного матеріалу залежить від вимог щодо екранування, частотного діапазону, властивостей матеріалу та багатьох інших факторів. Микола Калиткин проводив дослідження, щоб визначити оптимальні матеріали та їх комбінації для створення ефективних діелектричних екранів, які б забезпечували блокування радіочастотних сигналів у відповідних діапазонах.

Володимир Попович: Український вчений, спеціалізований у галузі радіотехніки та мікрохвильової електроніки. Він досліджував різні аспекти екранування в радіоелектроніці, включаючи розробку ефективних магнітних та немагнітних екранів. Він вказував на їхню важливість для забезпечення електромагнітної сумісності і захисту від електромагнітних перешкод.

Зазначав, що магнітні екрани використовуються для блокування магнітних полів і зменшення наведених струмів, що можуть виникати в провідниках під впливом зовнішніх сигналів. Вони можуть бути виготовлені з матеріалів з високою проникністю, таких як ферити або пермаллоїди.

Немагнітні екрани, з іншого боку, застосовуються для блокування електричних полів і зменшення наведених напруг. Їхнім прикладом можуть бути екрани з високоомних матеріалів, таких як металеві фольги або екрани з глухими камерами.

Акцентував на необхідності правильного проектування та використання магнітних та немагнітних екранів для досягнення високої ефективності екранування і забезпечення якості сигналу в радіотехнічних пристроях і

системах. Він підкреслював, що правильний вибір матеріалів та геометрії екранів є ключовим для досягнення бажаних результатів.

Якщо розглядати електростатику як граничний режим з нульовою частотою і нескінченною довжиною хвилі, і використовувати для розрахунку показників екранування електростатичних екранів аналогічні хвильовим співвідношення, можна отримати результати, які є неефективними та ідеалізованими з практичної точки зору. Наприклад, це може призводити до отримання нескінченних чисельних значень коефіцієнтів екранування для електростатичних екранів.

Головними джерелами магнітостатичних полів в промислових радіозв'язках часто є поля розсіювання від електричних пристроїв, таких як електродвигуни, трансформатори, дроселі, лінії передачі електроенергії тощо. Лінії сили цих інтенсивних магнітних полів можуть взаємодіяти з обмотками їх джерел та контурами можливих приймачів, утворюючи в такому випадку складні перешкоди.

Крім того, українські вчені активно працюють над класифікацією елементів радіоелектронних засобів залежно від їхньої функціональної ролі в електронних системах.

Досліджують різні типи генераторів, які використовуються для створення різних видів сигналів, включаючи постійні, змінні або імпульсні сигнали. Вони аналізують їхню структуру, принцип роботи та параметри, щоб розробляти ефективні методи екранування, які забезпечують мінімальні втрати сигналу та захист від небажаних електромагнітних впливів.

Підсилювачі є важливими компонентами в електронних системах, оскільки вони забезпечують підсилення сигналу до необхідного рівня. Українські вчені досліджують різні типи підсилювачів, такі як операційні підсилювачі, високочастотні підсилювачі та потужність підсилювачі, та розробляють екрануючі методи, які забезпечують стабільну та якісну роботу цих пристроїв.

Також українські вчені вивчають різні типи модуляторів, які використовуються для передачі сигналів на різних носіях і забезпечують модуляцію сигналу для передачі інформації. Вони аналізують властивості модуляторів та розробляють екрануючі методи, які допомагають запобігти нежаданим втратам сигналу та перешкодам.

Усі ці дослідження та розробки українських вчених мають на меті створення більш ефективних та надійних радіоелектронних засобів, які відповідають сучасним вимогам та можуть бути успішно використані у різних

галузях, включаючи телекомунікації, медичну техніку, автомобільну промисловість та багато інших.

Якщо розглядати електростатику як граничний режим з нульовою частотою і нескінченною довжиною хвилі, і використовувати для розрахунку показників екранування електростатичних екранів аналогічні хвильовим співвідношення, можна отримати результати, які є неефективними та ідеалізованими з практичної точки зору. Наприклад, це може призводити до отримання нескінченних чисельних значень коефіцієнтів екранування для електростатичних екранів.

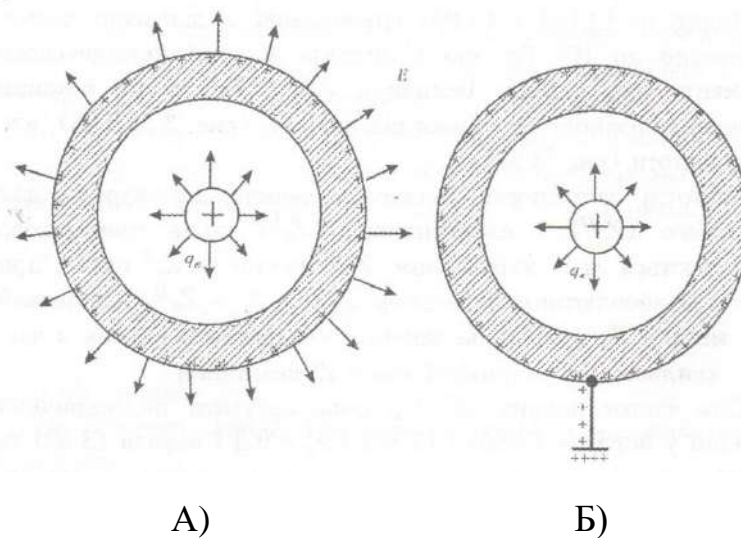


Рисунок 2.2 – незаземлений (А) і заземлений (Б) електростатичний екран

Результуючий заряд у системі зарядів незаземленого (сферичного) екрана (рис. 2.2, а) дорівнює:

$$\oint_V \rho dv = \oint_V \rho_e dv - \oint_V \rho_- dv + \oint_V \rho_+ dv$$

де  $\rho_e = q_e/v$  – об’ємна густина заряду, який екранується в електростатичній системі екрана і розподілений по його зовнішній поверхні,  $\rho_- = q_-/v$  – представляє об’ємну густину від’ємних зарядів, індукованих на внутрішній поверхні екрана, а  $\rho_+ = q_+/v_3$  представляє об’ємну густину додатних зарядів, індукованих на зовнішній поверхні екрана[17].

При електростатичній індукції виконується умова рівності для електростатичних зарядів, тобто  $|q_e| = |q_+| = |q_-|$ , що означає, що система зарядів для незаземленого екрана залишається некомпенсованою, і, отже, результуючий заряд дорівнює

$$\oint_V \rho dv = \oint_V \rho_+ dv = q_+$$

Для визначення напруженості електростатичного поля на точках сферичної поверхні  $S_3$ , яка співпадає з зовнішньою поверхнею екрана, ми розглянемо два випадки: відсутність незаземленого екрана та наявність незаземленого екрана. У випадку, коли заряд, що екранується, розташований у навколишньому середовищі, потік вектора напруженості електричного поля через поверхню  $S_3$  буде дорівнювати:

$$\oint_{S_3} E \vec{dS} = \frac{q_3}{\epsilon_0}$$

де  $\epsilon_0$  – діелектрична стала.

При сферичному характері поверхні  $S$  розв'язок інтегрального рівняння :

$$\vec{E} = \frac{q_e}{\epsilon_0 4\pi R^2} \frac{\vec{R}}{r}$$

де  $R$  – радіус сфери.

Коли незаземлений екран присутній, потік вектора напруженості електричного поля через зовнішню поверхню є некомпенсованим зарядом і має значення:

$$\oint_{S_3} \vec{E}_{+H} d\vec{S} = \frac{q_+}{\epsilon_0}$$

При наявності незаземленого екрана, напруженість перевипроміненого поля, що проникає в екрановане середовище, має наступне значення:

$$\vec{E}_{+H} = \frac{q_+}{\epsilon_0 4\pi R^2} \frac{\vec{R}}{r}$$

Коефіцієнт екранування незаземленого екрана

$$B = 20 \lg \frac{\vec{E}}{\vec{E}_{+H}} = 20 \lg \frac{q_e}{q_+} = 0$$

Отже, підтверджується добре відомий факт, що незаземлений електростатичний екран не має екрануючого ефекту.

У випадку, коли екран заземлений (підключений до корпусу), некомпенсований додатний заряд  $q_+$  розподіляється по поверхні екрана  $S_3$ , поверхні заземлення  $S_{шз}$  та поверхні корпусу (рис. 2.2, Б).

При цьому, загальна площа розподілу заряду по заземленому екрану задовольняє нерівність  $S_{3\Sigma} = S_3 + S_{шз} + S_k \gg S_3$ , а напруженість поля некомпенсованого заряду приблизно дорівнює

$$\vec{E}_+ \approx \frac{q_+}{\varepsilon_0} \frac{\vec{R}}{\oint_S d\vec{S} r}$$

або

$$\vec{E}_+ \approx \frac{q_+}{\varepsilon_0 S_{3\Sigma}} \frac{\vec{R}}{r}$$

Поділивши (96) на (98), отримаємо

$$B_\zeta = I g \frac{S_{3\Sigma}}{S_3}$$

Таким чином, коефіцієнт екранування заземленого електростатичного екрана можна визначити як відношення загальної площі заземленого екрана разом із системою заземлення до площі незаземленого екрана.

Головними джерелами магнітостатичних полів в промислових радіозв'язках часто є поля розсіювання від електричних пристроїв, таких як електродвигуни, трансформатори, дроселі, лінії передачі електроенергії тощо. Лінії сили цих інтенсивних магнітних полів можуть взаємодіяти з обмотками їх джерел та контурами можливих приймачів, утворюючи в такому випадку складні перешкоди.

Для дослідження магнітостатичного екранування зазвичай використовується тільки перше рівняння Максвела (закон повного струму) в диференціальній формі:

$$\text{rot } H = i$$

або в інтегральній формі:

$$\oint H dl = IW$$

де  $i$  – густина струму,  $IW$  – магніторушійна сила джерела магнітостатичної завади.

Згідно з законом магнітного кола (рис. 2.3, а), магнітний опір потоку розсіяння електричної машини (трансформатора) можна виразити як

$$R_M = \frac{F_m}{\Phi_m}$$

де  $F_m = \oint H_m dt$  – падіння магніторухійної сили (МРС) потоку розсіювання вздовж замкнутого кола,  $\Phi_m$  – магнітний потік розсіювання.

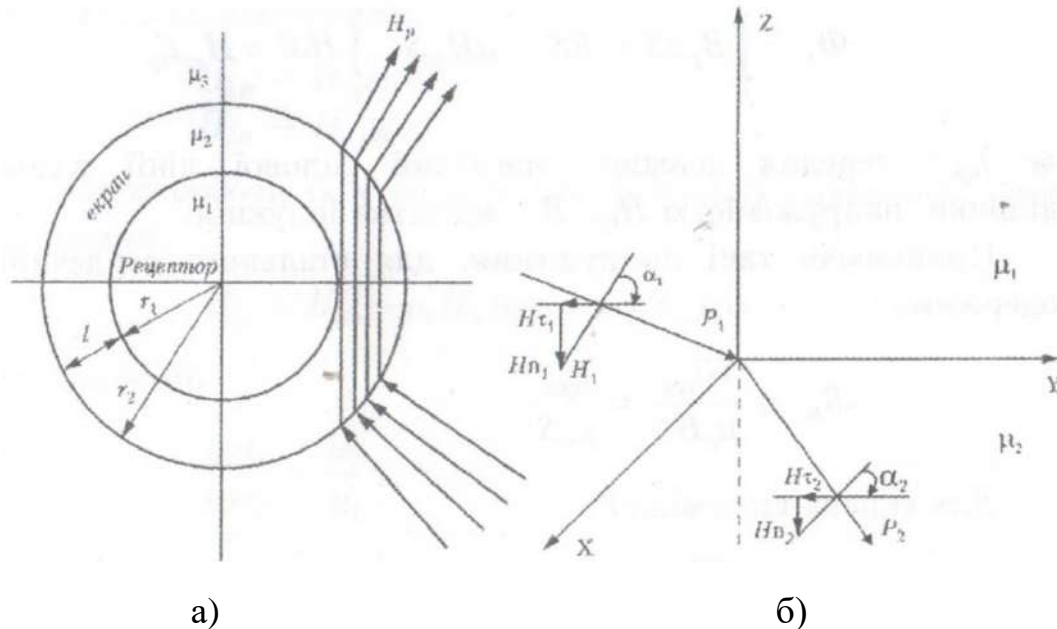


Рисунок 2.3 – потік розсіювання (а), граничні умови на поверхні екрана (б)

Якщо розглядати падіння МРС вздовж замкнутого магнітного кола потоку розсіювання як суму падінь МРС на окремих неоднорідних ділянках  $l_{cm}$ ,  $l_n$ ,  $l_e$ , таких як сталевий сердечник, повітряний прошарок і екран, то можна записати

$$\oint H_\rho dl = \int_{l_{cm}} H_\rho dl + \int_{l_n} H_\rho dl + \int_{l_e} H_\rho dl$$

Відповідно

$$R_M = \frac{\oint H_\rho dl}{\Phi_\rho} = \frac{F_1}{\Phi_\rho} + \frac{F_2}{\Phi_\rho} + \frac{F_3}{\Phi_\rho} = R_{M1} + R_{M2} + R_{M3}$$

де  $R_{M1}$  – магнітний опір сердечника,  $R_{M2}$  – магнітний опір екрана,  $R_{M3}$  – магнітний опір повітряного прошарку.

Якщо переріз будь-якої ділянки є постійним, а напруженість магнітного поля, магнітна індукція і магнітна проникливість у різних точках перерізу ділянки можуть бути наближено вважати однаковими, то можна використовувати наступний наближений вираз:



$$\Phi_{\rho} = \int_S B_{\rho} dS = BS = \mu H_{\rho} S,$$

$$\int_l H dl \approx H_{cp} l_{cp}$$

де  $l_{cp}$  – середня довжина магнітної силової лінії вздовж ділянки, яка має напруженість  $H_{cp}$ ,  $B$  – магнітна індукція.

Зважаючи на це, для сердечника зі сталі одержимо

$$R_{M1} = \frac{H l_{cpc}}{\mu_c H S} = \frac{l_{cpc}}{\mu_c S}$$

Відповідно для екрану

$$R_{M2} = \frac{H l_{cpe}}{\mu_e H S} = \frac{l_{cpe}}{\mu_e S}$$

З припущенням, що залежність магнітного опору повітря має аналогічну форму, що допустимо для якісного розгляду з певною похибкою, можна зробити висновок, що екрануюча дія магнітостатичних екранів базується на тому, що магнітне поле замкнене в товщі магнітного матеріалу екрана через його вищу магнітопровідність порівняно з навколишнім середовищем (повітрям).

Таким чином, для покращення ефективності екрана та зменшення його магнітного опору, потрібно збільшувати магнітну проникливість  $\mu$  матеріалу, з якого виготовлений екран.

У полі розсіяння трансформатора, кільце екрана з магнітного матеріалу виконує роль "поглинаючого" елемента для магнітних силових ліній, що притягуються до нього, подібно до того, як воно було зображено на рисунку 2.3, а.

На межі розділу двох середовищ з різними магнітними проникливостями  $\mu_1$  і  $\mu_2$  (рис. 2.3, б), мають місце загальні граничні умови для вектора  $H$ . Тангенціальні складові вектора  $H$  є неперервними і однаковими на обох сторонах границі:  $H_{1\tau} = H_{2\tau}$ . У той же час, нормальні складові залежать від магнітних проникливостей  $\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$ , де  $H_{\tau}$ ,  $H_n$  – тангенціальні і нормальні складові падаючих і заломлених векторів  $H$ . Тобто, нормальна складова падаючого вектора  $H$  зв'язана з нормальною складовою заломленого вектора  $H$  співвідношеннями, які залежать від цих магнітних проникливостей:

$$H_{1n} = H_{1\tau} \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$H_{2n} = H_{2\tau} \operatorname{tg} \alpha_2$$

Якщо підставити у вирази для загальних умов, то можна отримати

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

$$\mu_1 H_{1\tau} \operatorname{tg} \alpha_1 = \mu_2 H_{2\tau} \operatorname{tg} \alpha_2$$

або остаточно

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – кути падіння та заломлення вектора  $H$  (рис. 2.3, б).

Зміна кутового напрямку магнітного потоку на границі двох середовищ, які мають значно відмінні магнітні проникливості, залежить від зміни цих проникливостей. Якщо відносна магнітна проникливість матеріалу екрана є великою (наприклад, для пермалою до  $4 \cdot 10^5$  або для суперпермалою до  $10^6$ ), тоді в порівнянні з магнітною проникливістю повітря ( $\mu_n = 1$ ) відношення  $\mu_e / \mu_n \rightarrow \infty$  і кут  $\alpha_1$  наближається до  $90^\circ$ . Таким чином, магнітний потік входить і виходить з поверхні магнітних екранів майже під прямим кутом (як показано на рисунку 2.3, б). Це означає, що магнітний екран шунтує магнітний потік розсіювання і захищає чутливі пристрої.

Отже, оцінка та розрахунок екранів є важливим компонентом при конструюванні електронних приладів, а також важливо враховувати особливості магнітних та немагнітних екранів окремо.

### **Розділ 3. Ефективність та характеристики багат шарових екранів**

#### **3.1 Ефективність екранування з використанням спеціальних матеріалів**

Ефективність екранування є ключовим аспектом в проектуванні радіоелектронних систем. Одним з основних факторів, що впливають на ефективність екранування, є використання спеціальних матеріалів, які мають певні властивості для блокування електромагнітних перешкод. Ці матеріали виявляються критичними при створенні екранів, що забезпечують надійний захист електронних пристроїв від небажаного впливу електромагнітних сигналів.

Серед спеціальних матеріалів, які використовуються для ефективного екранування, можна виділити феромагнетики, діелектричні матеріали та провідники. Кожен з цих типів матеріалів має свої особливі властивості, які спрямовані на блокування конкретних електромагнітних компонентів.

Феромагнетики, такі як пермаллої або му-метали, відрізняються високою магнітною проникністю, що дозволяє їм ефективно блокувати магнітні компоненти електромагнітних хвиль. Вони мають здатність поглинати або відбивати магнітні поля, зменшуючи їхнє проникнення через екран. Такі матеріали часто використовуються у вигляді спеціальних покриттів або шарів всередині екранів.

Діелектричні матеріали, такі як кераміка, скло, пластмаси та полімери, мають високу електричну проникність. Вони блокують електричні компоненти електромагнітних хвиль і перешкоджають їхньому переходу через екран. Діелектричні матеріали можуть використовуватися як покриття або вкладені шари всередині екранів для забезпечення ефективного блокування електричних сигналів.

Провідники, такі як метали (алюміній, мідь, сталь) або провідні полімери, забезпечують екрани з високою провідністю, що дозволяє їм ефективно відводити електромагнітні сигнали. Вони використовуються для створення зовнішнього корпусу або рамки екрану, а також для підключення компонентів екрану до заземлення.

Використання спеціальних матеріалів у комбінації з правильною конструкцією екранів дозволяє досягти високої ефективності екранування. Оптимальний вибір матеріалів залежить від потреб системи, вимог щодо частот, амплітуд та інших параметрів електромагнітних сигналів, які потрібно заблокувати або зменшити.

Українські вчені активно досліджують і розробляють нові спеціальні матеріали та методи екранування, спрямовані на поліпшення ефективності блокування електромагнітних сигналів. Їхні роботи сприяють розвитку радіоелектронної технології та забезпечують надійний захист електронних систем від небажаного впливу зовнішніх електромагнітних перешкод.

При розробці ефективних екранів для блокування радіочастотного сигналу та електромагнітного випромінювання, українські вчені активно використовують спеціальні матеріали, які мають унікальні електромагнітні властивості. Одним із важливих аспектів у виборі таких матеріалів є їхні магнітні та діелектричні характеристики, які визначають їхню здатність блокувати та розсіювати електромагнітні хвилі.

Металеві пудри, полімери, ферити, графен та наноматеріали є деякими з матеріалів, які використовуються в створенні спеціальних екранів. Композитні матеріали на основі металевих пудр та полімерів виявляються досить ефективними, оскільки поєднують в собі як магнітні, так і діелектричні властивості. Це дозволяє досягти високої ефективності екранування, а також забезпечити гнучкість та легкість матеріалу, що є важливими факторами при розробці екранів.

Наноматеріали, включаючи графен, відіграють також важливу роль у розробці ефективних екранів. Завдяки своїм унікальним властивостям, вони можуть забезпечити покращену провідність та ефективність екранування. Крім того, феритові матеріали, які мають високу магнітну проникність, використовуються у розробці магнітних екранів. Ці матеріали мають здатність притягувати та утримувати магнітні поля, що дозволяє ефективно блокувати електромагнітні хвилі.

Одним із пріоритетних факторів у виборі матеріалів для ефективного екранування є їхні електромагнітні властивості, такі як провідність, діелектрична проникність, магнітна проникність та втрати енергії. Провідні матеріали, наприклад, метали, забезпечують низький опір електричному струму і можуть ефективно розсіювати електромагнітні поля. Діелектрики, які мають високу діелектричну проникність, використовуються для блокування електричних полів. Магнітні матеріали, зокрема ферити, забезпечують поглинання та розсіювання магнітних полів.

При використанні спеціальних матеріалів у складі екранів необхідно враховувати їхні фізичні властивості, такі як маса, гнучкість, термостійкість та довговічність. Оптимальний вибір матеріалів залежить від конкретних вимог

проекту, таких як частотний діапазон, розміри екрану, умови експлуатації та бюджет.

Зіньковський Юрій Францевич досліджував різні аспекти екранування в радіотехніці, ефективність електромагнітного екранування в залежності від частоти та матеріалу екранувального матеріалу, вплив на якість екранування форми та розмірів екранувальної конструкції, вплив на ефективність екранування наявності отворів у конструкції, ефективність екранування на різних відстанях від джерела електромагнітного випромінювання.

Розробив методи оцінки ефективності екранування, що дозволяють визначити, наскільки ефективно працює система в умовах конкретного застосування.

Досліджував ефективність екранування з використанням спеціальних матеріалів, феритів та графітів. Ферити - це матеріали, які володіють високою магнітною проникністю і здатні забезпечувати ефективне екранування високочастотних електромагнітних сигналів. Зокрема, феритові кільця використовуються в радіотехніці для створення індуктивних компонентів, таких як котушки і трансформатори, що забезпечують ефективне екранування від шумів та перешкод. Також, феритові матеріали можуть бути використані для створення феритових пластин, які забезпечують ефективне екранування високочастотного електромагнітного випромінювання від радіоелектронних пристроїв.

Графіт має високу електропровідність та електромагнітну проникність, що робить його привабливим матеріалом для екранування електромагнітних сигналів. Досліджував використання графіту як матеріалу для екранування радіочастотних електромагнітних полів, а також для зниження електромагнітної інтерференції в провідниках. Він також вивчав властивості композитів на основі графіту та інших матеріалів для екранування електромагнітних сигналів.

За допомогою графіту та графену можуть бути створені ефективні екранувальні матеріали з високим рівнем електропровідності та електромагнітної проникності. Ці матеріали можуть бути використані для захисту електронних компонентів від електромагнітної інтерференції, а також для створення ефективних екранів для промислових і наукових застосувань.

Дослідження зарубіжних науковців показують, що графен та графіт можуть бути ефективними матеріалами для екранування в радіотехніці. Наприклад, дослідження, проведені в Університеті Гарварда, показали, що

графен може бути використаний для створення ефективного екранування в мікрохвильовій та терагерцовій діапазонах.

Також, дослідження в Інституті електроніки та технологій інформації в Японії показали, що графенові плівки можуть ефективно екранувати електромагнітне випромінювання у радіочастотному діапазоні.

У дослідженнях було також виявлено, що графен та графіт можуть бути використані для створення тонких екранів, які ефективно екранують випромінювання у широкому діапазоні частот.

Однак, необхідно зазначити, що застосування графену та графіту для екранування також має свої обмеження, які пов'язані з їхньою структурою та властивостями. Наприклад, графен може бути досить складним у виробництві та досить дорогим матеріалом. Також, необхідно розробляти технології з їхнім використанням, що було б ефективним з точки зору вартості та виробництва.

Графіт та графен є спеціальними матеріалами, які можуть бути використані для екранування електромагнітних полів в радіотехніці. Недавні дослідження зарубіжних науковців показали, що графен має властивості, які дозволяють ефективно екранувати електромагнітні поля в широкому діапазоні частот, включаючи радіочастотний діапазон.

Зокрема, дослідження показали, що графен має високу електропровідність та високу механічну міцність, що дозволяє йому бути використаним як ефективний екран для захисту від електромагнітних інтерференцій. Також було виявлено, що графен може бути використаний як компонент для створення електромагнітних екранів, що мають низьку вагу та товщину, а також високу ефективність екранування.

Однак, слід зазначити, що використання графену в радіотехніці наразі є певним викликом через складність його виробництва та високі витрати на матеріал. Тому, в даний час, дослідження в цій області продовжуються з метою знайти більш доступні та ефективні альтернативні матеріали для екранування в радіотехніці.

Існують деякі проблеми в процесі екранування з використанням спеціальних матеріалів, таких як графіт та графен. Одна з таких проблем - це висока ціна виробництва цих матеріалів. Графіт є досить дорогим матеріалом, що обмежує його використання в електроніці. Графен також є досить дорогим матеріалом, хоча його ціна знижується з часом завдяки вдосконаленню технологій виробництва.

Інша проблема пов'язана з тим, що графен та графіт мають високу провідність, що може призвести до електромагнітних перешкод. Це може зменшити ефективність екранування та призвести до несправностей в електронних пристроях.

Крім того, процес виготовлення графену та графіту може бути складним та має деякі технічні виклики. Наприклад, у виробництві графену потрібно дотримуватись певної температури та кількості шарів матеріалу, що може вплинути на якість та ефективність матеріалу.

Таким чином, хоча графен та графіт можуть бути ефективними матеріалами для екранування в радіотехніці, існують деякі проблеми, які потрібно вирішувати, щоб забезпечити їх успішне використання.

Окрім матеріалів для екранування, існують різні технології, які використовуються для забезпечення ефективного екранування в радіотехніці.

Технології екранування на основі мікрохвильової або радіочастотної інжекції: ці технології використовуються для ефективного екранування електромагнітних хвиль на великій відстані.

Технології екранування на основі магнітних полів: ці технології використовують магнітні поля для забезпечення ефективного екранування електромагнітних полів.

Багатошарове екранування: це технологія, яка використовує декілька шарів матеріалів з різною провідністю або поглинанням електромагнітних хвиль. Кожен шар матеріалу має властивості, які допомагають ефективно екранувати від електромагнітних полів. Це може включати шари провідних матеріалів, шари діелектриків та шари поглинаючих матеріалів, що сприяють максимальному зменшенню проникнення електромагнітного випромінювання через екран.

Екранування на основі фольги: це технологія, яка використовує металеві фольги, зазвичай алюмінієві або мідні, для створення екранів. Фольга накладається на поверхню або вбудовується в матеріал, який потребує екранування, і допомагає блокувати електромагнітне випромінювання.

Електростатичне екранування: ця технологія використовує електростатичні поля для екранування. Застосовується електростатичне зарядження матеріалів або створюються електростатичні бар'єри, які перешкоджають проникненню електромагнітних хвиль.

Екранування з використанням металевих сіток: це технологія, яка використовує металеві сітки або решітки для екранування. Сітка накладається

на поверхню матеріалу або вбудовується в нього, утворюючи перешкоду для електромагнітних полів.

Розвиток технологій екранування сприяє створенню багатошарових екранів, що використовують комбінацію різних матеріалів та оптимізовану структуру для забезпечення максимального ефекту екранування електромагнітних полів

Багатошарові електромагнітні екрани використовуються в радіoeлектроніці для екранування електронних компонентів від зовнішніх електромагнітних впливів та запобігання перешкодам в роботі приладів. Вони можуть бути використані в таких галузях, як телекомунікації, медична техніка, аерокосмічна техніка, а також в інших галузях, де необхідна електромагнітна сумісність та захист від електромагнітних перешкод. Такі екрани можуть бути використані для екранування комп'ютерів, мобільних пристроїв, акустичних систем, датчиків, антен та інших пристроїв.

Існує багато технологій для виготовлення багатошарових електромагнітних екранів в радіoeлектроніці. Ось деякі з них:

1. Технологія відкладення парових металів: ця технологія використовується для виготовлення тонких плівок металу, таких як алюміній, мідь, золото, срібло і т.д., на поверхні підкладки. Відкладення металевої пари здійснюється в вакуумі, що забезпечує створення тонкої металевої плівки на поверхні підкладки.

2. Технологія гальванічного осадження: ця технологія використовується для виготовлення тонких металевих плівок, використовуючи електролітичний метод. Електричний струм пропускається через електроліт, що містить іони металу, який потрібно відкласти на поверхню підкладки.

3. Технологія друкування технології: ця технологія використовується для друкування тонких шарів екрануючих матеріалів на поверхню підкладки. Це може бути зроблено за допомогою різноманітних технологій друкування, таких як струменевий друк, лазерний друк, сітчастий друк та інші.

4. Технологія ламінації: ця технологія використовується для створення багатошарових екранів з використанням тонких плівок екрануючих матеріалів та діелектричних матеріалів. Тонкі плівки екрануючих матеріалів закладаються між шарами діелектрика і об'єднуються в єдину структуру шляхом ламінації.



Технологія випаровування: використовується для виробництва тонких плівок на поверхнях екранів. Процес полягає в тому, що металевий матеріал (наприклад, мідь, алюміній або нікель) нагрівається до високої температури, де він перетворюється на пари. Потім ці пари осідають на поверхні екрану, утворюючи тонку металеву плівку.

Для випаровування використовують спеціальні установки, які забезпечують контроль температури та тиску в процесі випаровування. Це дозволяє отримувати плівки з потрібною товщиною та якістю, що є важливим для створення ефективних багатошарових електромагнітних екранів в радіoeлектроніці.

Володимир Синюк проводив дослідження в галузі електромагнітної сумісності та розробки багатошарових електромагнітних екранів. У своїх дослідженнях він вивчав різні методи та технології виготовлення багатошарових екранів, а також їх ефективність у забезпеченні електромагнітної сумісності та екрануванні від електромагнітних полів.

Один з його дослідів був присвячений розробці багатошарових екранів для промислового використання, які мають високу ефективність у забезпеченні електромагнітної сумісності. У рамках цього дослідження він використовував різні методи виготовлення екранів, такі як напилення та гальванічне осадження, і вивчав їх властивості та характеристики.

Також вчений досліджував можливості використання спеціальних матеріалів, таких як феромагнітні матеріали, для виготовлення багатошарових екранів. Він встановив, що використання таких матеріалів може покращити ефективність екранування та зменшити вплив електромагнітних полів на електронні пристрої.

У своїх дослідженнях акцентував увагу на важливості розробки ефективних методів виробництва багатошарових екранів, які були б доступні для виробництва на промисловій основі та забезпечували високу ефективність екранування.

Розвиток технологій екранування привів до створення багатошарових екранів, які представляють собою вдосконалену та оптимізовану конструкцію для досягнення максимального ефекту екранування електромагнітних полів. Ці екрани використовують комбінацію різних матеріалів та шарів, що сприяє покращенню ефективності екранування та зниженню електромагнітної інтерференції.

Незважаючи на розвиток нових матеріалів, впродовж великого проміжку часу найпопулярнішими матеріалами для багатошарових екранів залишається

мідь та сталь. Сталь має розташовуватися центральним шаром, зазвичай це сталь 30, із  $\mu \approx 30 - 40$ . Зовнішні шари зазвичай це мідь. Така послідовність шарів при товщині по 0,1 мм забезпечує ефективність  $B \approx 40 - 48$  дБ, відносно 1 мВ, на частотах від сотень кГц до десятків (інколи декількох сотень) ГГц. Коефіцієнт екранування трьохшарового екрану розраховується за формулою:

$$B_{\Sigma} = 20 \lg \left| \frac{1}{S_1} \right| + 20 \lg \left| \frac{1}{S_2} \right| + 20 \lg \left| \frac{1}{S_3} \right|$$

Коефіцієнт екранування  $B_{\Sigma}$  вимірюється у дБ[18].

### 3.2 Технології виробництва багатошарових електромагнітних екранів

Основна ідея багатошарових екранів полягає в тому, щоб використовувати кожен шар для виконання конкретної функції. Наприклад, перший шар може бути відповідальним за відбивання електромагнітних хвиль, другий - за поглинання, а третій - за розсіювання. Така комбінація шарів дозволяє досягти максимального покращення ефекту екранування.

Багатошарові екрани мають кілька переваг порівняно з одношаровими структурами. Вони забезпечують вищу ефективність екранування за рахунок використання різних матеріалів та шарів з різними властивостями. Кожен шар може бути спеціально налаштованим для максимального зниження передачі електромагнітних полів через екран. Багатошарові екрани також можуть бути більш компактними і легкими, що робить їх ідеальними для використання в різних електронних пристроях.

Використання багатошарових екранів є особливо важливим у сучасних технологічних рішеннях, таких як мобільні телефони, комп'ютери, планшети та інші пристрої, які мають високу електромагнітну чутливість. Вони дозволяють знизити вплив електромагнітних перешкод та забезпечують надійну роботу електроніки в умовах забрудненого електромагнітного середовища.

Однак, варто враховувати, що розробка та виготовлення багатошарових екранів можуть бути складними технологічними процесами, оскільки потрібно дотримуватись високих стандартів якості та точності під час нанесення та взаємодії шарів. Також важливим є розробка оптимальної структури шарів та вибір підходящих матеріалів для досягнення найкращих результатів екранування.

Отримання тонких плівок для застосування в екрануванні в радіотехніці є важливою технологічною галуззю. Дослідження у цій галузі зосереджені на розвитку нових методів отримання тонких плівок з високою якістю та ефективністю екранування.

Одним з методів отримання тонких плівок є метод напилення. Цей метод заснований на випарюванні металевого матеріалу та його осіданні на поверхні матеріалу, який потрібно покрити. Цей метод дає можливість отримувати плівки з різноманітних матеріалів з високою якістю та ефективністю екранування.

Інший метод - метод хімічного осадження - забезпечує отримання плівок з високою якістю та уніфікованістю. Цей метод заснований на реакції хімічного осадження, при якому іони металу осідають на поверхні матеріалу.

Також використовують методи електроосадження, лазерного осадження та інші методи отримання тонких плівок. Дослідження у цій галузі спрямовані на розробку нових технологій та методів отримання тонких плівок з високою ефективністю екранування

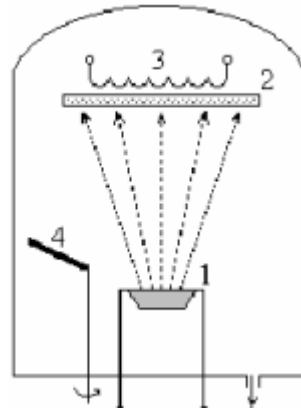
Юрій Францевич Зіньковський у своїх дослідженнях довів, що багатошарові електромагнітні екрани є ефективними засобами екранування електромагнітних полів від несприятливого впливу. Він вважав, що багатошарові екрани забезпечують високий рівень ефективності екранування завдяки спеціальній структурі, яка дозволяє зменшити проникнення електромагнітних хвиль у внутрішні простори пристроїв і систем.

Вважав, що багатошарові електромагнітні екрани можуть бути використані для захисту від шумів та перешкод в радіоелектронних пристроях та системах зв'язку. Він активно працював над вдосконаленням методів виготовлення багатошарових екранів та їх застосуванням в різних галузях науки та техніки.

У своїх наукових публікаціях, Володимир Синюк зазначав, що багатошарові екрани можуть забезпечити високий рівень екранування на широкому діапазоні частот, що робить їх більш універсальними порівняно зі звичайними екранами. Він також вказував на важливість правильного добору матеріалів та конструкції для досягнення оптимального рівня екранування.

Одним із найпопулярніших способів виготовлення багатошарових електромагнітних екранів є метод тонкоплівкової технології. Процес полягає в нанесенні тонких шарів різних матеріалів на скло або іншу підкладку за допомогою вакуумного осадження, хімічного осадження або інших методів.

Термовакuumний метод отримання тонких плівок заснований на нагрівання у вакуумі речовини до його активного випаровування та конденсації випарених атомів на поверхні підкладки. Сутність методу термовакuumного напилення можна пояснити за допомогою спрощеної схеми установки, представленої рисунку 3.1.



1 – Випарювач, 2 – підложка, 3 – нагрівач, 4 – заслонка

Рисунок 3.1 – Схема встановлення термовакуумного напилення

Речовину, що підлягає напиленню, поміщають у пристрій нагрівання (випарювач) 1, де воно за досить високої температури інтенсивно випаровується. У вакуумі, що створюється всередині камери спеціальними насосами, молекули випареної речовини швидко поширюються в навколишній простір, досягаючи, зокрема, поверхні підкладки 2. Якщо температура підкладки не перевищує критичного значення, відбувається конденсація речовини на підкладці, тобто зростання плівки. На початковому етапі випаровування, щоб уникнути забруднення плівки за рахунок домішок, адсорбованих поверхнею речовини, що випаровується, а також для виведення випарника на робочу температуру використовується заслінка 4, що тимчасово перекриває потік речовини на підкладку. Залежно від функціонального призначення плівки у процесі осадження контролюється час напилення, товщина, електричний опір або інший параметр. Після досягнення заданого значення параметра заслінка знову перекриває потік речовини, і процес зростання плівки припиняється. Нагрівання підкладки за допомогою нагрівача 3 перед напиленням сприяє десорбції адсорбованих на її поверхні атомів, а в процесі осадження створює умови для покращення структури зростаючої плівки. Безперервно працююча система відкачування підтримує вакуум близько  $10^{-4}$  Па.

Якщо потрібно отримати плівку з багатокомпонентної речовини, використовують кілька випарювачів. Оскільки швидкості випаровування у різних компонентів різні, забезпечити відтворюваність хімічного складу одержуваних багатокомпонентних плівок досить складно. Тому метод термовакуумного напилення використовують переважно для чистих металів.

Термовакуумний метод напилення тонких плівок відрізняється великою різноманітністю як за способами розігріву речовини, що випаровується, так і

за конструкціями випарників. Розігрів речовини до температур, за яких воно інтенсивно випаровується, здійснюють електронним або лазерним променем, НВЧ-випромінюванням, за допомогою резистивних нагрівачів (теплопередачею від нагрітої спіралі або шляхом безпосереднього пропускання електричного струму через зразок із потрібної речовини).

Іншим способом отримання плівок є іонно-плазмовий метод.

Іонно-плазмові методи набули широкого поширення у технології електронних приладів завдяки своїй універсальності та ряду переваг у порівнянні з іншими технологічними методами. Універсальність визначається тим, що за їх допомогою можна здійснювати різні технологічні операції: формувати тонкі плівки на поверхні підкладки, трукіти поверхню підкладки з метою створення на ній заданого малюнка інтегральної мікросхеми, здійснювати очищення поверхні.

Для оцінки ефективності екранування проводять симуляції електромагнітної сумісності, це є необхідним кроком у розробці та виробництві електронних пристроїв і систем. Ось деякі ключові причини, що пояснюють необхідність проведення таких симуляцій:

Виявлення потенційних проблем: Симуляції електромагнітної сумісності дозволяють ідентифікувати можливі проблеми, пов'язані з електромагнітними перешкодами, які можуть виникнути під час експлуатації електронних пристроїв. Це дозволяє розробникам прийняти відповідні заходи для запобігання цим проблемам та забезпечити надійну роботу пристроїв у реальних умовах.

Визначення ефективності екранування: Симуляції дозволяють оцінити ефективність екранування, яке використовується для зниження впливу електромагнітних перешкод. Шляхом моделювання взаємодії електромагнітних полів з екрануючими структурами можна визначити оптимальні параметри екранування, такі як матеріали, товщина шарів та їх розташування, для забезпечення максимального поглинання та розсіювання електромагнітної енергії.

Врахування взаємодії компонентів системи: Електронні системи складаються з багатьох компонентів, які можуть взаємодіяти між собою та створювати електромагнітні перешкоди. Симуляції електромагнітної сумісності дозволяють враховувати цю взаємодію і виявляти можливі конфлікти та взаємовпливи між компонентами. Це допомагає розробникам виявити та вирішити проблеми ще на етапі проектування, що знижує ризик негативного впливу на кінцеву функціональність системи.

Виконання нормативних вимог: Багатошарові екрани та електронні пристрої повинні відповідати встановленим нормативним вимогам щодо електромагнітної сумісності. Симуляції дозволяють перевірити, чи відповідають пристрої цим вимогам, і в разі потреби внести необхідні зміни до їх конструкції або екранування.

Усі ці фактори підкреслюють важливість проведення симуляцій електромагнітної сумісності для забезпечення якості, надійності та відповідності електронних пристроїв та систем стандартам електромагнітної сумісності. Симуляції дозволяють виявити та вирішити потенційні проблеми ще на етапі проектування та розробки, що сприяє зниженню ризиків та економії часу та коштів у виробництві.

Існує багато програм для симуляції електромагнітної сумісності. Деякі з них включають:

1. CST Studio Suite: це програмне забезпечення для симуляції електромагнітних полів, яке дозволяє моделювати різні структури і антени.
2. ANSYS: ця програма використовується для симуляції електромагнітної сумісності, а також для інших інженерних задач, таких як механіка та термодинаміка.
3. HFSS: ця програма використовується для симуляції електромагнітних полів в мікрохвильових пристроях та інших електронних системах.
4. COMSOL Multiphysics: це програмне забезпечення для симуляції фізичних процесів, включаючи електромагнітну сумісність.
5. Sonnet: це програмне забезпечення для моделювання мікрополів, яке використовується для симуляції антен та інших електронних систем.

Проведення симуляцій електромагнітної сумісності та використання багатошарових екранів дозволяє визначити оптимальну конфігурацію та параметри екранування для забезпечення надійного захисту від електромагнітних перешкод.

Симуляції електромагнітної сумісності зазвичай базуються на методі скінченних елементів або методі подвійних дзеркал. Вони дозволяють аналізувати взаємодію електромагнітних полів з багатошаровими екранами, оцінювати ефективність екранування та ідентифікувати можливі проблеми, такі як незадовільне приглушення електромагнітного шуму або витіки сигналів.

За допомогою симуляції можна встановити оптимальну товщину та компоненти кожного шару багатошарового екрану, а також оптимальні розташування та конфігурацію шарів. Це дозволяє досягти максимального ефекту екранування, забезпечити надійний захист від електромагнітних перешкод та зберегти нормальне функціонування електронних пристроїв.

У висновку можна зазначити, що симуляція електромагнітної сумісності та використання багатошарових екранів є потужним інструментом для розробників електроніки. Вона допомагає попередньо оцінити ефективність та надійність екранування, виявити можливі проблеми та вирішити їх на етапі проектування. Такий підхід сприяє покращенню якості електронних систем і пристроїв, зниженню впливу електромагнітних перешкод та забезпеченню стабільної роботи у різних умовах експлуатації.

Таким чином, багатошарові екрани є результатом еволюції технологій екранування та застосування електромагнітних матеріалів. Шлях від електромагнітних екранів до багатошарових екранів полягає в оптимізації структури та комбінації різних матеріалів для досягнення максимального рівня ефективності екранування електромагнітних полів у сучасних електронних пристроях та системах.



## Розділ 4. Використання електромагнітних екранів

### 4.1 Вимірювання параметрів екрану в камері електромагнітної сумісності

Застосування електромагнітних екранів має велике значення для забезпечення безпеки, якості сигналу та надійності пристроїв у сучасному цифровому світі. Вони використовуються в широкому спектрі пристроїв, від мобільних телефонів та комп'ютерів до медичних пристроїв та військової техніки. Впровадження електромагнітних екранів допомагає забезпечити ефективну роботу цих пристроїв, захистити їх від впливу електромагнітних перешкод та забезпечити безпеку користувачів.

Зіньковський Юрій Францевич в своїх наукових працях описує різноманітні приклади використання електромагнітних екранів, зокрема:

1. В радіотехніці для захисту від несанкціонованого доступу до електронних пристроїв.
2. В медицині для екранування від електромагнітних полів медичного обладнання, що можуть вплинути на його функціонування.
3. В автомобільній промисловості для захисту від електромагнітних перешкод та збільшення імунітету електронної системи автомобіля.
4. В аерокосмічній промисловості для захисту електронних пристроїв від впливу радіоактивного випромінювання та інших шкідливих чинників.
5. В електроніці для екранування електромагнітних полів, що створюються електронними пристроями, від інших пристроїв, що можуть впливати на їх функціонування.
6. У військовій техніці для захисту від електромагнітних перешкод та підвищення невидимості на радіолокаційних засобах.

Оскільки екранування не буває ідеальним, є необхідність тестувати сумісність готових виробів, перед тим, як випускати пристрій у масове виробництво. Саме для цього існує камера ЕМС. Це екрановане приміщення із приймальною чи випромінювальною антеною, в залежності від призначення. За розмірами такі камери можуть бути від малих ящиків до великих кімнат. Окрім антени, всередині камери знаходиться стенд для приладу, що випробовується та калібрувальна апаратура. Також всередині, зазвичай, розташовані поглинальні «піраміди» для забезпечення безеховості камери.

Зінковський вважає, що камери електромагнітної сумісності (англ. *electromagnetic compatibility chambers*, EMC chambers) є незамінним інструментом для дослідження та валідації різноманітних електронних пристроїв і систем.

Зокрема, вказує на те, що камери електромагнітної сумісності дозволяють проводити точні вимірювання параметрів електромагнітного поля, які дозволяють оцінювати рівень електромагнітних перешкод та емісій, які генеруються пристроями.

Крім того, він відзначає, що камери електромагнітної сумісності дозволяють імітувати різноманітні умови експлуатації пристроїв, такі як електромагнітні перешкоди від інших пристроїв, різні рівні шуму та забезпечувати реалістичне середовище для тестування пристроїв на електромагнітну сумісність.

Отже, камери електромагнітної сумісності є необхідним інструментом для дослідження та валідації електронних пристроїв та систем, які повинні працювати в умовах реального електромагнітного середовища.

Камеру електромагнітної сумісності винайшов Девід Чемберлін у 1952 році.

Перші приклади використання камер електромагнітної сумісності (КЕС) відносяться до 1940-х років. Наприклад, вони використовувалися для тестування радіоприймачів та передавачів для забезпечення високої якості сигналу, а також для вимірювання електромагнітних випромінювань від обладнання. КЕС були особливо корисні для військових застосувань, де вимоги до електромагнітної сумісності були особливо високі. Сьогодні КЕС застосовуються в різних галузях, таких як автомобільна промисловість, літакобудування, медичне обладнання та телекомунікації, де важливо забезпечити електромагнітну сумісність між різними електронними пристроями.

Камери електромагнітної сумісності (англ. *Electromagnetic Compatibility chambers*, EMI chambers) використовуються для проведення різних електромагнітних тестів на електронних пристроях, системах та компонентах з метою забезпечення їхньої сумісності з електромагнітним середовищем. Ось декілька прикладів використання камер електромагнітної сумісності:

1. Тестування телекомунікаційного обладнання: Камери електромагнітної сумісності використовуються для тестування телекомунікаційного обладнання, такого як смартфони, роутери, супутникові системи, Wi-Fi обладнання та інше. Це допомагає виробникам перевірити,

наскільки добре їхні продукти взаємодіють з електромагнітним середовищем та дозволяє виявити та виправити можливі проблеми.

2. Тестування електронних пристроїв: Камери електромагнітної сумісності також використовуються для тестування різних електронних пристроїв, таких як комп'ютери, ноутбуки, медичне обладнання, автомобільна електроніка та інше. Це допомагає забезпечити, що ці пристрої не будуть перешкоджати роботі інших електронних пристроїв або систем.

3. Тестування автомобільної електроніки: Камери електромагнітної сумісності використовуються для тестування електроніки, яка використовується в автомобілях. Наприклад, це може бути система безпеки, система управління двигуном, радіо або навігаційна система. Це допомагає забезпечити безпеку та надійність автомобі

Камери електромагнітної сумісності в Україні використовуються для перевірки електронних пристроїв на відповідність стандартам електромагнітної сумісності, а також для випробувань радіоелектронних засобів військового призначення. Наприклад, Український інститут електромагнітної сумісності використовує камеру електромагнітної сумісності для проведення випробувань електронної апаратури на відповідність стандартам безпеки в авіаційній та космічній промисловості. Також камери електромагнітної сумісності використовуються в українських військових дослідних центрах для випробувань військової техніки на відповідність стандартам електромагнітної сумісності та відсіювання вразливих до електромагнітних перешкод компонентів і систем.



Рисунок 4.1 – Приклад внутрішнього устаткування камери ЕМС

Також у камері ЕМС передбачена можливість для встановлення освітлюваних приладів, приладів візуального нагляду за пристроєм, що тестується та вентиляції.

Стенд для приладу повинен знаходитися у точно визначеному місці, попередньо відкаліброваних, для забезпечення повторюваності експериментів.

Калібрування системи відбувається раз у певний час, визначений виробником камери, для отримання сертифікату придатності до випробувань.



Рисунок 4.2 – Приклад обладнання для калібрування

Для дослідження використовувалася велика камера ЕМС розміром (9230 \* 6530 \* 6000) мм. В даній камері стенд для випробувань знаходиться на відстані 3 м від приймальної антени. Через необхідність визначення саме загальної ефективності камери, відстань між антенами складала 12 м. Приклад креслення кімнати, в якій проводився експеримент наведений на рисунку 4.3.

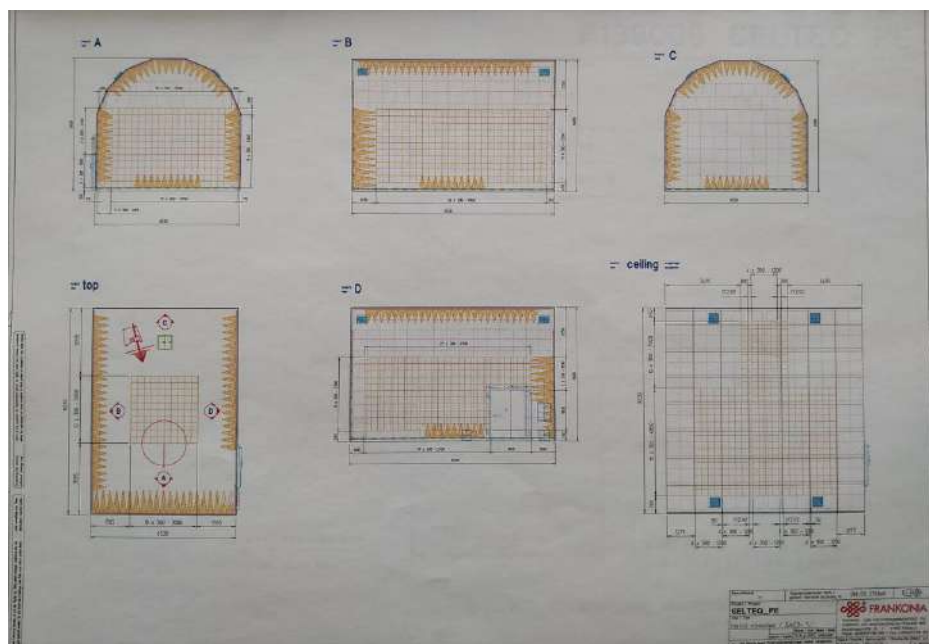


Рисунок 4.3 – Креслення камери ЕМС

Основний рухомий елемент, від якого особливо залежить ефективність камери ЕМС – це входні двері до камери. Помилки у проектуванні чи зборі, зайвий бруд чи нещільність прилягання можуть сильно зменшити ефективність екранування. Саме для нівелювання цих факторів використовуються спеціально створені для таких потреб двері. Ця система називається Z-spring doors. Приклад конструкції наведено на рисунку 4.4.

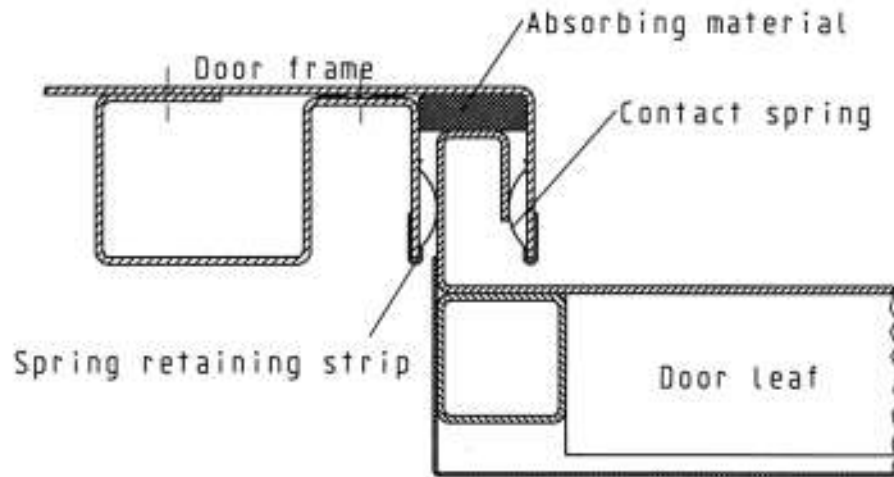


Рисунок 4.4 – Схема конструкції замку дверей

Z-spring doors – це спеціальні двері для електромагнітних екранів, які використовуються для захисту від електромагнітних перешкод і забезпечення електромагнітної сумісності. Їх назва походить від форми пружини, яка використовується для забезпечення надійного контакту між дверима та екраном.

Z-spring doors мають деякі переваги порівняно з іншими типами дверей, такі як надійність контакту між дверима та екраном, легкість відкривання та закривання, а також мінімальну електромагнітну взаємодію з екраном. Вони також можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як сталь, алюміній або мідь, для забезпечення оптимальної ефективності екранування в залежності від потреб застосування.



Рисунок 4.5 – Схематичне зображення замку дверей

Найчастіше погіршення характеристик у цьому виді дверей відбувається через нашарування пилу та бруду, через що механізм дверей по периметру необхідно постійно тримати в чистоті.

Для зменшення впливу ззовні на дроти, які використовуються для обладнання, використовуються спеціальні фільтри. Принципова схема яких зображена на рисунку 4.6. У даній камері ці фільтри розташовуються ззовні, тому також потребують додаткового екранування від зовнішнього впливу. Приклад встановлення зображено на рисунку 4.7.

Всі електричні прилади, такі як освітлення, вентиляція, пожежні датчики, інші системи керування та допоміжне обладнання мають окремі кола живлення, розташовані так, аби мати найменший шлях всередині камери для зменшення шумів всередині.

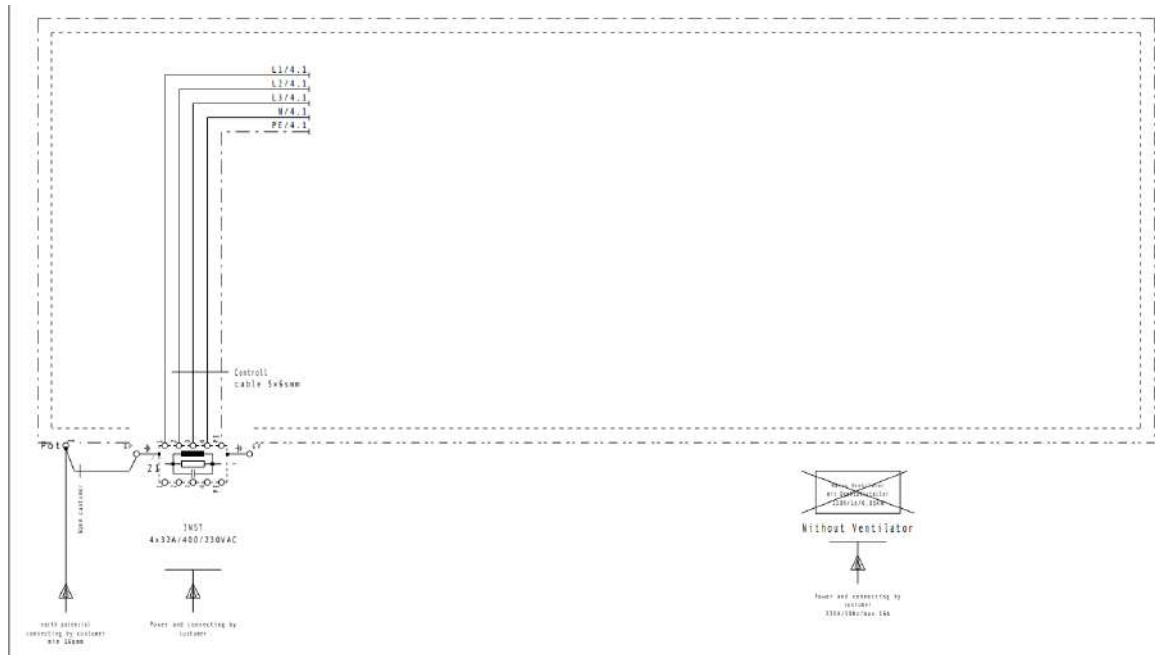


Рисунок 4.6 – Електричка схема встановлення фільтрів

Дуже важливу роль для нормальної роботи камери ЕМС відіграє заземлення. Заземлення екрану дозволяє зменшити рівень інтерференції, що може виникнути через дії зовнішніх електромагнітних полів. Якщо екран не заземлений, то зовнішні поля можуть відбиватися від екрану, утворюючи додаткові електромагнітні поля, які можуть вплинути на роботу електронних пристроїв, які знаходяться за екраном.

Крім того, заземлення екрану допомагає зменшити ризик виникнення електростатичного розряду, що може бути небезпечним для електронних пристроїв та для людей, які працюють з ними. Електростатичний розряд може призвести до виникнення іскр і підпалення оточуючих предметів. Заземлення екрану дозволяє зменшити електростатичний заряд, що може накопичуватися на екрані внаслідок різних процесів, що відбуваються в електронних пристроях.





Рисунок 4.7 – Фільтр завод в корпусі

У даному випадку, заземлення від камери ЕМС виведене на загальне коло заземлення будівлі, опором менше 2 Ом.

Всередині кімната обладнана матеріалом, який поглинає відлуння. Після цього розташовується шар феритових пластин. Останні розташовуються на каркасі, з іншої сторони кріпиться зовнішня обшивка із сталі. Товщина фериту складає 5 мм. Прошарок діелектрику має складати не більше 100 мм, зовнішня обшивка складає 2 мм.

Основний екрануючий ефект надає саме шар багат шарових пластин, які мають багат шарову структуру, серед яких є мідні шари та шари з фериту, то до встановлення цього шару виробник надає найсуворіші вимоги до встановлення. Шар діелектрику позаду пластин забезпечує ізолюваність від контактів із каркасом чи обшивкою. Також поглинання відлуння спеціальними

поглинаючими пірамідами зменшують вплив зсередини камери. Вони можуть бути різних розмірів, в залежності від потреб, передбачено встановлення пірамід розміром 130 мм, 300 мм, 500 мм, 750 мм.



Рисунок 4.8 – Приклад шарів камери ЕМС

Всередині камери розташована антена, випромінювальна або приймальна, в залежності від призначення камери, стенд для обладнання, яке тестується, стенд для техніки, що випробовується, апаратура для контролю експериментів, наприклад, відеокамера.

Для безпеки інженера та перешкоджання поширенню електромагнітних завад при відкритті дверей генератори сигналів автоматично вимикаються. При необхідності знаходитися всередині камери під час проведення експерименту, всередині є зручна ручка, виконана з діелектричного матеріалу для забезпечення точності експерименту.

Оскільки при випробуванні електронних пристроїв всередині камери ЕМС може виникнути пожежа, всередині камери розташовані системи протипожежної безпеки, такі як пожежна сигналізація, яка дозволяє одразу припинити подачу електроенергії в камеру, окремі датчики тепла та токсичних речовин, які можуть виділятися і без пожежі.

Також для безпеки камери великого розміру обладнані системою вентиляції, яка як надає свіже повітря всередину камери, так і у разі виникнення пожежі чи виділення токсичних речовин в автоматичному режимі вивести шкідливі речовини з камери ЕМС.

У даному експерименті використовувалося 2 антени. Для випромінювання сигналу використовувалася антена HL046E компанії rohde-schwarz. Це лог-періодична антена з широким діапазоном частот від 80 МГц до 3 ГГц.

Вона має відмінні широкосмугові характеристики, діаграму випромінювання, яка наближено симетрична та має високий коефіцієнт підсилення.

Високий коефіцієнт підсилення антени означає, що в порівнянні з існуючими системами, необхідні значення магнітного поля можуть бути досягнуті з меншою потужністю підсилувача.

Ця антена була розроблена спеціально для використання у випробувальних камерах, через що має компактні розміри, широкий діапазон частот та складний механізм складання.

Антена має лінійну поляризацію та вхідний імпеданс в 50 Ом. Діаграма спрямованості зображена на рисунку 4.9.

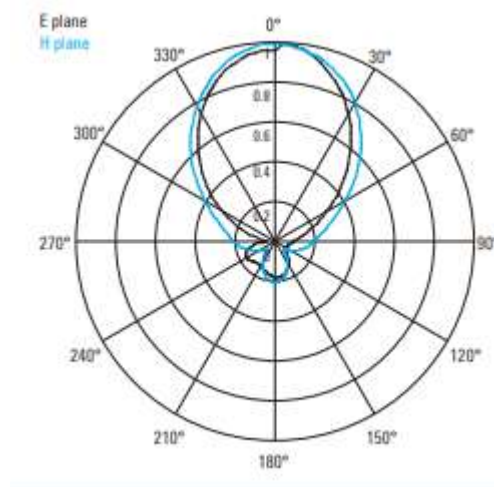


Рисунок 4.9 – Діаграма спрямованості антени, що випромінює

Типовий коефіцієнт підсилення зображений на рисунку 4.10.

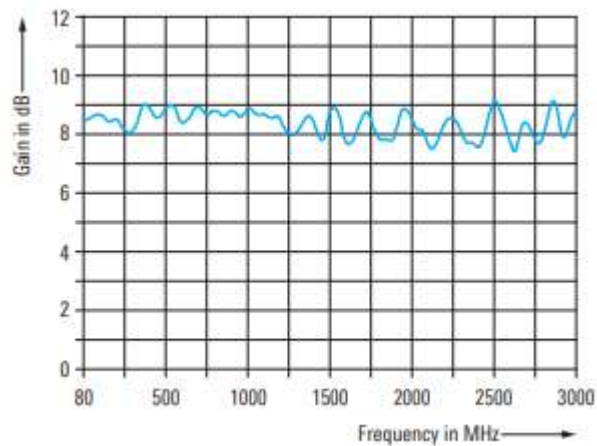


Рисунок 4.10 – Типовий коефіцієнт підсилення антени, що випромінює

Антенa має лінійну поляризацію та вхідний імпеданс в 50 Ом. Діаграма спрямованості має наближено симетричну форму, зображена на рисунку 4.11.

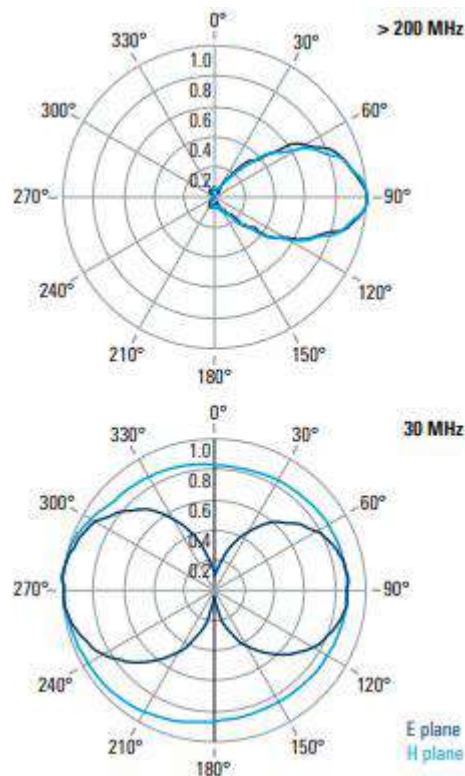


Рисунок 4.11 – Діаграма спрямованості антени, що приймає

При використанні будь-яких електричних приладів завжди є ризик пожежі. Особливо підвищується ризик виникнення пожежі при випробуванні електронних пристроїв в граничних умовах використання.

При випробуваннях на електромагнітну сумісність, а точніше при тестуванні на стійкість до зовнішнього впливу є високий ризик виникнення короткого замикання внаслідок механічних пошкоджень чи недоліків проектування захисту від зовнішнього впливу електронного приладу.

Зазвичай це приводить до виходу з ладу самого приладу, але завжди існує ймовірність виникнення іскри, що може привести до пожежі в камері ЕМС.

Саме на такий сценарій розвитку подій розрахована система пожежного захисту в камерах ЕМС. Вона складається з багатьох компонентів, що дозволяє максимально запобігти поширенню пожежі та убезпечити людей, які взаємодіють із обладнанням.

Одним із основних елементів системи безпеки є датчик пожежі, який включає в себе датчики температури, вуглецю та диму. При спрацюванні будь-якого з цих датчиків одразу відбувається знеживлення усіх систем, які наявні в камері ЕМС.

Оскільки камера ЕМС має забезпечувати повне екранування від електромагнітного випромінювання, корпус камери складається з негорючих матеріалів з усіх боків камери, що унеможливорює розповсюдження пожежі за межі камери ЕМС.

Всі неметалеві елементи конструкції камери ЕМС проектуються з урахуванням можливої пожежі. Тому всі конструктивні елементи проектуються з використанням негорючих матеріалів, або таких, які не виділяють токсичних речовин при горінні. Наприклад, діелектричний матеріал для дверної ручки всередині камери, зазвичай, обирається деревина.

Для тестування камери ЕМС на стійкість до пожежі проводяться тестові пожежні випробування кожного елемента камери окремо, створюючи найбільш сприятливі умови для поширення вогню.

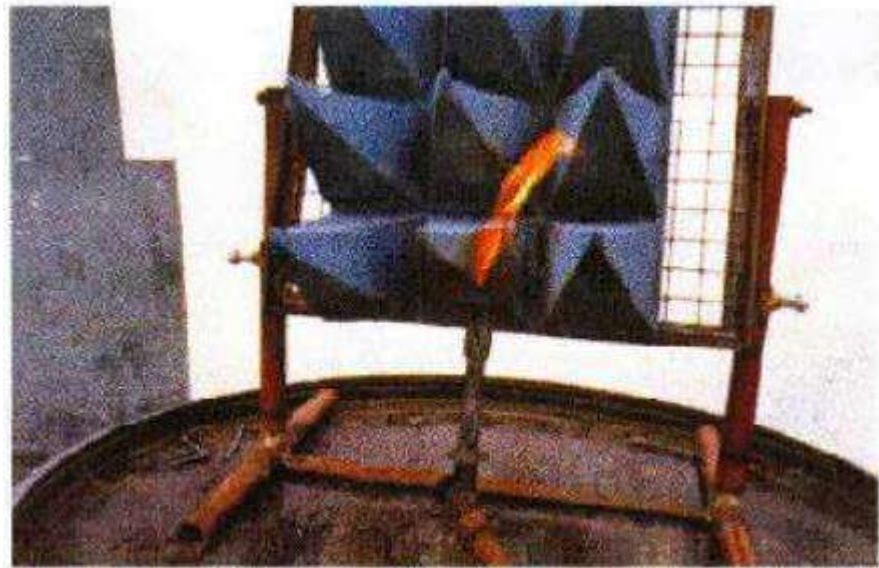


Рисунок 4.12 – Приклад тестування елементів камери ЕМС на пожежну безпеку

Так, наприклад, матеріал для поглинання відлуння, який вкриває більшу частину поверхонь всередині камери ЕМС, тестують на відкритому просторі із використанням горючих матеріалів, як зображено на рисунку.

Після повного вигорання пального, яке використовується для тестування, проводяться дослідження щодо ступеню пошкоджень матеріалу, для визначення ступеню пожежостійкості матеріалу.

На рисунку 4.13 зображено матеріал, який використовується для поглинання відлуння після тестової пожежі.

Для забезпечення виводу шкідливих речовин від процесу горіння камера облаштована системою вентиляції, що також забезпечує доступ повітря в камеру при нормальному режимі використання.

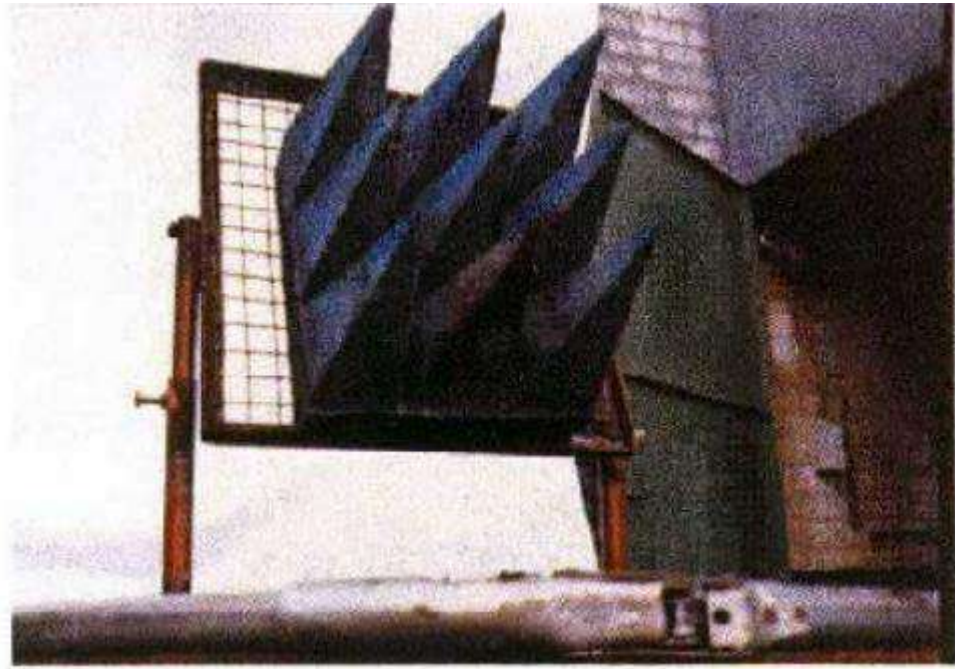


Рисунок 4.13 – Матеріал, поглинаючий відлуння, після пожежі

Як видно з рисунку 4.13, на елементах немає пошкоджень, а лише продукти горіння пального, що свідчить про стійкість матеріалу до відкритого вогню, що також підвищує пожежну безпеку всередині камери ЕМС[19].

Нажаль, система вентиляції – це отвори для надходження повітря, а отже, погіршення характеристик електромагнітного екрану, однієї з найважливіших частин камери ЕМС. Тому, система вентиляції потребує специфічних конструктивних рішень для забезпечення ефективності екрану.

Серед таких особливостей можна зазначити наявність додаткових металевих сіток, додаткових згинів каналів вентиляції, створення шлюзів для дистанційного закриття отворів системи вентиляції.

#### 4.2 Аналіз отриманих результатів

Для перевірки заявлених виробником характеристик ефективності екранування камери ЕМС проведені дослідження із використанням випромінюючої антени ззовні камери та приймальної антени всередині камери.

Заміри проводилися на різних частотах, вільних від використання іншими приладами в момент проведення експерименту, а також на частотах телевізійного мовлення та мережі Wi-Fi.

Через великі розміри антен та складності системи випробувань заміри проводилися всередині камери ЕМС із зачиненою та відчиненими дверима камери.

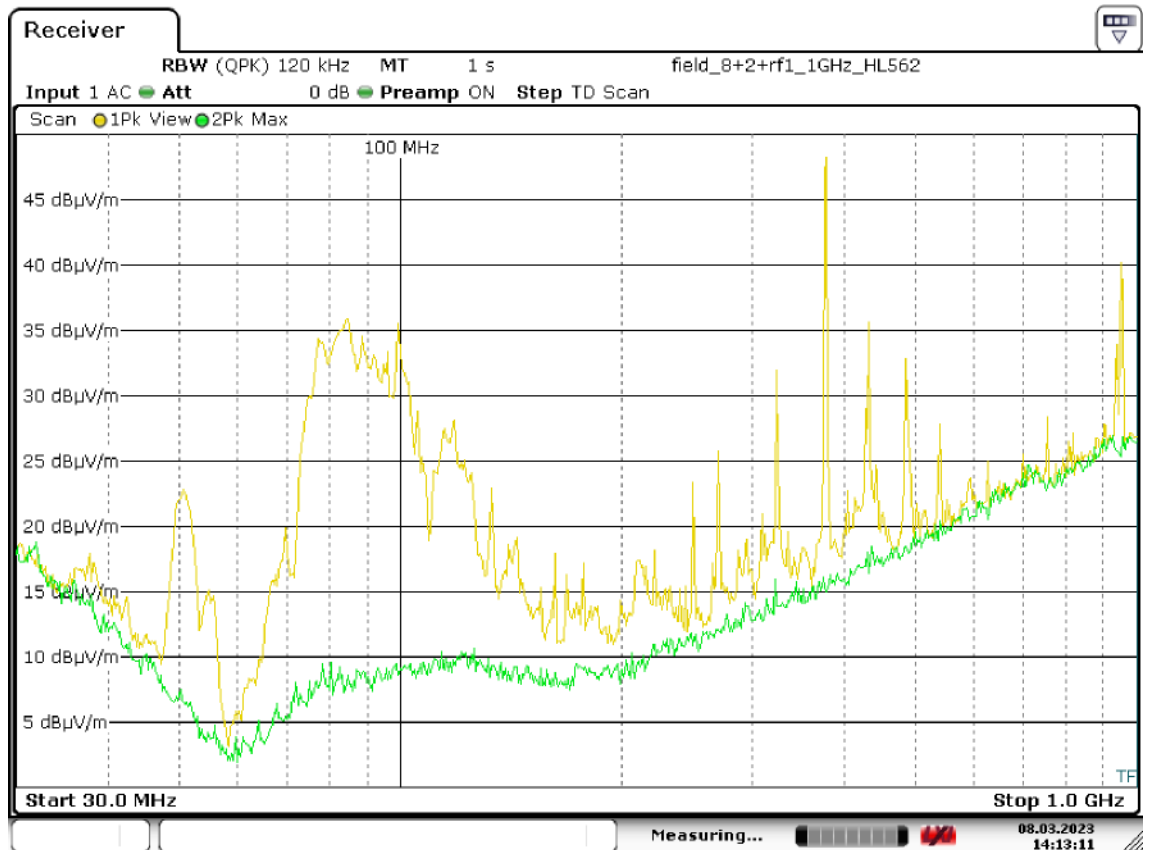
За технічною документацією, виробник заявляє ефективність екранування камери у 100 дБ на всьому діапазоні частот, визначених для проведення тестування приладів, а саме від 30 до 3000 МГц.

На графіках, отриманих експериментальним шляхом, зображене порівняння рівня сигналу з відкритими дверима та закритими для кожної частоти експерименту. Кожна експериментальна частота зображена окрема, окрім частот телемовлення та Wi-Fi, вони присутні на всіх експериментах через неможливість повністю ізолювати лабораторію від даних сигналів.

Дослідження проводилися за вертикальної поляризації та за максимальною потужністю сигналу, яку можна було отримати від системи, за допомогою якої проводився експеримент.

На рисунку 4.14 зображено експеримент з екранування від зовнішніх шумів на частотах від 30 МГц до 1 ГГц, без подачі сигналу.





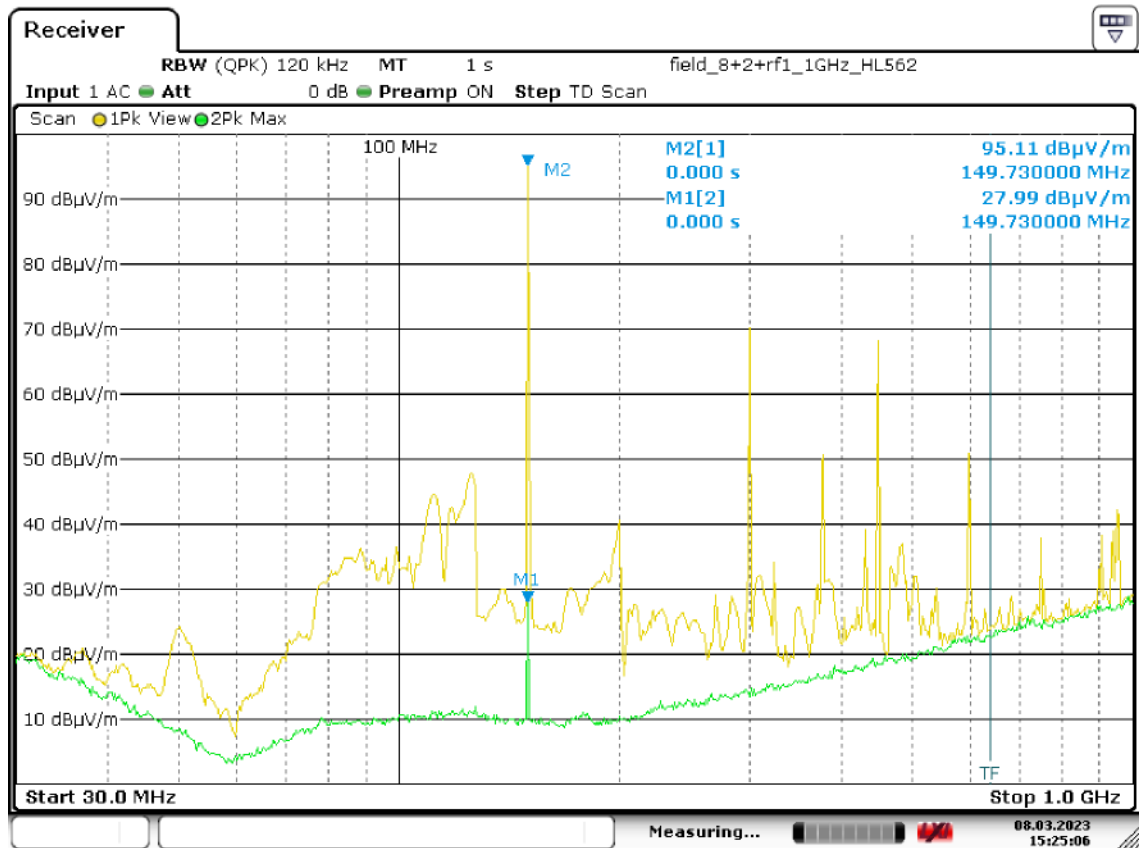
AIR\_80M-1G\_V\_1-opendoor\_2-closeddoor

Date: 8.MAR.2023 14:13:11

Рисунок 4.14 – Графік згасання поля без подачі сигналу у діапазоні 30- 1000 МГц (1Рк – сигнал при відчинених дверях, 2Рк – сигнал при зачинених дверях) в залежності від частоти

Як видно з рисунку 4.14, рівень сингалу зменшився на 25-40 дБ.

Першою частотою для вимірів у даному діапазоні було вирішено взяти 150 МГц. Результати експерименту наведені на рисунку 4.15.



GEN150M\_34VM\_+10MDISTANCE\_1-OPENDOOR\_2-CLOSEDOOR

Date: 8.MAR.2023 15:25:07

Рисунок 4.15 – Графік згасання поля при подачі сигналу на частоті 150 МГц (1Pk – сигнал при відчинених дверях, 2Pk – сигнал при зачинених дверях) в залежності від частоти

На даній частоті вдалося отримати більшу потужність від випромінювальної системи і, як видно з рисунку, екран камери ЕМС не відбив сигнал повністю, а саме зменшив рівень сигналу на 67 дБ, що є менше за заявлений у технічних характеристиках результат.

Останньою частотою для експерименту в діапазоні частот до 1 ГГц було обрано частоту 700 МГц. Результати вимірів зображені на рисунку 4.16.

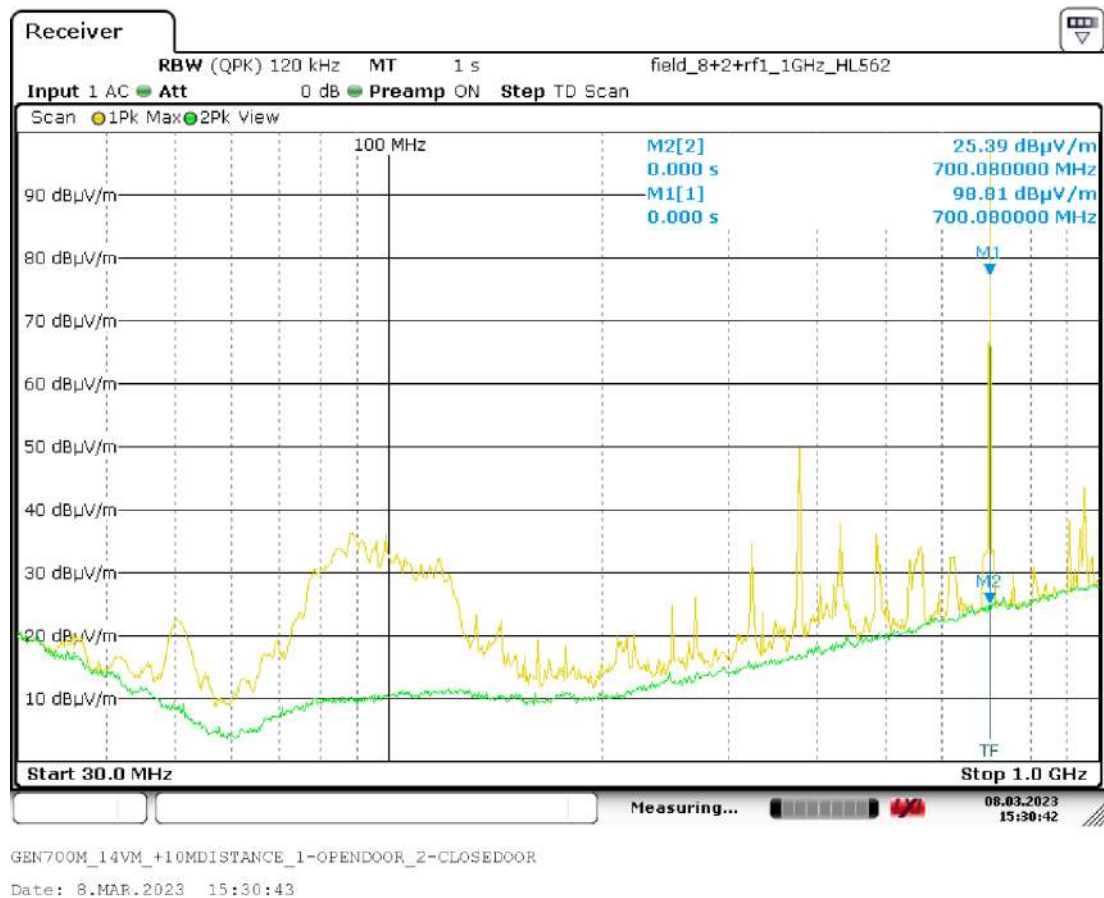


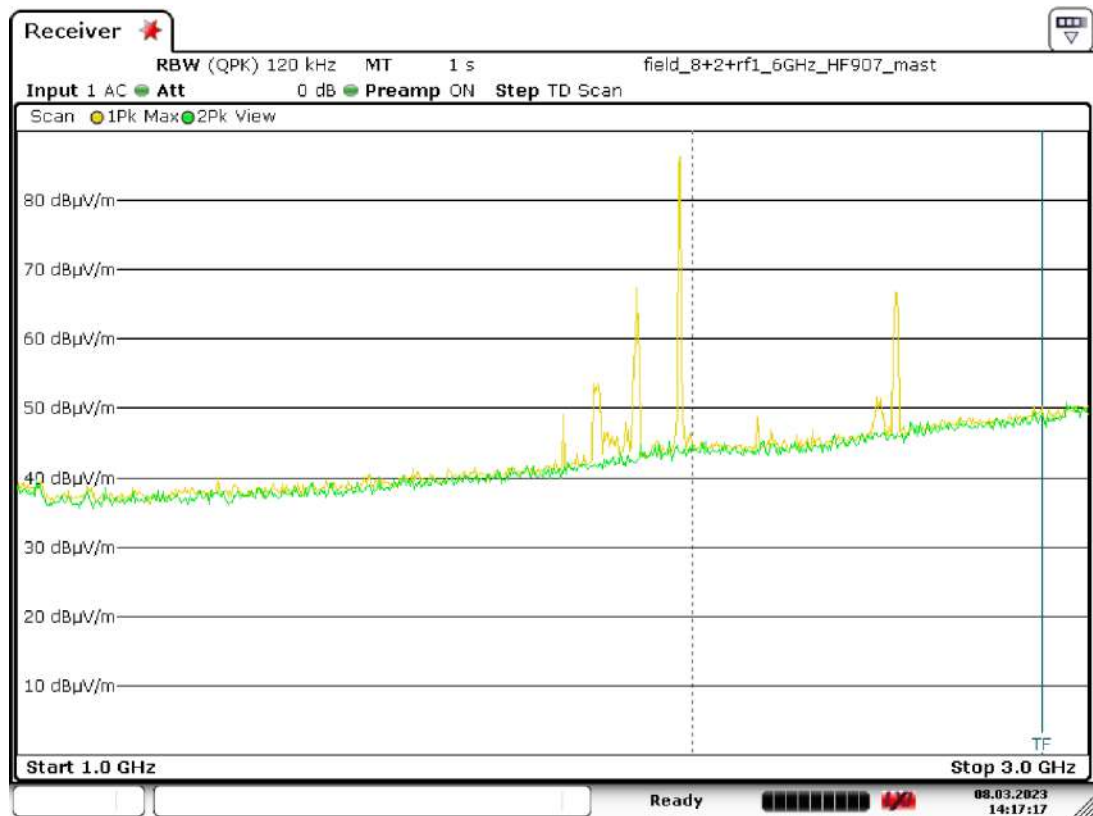
Рисунок 4.16 – Графік згасання поля при подачі сигналу на частоті 700 МГц (1Рк – сигнал при відчинених дверях, 2Рк – сигнал при зачинених дверях) в залежності від частоти

У цьому випадку вдалося забезпечити ще вищий рівень сигналу, ніж у попередніх експериментах і екрани повністю відбили сигнал, рівень сигнал-шум склав 74 дБ. На відміну від попереднього експерименту на частоті у 150 МГц, збільшення напруженості поля з закритими дверима не спостерігалось.

Також можна відмітити забезпечення повного відбиття сигналу телевежі, найбільші показники якого можна побачити на рисунку 4.4, співвідношення сигнал-шум склав до 55 дБ, найкраще це видно на частотах 300 МГц та 450 МГц.

Наступний діапазон дослідження від 1 ГГц до 3 ГГц. У цьому діапазоні не так багато зовнішніх джерел сигналу, а точніше сигнал від Wi-Fi на частоті 2.4 ГГц. Генерування сигналу проводилося на частоті 1.4 ГГц та 2.7 ГГц.

Для початку розглянемо випадок без генерування сигналу.



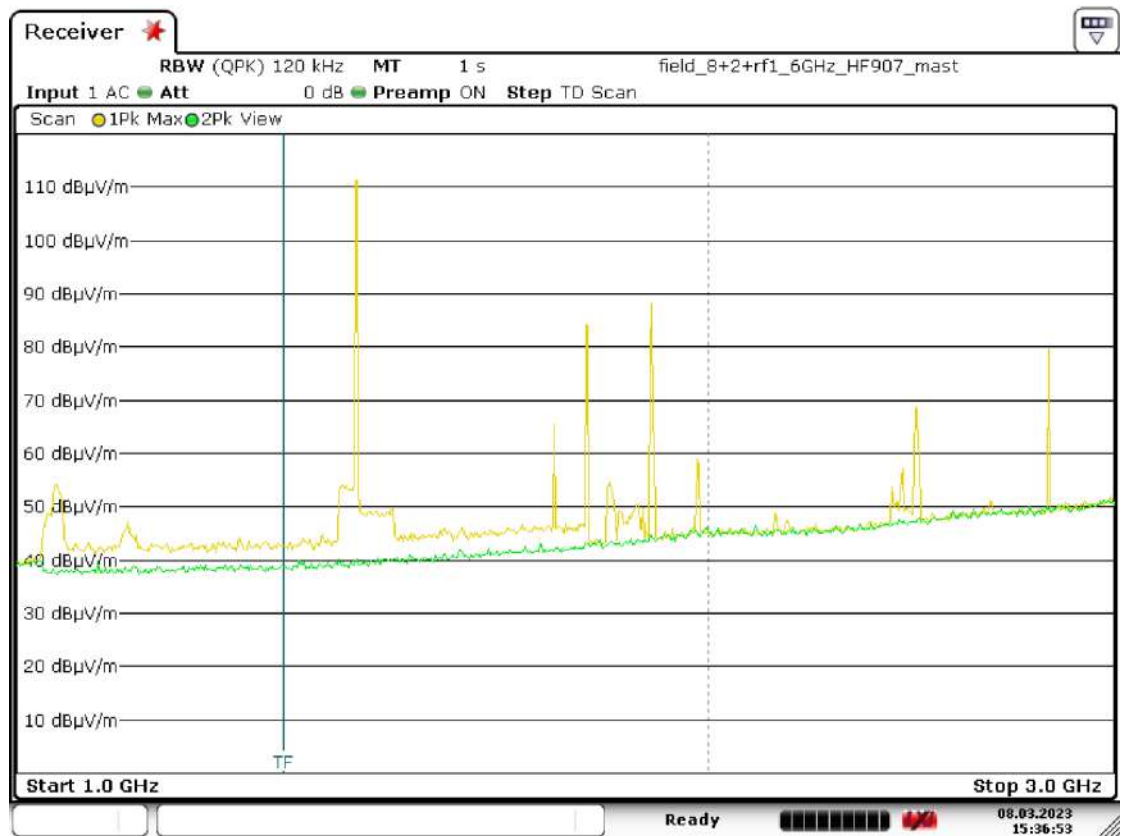
AIR\_1G-3G\_V\_1-opendoor\_2-closeddoor

Date: 8.MAR.2023 14:17:17

Рисунок 4.17 – Графік згасання поля без подачі сигналу у діапазоні 1- 3 ГГц (1Рк – сигнал при відчинених дверях, 2Рк – сигнал при зачинених дверях) в залежності від частоти

Як видно з графіку, екран повністю відбиває сигнал зовнішнього сигналу, забезпечуючи екранування на рівні 50 дБ.

На рисунку 4.18 зображено графік напруженості поля при генерації сигналу на частоті 1.4 ГГц.



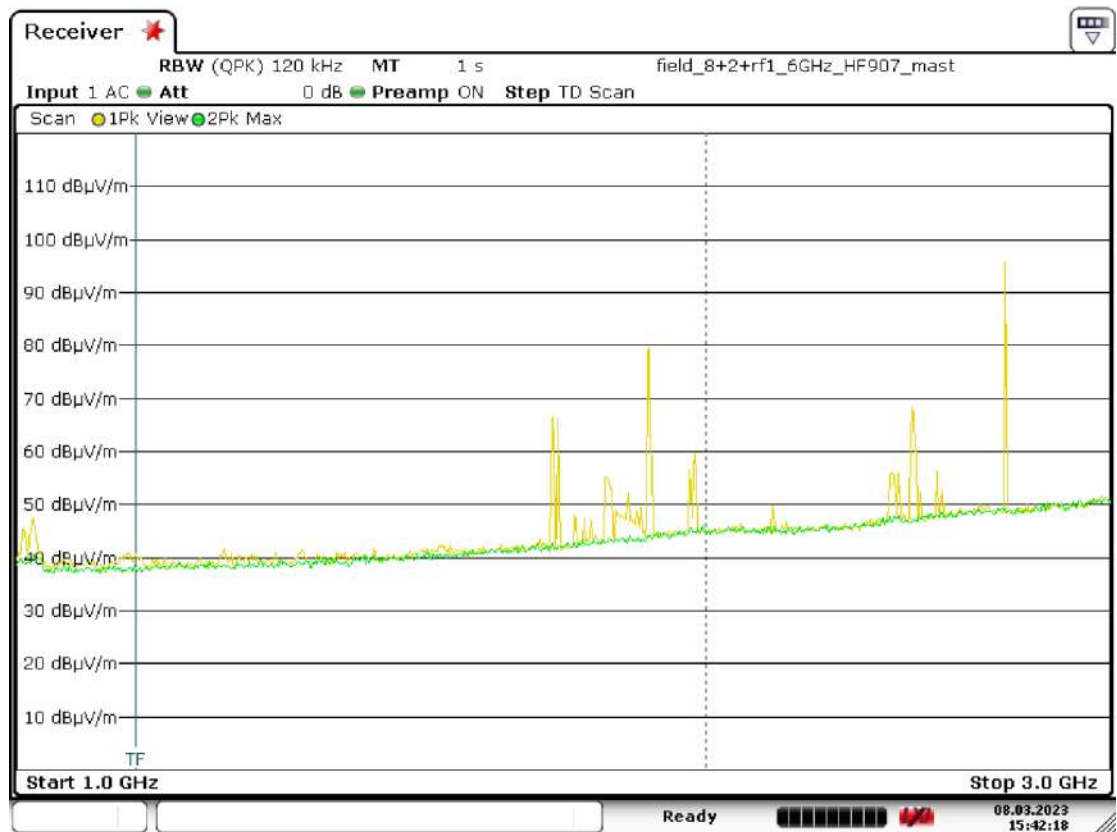
GEN1400M\_15VM\_+10MDISTANCE\_1-OPENDOOR\_2-CLOSEDOOR

Date: 8.MAR.2023 15:36:54

Рисунок 4.18 – Графік згасання поля при подачі сигналу на частоті 1400 МГц (1Pk – сигнал при відчинених дверях, 2Pk – сигнал при зачинених дверях) в залежності від частоти

На даній частоті було досягнуто найвищій рівень генерованого сигналу у 110 дБ, рівень сигналу при зачинених дверях не змінився в порівнянні з випадком без генерації сигналу, отже екран повністю відбив сигнал і відношення сигнал-шум досягає 70 дБ.

Останньою частотою дослідження є частота у 2.7 ГГц, графік дослідження зображений на рисунку 4.19.



GEN2700M\_14VM\_+10MDISTANCE\_1-OPENDOOR\_2-CLOSEDOOR

Date: 8.MAR.2023 15:42:19

Рисунок 4.19 – Графік згасання поля при подачі сигналу на частоті 2700 МГц (1Рк – сигнал при відчинених дверях, 2Рк – сигнал при зачинених дверях) в залежності від частоти

На даній частоті генерація сигналу досягла рівня 96 дБ, рівень сигналу при зачинених дверях не змінився в порівнянні з випадком без генерації сигналу, отже екран відбив повністю сигнал. Рівень сигнал-шум склав 47 дБ.

Отже, екранування камери ЕМС є досить ефективним і повністю відбивало зовнішній сигнал на всіх досліджуваних частотах, окрім частоти у 150 МГц. Це обумовлено наявністю вентиляції та механічними пошкодженнями деяких елементів електромагнітного захисту в конструкції дверей камери ЕМС.

Через недостатню потужність випромінювальної системи та досить високий рівень внутрішніх шумів приймальної системи, особливо на частотах у діапазоні 1-3 ГГц, не вдалося перевірити максимальний рівень екранування, заявлений у технічній документації на камеру ЕМС. Максимальний рівень екранування був досягнутий на частоті 1.4 ГГц та склав 70 дБ. Це можна пояснити відповідністю рівня екранування до потужності випромінювальної

системи, адже при дослідженні ЕМС камера повинна повністю перешкоджати розповсюдженню випромінюваного сигналу за межі дослідної зони.

Загалом, камера ЕМС показала дуже високі показники екранування, з відхиленням від заявлених значень не більше 5-10 %. Також на похибку вплинув технічний стан камери, який мав деякі недоліки через механічні пошкодження.

Екранування залишається дуже важливою частиною розробки РЕА, оскільки не тільки використання, а й випробування ЕМС потребують потужного екранування зони випробувань. Наведений приклад показав, що, за потреби, можливо створити екранування в широкому спектрі частот та з високою поглинальною спроможністю.

Екранування електромагнітних полів є необхідним і важливим аспектом в розробці та виробництві електронних пристроїв і систем. Електромагнітні перешкоди можуть спричинити негативний вплив на функціонування пристроїв, порушувати їхню надійність та спричинити електромагнітну інтерференцію.

Для ефективного екранування використовуються різні матеріали, такі як метали, композитні матеріали, карбонові матеріали, наночастинки тощо. Вони мають різні характеристики та властивості, які впливають на ефективність екранування.

Однак, одиночний шар екранування не завжди може забезпечити необхідну ефективність. Тому розробка багатошарових екранів стала популярною технологією. Вони поєднують різні матеріали та оптимізовану структуру для досягнення максимального ефекту екранування.

Симуляція електромагнітної сумісності є важливим інструментом для оцінки та виявлення потенційних проблем екранування. Вона допомагає виявити конфлікти між компонентами системи та забезпечити відповідність нормам електромагнітної сумісності.

Розвиток технологій екранування сприяє вдосконаленню екранів і забезпечує ще більш ефективне екранування електромагнітних полів. Це важливий напрямок у виробництві електронних пристроїв, який сприяє їхній надійній роботі в різних умовах електромагнітного середовища.

Загалом, екранування відіграє ключову роль у забезпеченні електромагнітної сумісності, захисту від електромагнітних перешкод та забезпеченні надійності електронних систем. Постійні дослідження, розробка нових матеріалів та технологій допомагають покращувати ефективність

екранування і забезпечувати оптимальну роботу сучасних електронних пристроїв.



## Висновки

В даній магістерській дисертації було проведено аналіз наявних можливостей екранування електромагнітних завад, основні методи захисту електронних засобів, чутливих до електромагнітних завад.

Багатошарові електромагнітні екрани є ефективними засобами для захисту від електромагнітних перешкод та розсіювання сигналів. Вони складаються з кількох шарів матеріалів з різною провідністю, що створюють бар'єри для проникнення електромагнітних хвиль.

Ефективність багатошарових електромагнітних екранів залежить від кількох факторів, таких як кількість шарів, їх товщина, провідність матеріалів та правильне їх розташування. Оптимальний дизайн екрану може бути досягнутий шляхом математичного моделювання і використання оптимізаційних методів.

Проведені дослідження підтверджують, що багатошарові електромагнітні екрани забезпечують високу ефективність у діапазоні електромагнітних частот. Вони здатні поглинати, відбивати та розсіювати електромагнітні хвилі, знижуючи рівень електромагнітних перешкод та забезпечуючи надійний захист для електронних пристроїв.

Було проаналізовано важливість заземлення та ефективність екранування електромагнітних хвиль в залежності від наявності заземлення. Для забезпечення електромагнітної сумісності за допомогою заземлення рекомендується виконувати заземлення в одній точці, що дозволяє уникнути виникнення небажаних паразитних напруг, що виникають між різними точками заземлення. Крім того, важливо відокремити сигнальну землю (заземлення, пов'язане з сенсорами) від "шумової землі" (заземлення, пов'язане з виконавчими пристроями) та корпусної землі (заземлення, пов'язане з зовнішніми щитами управління).

Узагальнюючи екранування необхідне для кожного чутливого електронного пристрою окремо для забезпечення коректної роботи. З цього можна зробити висновок, що необхідне тестування кожного окремого електронного пристрою перед початком виробництва на відповідність стандартам випромінюваних завад та працездатності приладу при наявності завад.

### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Горященко С.Л., Синюк О.М., Онофрійчук В.І., Тимошук О.Г. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Хмельницький: ХНУ, 2019 р. 61 с.
2. Yacoub M. D. Foundations of Mobile Radio Engineering. New York, 1993.
3. S. Kovar. Design of shielding enclosures to protect security devices - режим доступу : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8293543>
4. Tim Williams. Designing for EMC - режим доступу: [http://www.ieca-inc.com/images/Designing\\_for\\_EMC.pdf](http://www.ieca-inc.com/images/Designing_for_EMC.pdf)
5. Dave Bursky. RF Shielding: The Art of Science of Eliminating Interference- режим доступу: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jan/rf-shielding-the-art-and-science-of-eliminating-interference>
6. Терещенко Д.В., Зіньковський Ю.Ф. Екранування електронних приладів керування промислових електростанцій *Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи* зб. тез доп. міжнар. наук.-тех. конф. м. Київ, 22-24 лист. 2022 р. С 125-127
7. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України 01.08.1996 № 239.
8. Grounding And Shielding RYP Masters Program Electronics for Space Lec- ture notes Swedish Inst. of Space Physics 2005.
9. G. Sindura, K. Ram Prakash, P. Salil. Control of electromagnetic waves through electromagnetic shielding - режим доступу:
10. Kenneth L. Kaiser. Kettering University Flint, Michigan. Electromagnetic Shielding — 2006 — 300p.
11. Abdul J. Jerri. Introduction to Integral Equations with Applications, John Wiley & Sons Inc. — 1999.
12. V.T. Eroveenko. Mathematical model of penetration of cylindrical electro- magnetic fields with axial symmetry through the plane screen from permalloy. — ISSN 1816-0301 — June 2018.
13. Taylor & Francis Group. Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding. — CRS Press — 315p.
14. Poularikas A. D. — Bessel Functions|| The Handbook of Formulas and Tables for Signal Processing. Ed. Alexander D. Poularikas Boca Raton: CRC Press LLC, — 1999.

15. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5760158>Tim Williams/ Using ferrites for interference supression - Режим доступу: [http://www.ieca-inc.com/images/Using\\_ferrites\\_for\\_interference\\_suppression.pdf](http://www.ieca-inc.com/images/Using_ferrites_for_interference_suppression.pdf)
16. Бутенко О.О. Технології одержання композиційних покриттів для захисту від електромагнітного випромінювання на водній та безводній основі : дис. ... д-ра філософії хім. Наук : Київ, 2021. 153 с.
17. Зіньковський Ю. Ф., Клименко В. Г. Електромагнітна, інформаційна за хищеність та сумісність електронних апаратів: Навчальний посібник для студентів вищих технічних закладів. — Ж.: ЖІТІ, 1999. — 376 с.
18. EMC Formulars - режим доступу: [http://www.ieca-inc.com/images/EMC Formulas and Equations.pdf](http://www.ieca-inc.com/images/EMC_Formulas_and_Equations.pdf)
19. Quatation anechoic chamber : project documentation : Albatros Projects. Kyiv, 2013. 207 p.