

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

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіопристроїв
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ”

20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва)

зі спеціалізацією Інтелектуальні технології мікросистемної
радіoeлектронної техніки

на тему: Електромагнітні екрани для
надвисокочастотних полів

Виконав (-ла): студент (-ка) Р1-72 мп
(шифр групи)

Ніколенко Богдан Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник д.т.н., проф., акад. НАН України Зінковський Р.Р.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант доктор права доцент, к.т.н. Коштанов С.Ф.
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет радіотехнічний

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 172 – телекомунікації та радіотехніка

Спеціалізація інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної
техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

С.А. Нелін
(ініціали, прізвище)

«5» 10 2017р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Ніколенку Богдану Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Електромагнітні екрани для
надвисокочастотних полів

науковий керівник дисертації Зінковський Юрій Францевич д.т.н., проф., акад. НАНУ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» __ 20__ р. №__

2. Термін подання студентом дисертації 30 листопада 2018 року

3. Об'єкт дослідження електромагнітні екрани

4. Предмет дослідження ефективність екранування з однією
ефективності та коефіцієнта екранування

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Провести аналіз отриман
даних інформації, 2. Обрати мат. модель, розробити
комп. модель, 3. Провести дослідження характеристик
екранів у діапазоні частот 10 ГГц.. 10 ГГц для матеріалів: мідь,
алюміній, сталь, 4. Проаналізувати результати, 5. Зробити
висновки за отриманими результатами

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу електронна презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій наукова стаття в IV науковій міжнародній технічній конференції КМОСС-2018

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доцента Камтанов С.Ф.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз тематичної інформації	1.09.2018 – 8.09.2018	
2	Розробка технічного завдання	9.09.2018 – 16.09.2018	
3	Розп. мат. та комп. моделі, комп. моделі	17.09.2018 – 24.09.2018	
4	Написання розділів 1, 2, підгот. вступу	25.09.2018 – 14.10.2018	
5	Написання розділу 3	15.10.2018 – 31.10.2018	
6	Висновки за МД, підгот. презентації	1.11.2018 – 20.11.2018	
7	Розп. статистичні та зовнішні звіт	21.11.2018 – 28.11.2018	
8	Захист дисертації	20.12.2018	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

І.О. Ф. Зінковський

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської дисертації

на тему «Електромагнітні екрани для надвисокочастотних полів»

Київ-2018

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки магістерської дисертації становить 101 сторінку, які включають в себе 5 розділів, 30 ілюстрацій, 27 таблиць, 3 додатки, 26 бібліографічних найменування за переліком джерел посилань.

Ключові слова: НАДВИСОКІ ЧАСТОТИ, ЕКРАНУВАННЯ, МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ, ПЛОСКИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ЕКРАН, КОЕФІЦІЄНТ ЕКРАНУВАННЯ, БАГАТОШАРОВІ ЕКРАНИ.

Актуальність теми: екранування надвисокочастотних електромагнітних полів завад є важливим завданням фізичного захисту та підвищення електромагнітної сумісності радіоелектронної апаратури.

Мета дослідження: визначення матеріалів, що найкращі для використання у електромагнітних екранах для придушення надвисокочастотних завад.

Об'єкт дослідження: електромагнітні екрани.

Предмет дослідження: ефективність екранування з оцінкою коефіцієнтів екранування.

Наукова новизна одержаних результатів: наукова новизна полягає у підвищенні ефективності екранування апаратури від електромагнітних завад надвисокої частоти шляхом конструювання екранів у вигляді трьох шарів різно-типних металів (магнітного та немагнітного), коли проміжний шар магнітний, а граничні — немагнітні. Окрім того, тришаровий екран суттєво підвищує коефіцієнт екранування за рахунок збільшення ефективності механізму відбиття електромагнітної хвилі від границь шарів.

Публікації:

Ніколенко Б. М. Електромагнітні екрани для надвисокочастотних полів / Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції / ДВНЗ "УДХТУ". — Дніпро: Баланс-клуб, 2018. — с. 91 - 93.

ABSTRACT

The volume of the explanatory note of the master's thesis consists of 101 pages which include 5 chapters, 30 illustrations, 27 tables, 3 appendixes and 26 bibliographic titles in the reference list.

Keywords: ULTRAHIGH FREQUENCIES, SHIELDING, MAGNETIC PERMEABILITY, FLAT ELECTROMAGNETIC SHIELD, SHIELDING FACTOR, MULTILAYER SHIELDS.

Relevance of the topic: Shielding of ultrahigh frequency electromagnetic interference fields is an important task of physical protection and electromagnetic compatibility improvement in radio electronic devices.

Research purpose: the defining of materials the best to use in electromagnetic shields for ultrahigh frequency interferences rejecting.

Object of research: electromagnetic shields.

Subject of research: shielding efficiency with shielding factor estimation.

Scientific novelty: scientific novelty lies in improving the efficiency of equipment shielding from electromagnetic ultrahigh frequency interferences. It is doing by constructing the shields as three layers of different types of metals (magnetic and non-magnetic), when the intermediate layer is magnetic and the boundary layers are non-magnetic. Furthermore, the three-layer shield greatly increases the shielding factor by raising the mechanism of efficiency by reflection of the electromagnetic wave from layer boundaries.

Publications:

Ніколенко Б. М. Електромагнітні екрани для надвисокочастотних полів / Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції / ДВНЗ "УДХТУ". — Дніпро: Баланс-клуб, 2018. — с. 91 - 93.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Перелік скорочень.....	5
1 Механізми взаємодії полів з металевими екранами	6
1.1 Основні види екранування	6
1.2 Електромагнітне екранування.....	7
1.3 Екранування надвисокочастотних полів.....	10
1.4 Механізми екранування.....	12
1.4.1 Екранування поглинанням	15
1.4.2 Екранування відбиттям.....	16
1.5 Конструкції електромагнітних екранів	17
Висновки за розділом.....	21
2 Характеристики матеріалів екранів.....	23
2.1 Математична модель аналізу характеристик матеріалів екранів ...	23
2.2 Розробка комп'ютерної моделі.....	31
2.2.1 Коефіцієнти екранування	31
2.2.2 Хвильовий опір.....	31
2.2.3 Коефіцієнт вихрових струмів.....	34
2.2.4 Глибина проникнення високочастотного струму	34
Висновки за розділом.....	35
3 Частотні характеристики одно- та тришарових екранів	36
3.1 Одношарові екрани з традиційних матеріалів	36
3.1.1 Коефіцієнти екранування	36
3.1.2 Екранування поглинанням та відбиттям.....	37
3.1.3 Хвильові опори	40

3.1.4 Коефіцієнт вихрових струмів.....	40
3.1.5 Глибина проникнення	41
3.2 Одношарові екрани з феритових сплавів.....	42
3.3 Тришаровий екран.....	46
3.3.1 Принцип дії багатошарових екранів.....	46
3.3.2 Відбиття в тришарових екранах за різних умов.....	47
3.3.3 Розрахунки коефіцієнтів екранування тришарових екранів....	49
Висновки за розділом.....	51
4 Розроблення стартап-проекту	53
4.1 Опис ідеї	53
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	54
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	55
4.4 Розробка ринкової стратегії проекту.....	59
4.5 Розробка маркетингової програми стартап проекту.....	60
Висновки за розділом.....	62
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	64
5.1 Визначення основних потенційно шкідливих і небезпечних виробничих чинників при виконанні науково-дослідної роботи.....	65
5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки, гігієни праці та виробничої санітарії.....	66
5.2.1 Відповідність параметрів робочого приміщення санітарним нормам	66
5.2.2 Мікроклімат та склад повітря робочої зони	66
5.2.3 Освітлення робочих місць	69
5.2.4 Електробезпека	71
5.2.5 Правила безпеки при експлуатації ВДТ ПЕОМ.....	72

5.2.6 Вимоги до приміщень, де розміщені ПЕОМ	72
5.2.7 Виробничий шум	75
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	76
5.3.1 Вимоги до організації ефективної роботи систем сповіщення персоналу у випадку надзвичайних ситуацій	76
5.3.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС	79
5.3.3 Пожежна безпека	80
Висновки	82
Перелік джерел посилань	84
Додаток А.....	87
Додаток Б.....	91
Додаток В.....	100

ВСТУП

Бурхливий розвиток сучасної радіoeлектроніки, в тому числі твердотільної, опанування все більш коротких діапазонів хвиль призвело до перенасичення оточуючого середовища електричними, магнітними та електромагнітними полями великої інтенсивності з найширшим частотним діапазоном.

Джерела полів — стаціонарні, мобільні, надпотужні, слабкі, — постійно, іноді непередбачувано збільшують свою щільність розташування в просторі. Масовий перехід апаратури на цифрову основу лише мультиплікує проблему забезпечення електромагнітної сумісності одночасно з інформаційною захищеністю радіoeлектронної техніки.

Окрім цього, завадова обстановка ускладнюється за рахунок збільшення фону індустриальних радіозавод в навколишньому середовищі внаслідок технічно недосконалого функціонування різноманітних пристроїв, що є неминучим для складної багатофункціональної техніки.

Серед шляхів і методів забезпечення електромагнітної сумісності найбільш ефективним залишається екранування магнітними та немагнітними матеріалами окремих елементів апаратури або всього пристрою в цілому.

Магістерська дисертація присвячена дослідженню ефективності плоского тришарового комплексного екрана з двома зовнішніми немагнітними та внутрішнім магнітним шарами.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВЧ — високі частоти.

ЕА — електронна апаратура.

НВЧ — надвисокі частоти.

НЧ — низькі частоти.

РЕА — радіоелектронна апаратура.

РЕЗ — радіоелектронний засіб.

ТЕ — поперечна електрична хвиля.

ТЕМ — поперечна електромагнітна хвиля.

ТМ — поперечна магнітна хвиля.

Ніколенко, Б. М. РІ-72МП, 2018

1 МЕХАНІЗМИ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІВ З МЕТАЛЕВИМИ ЕКРАНАМИ

Цей розділ магістерської дисертації присвячений розгляду основних механізмів впливу електромагнітного поля на металеві екрани з різних матеріалів.

1.1 Основні види екранування

Існує три види екранування за принципом дії — електричне, магнітне та електромагнітне.

В електричному режимі роботи екранів має місце явище електромагнітної індукції, яке забезпечує необхідний екрануючий ефект. Тобто, у цьому випадку під дією електричного поля, яке екранується на внутрішній та зовнішній поверхнях металевих екранів, виникають індуковані заряди, протилежні за знаком. Ці заряди створюють поле, що екранує, та поле перевипромінювання. В системі зарядів ізолюваного екрана поле, що екранує, та поле перевипромінювання в деякій мірі компенсують одне одного, тому, відповідно, ефективність електричного екрана може бути незначною. Також при електричному екрануванні для нейтралізації поля перевипромінювання та досягнення необхідної ефективності екранування існує необхідність у заземленні екранів.

Зазвичай заземлення проводять до шасі, корпусів, каркасів або інших масивних металевих деталей радіоелектронних апаратів. Електричні екрани не є ефективними для захисту від електромагнітних полів, особливо діапазонів високих або надвисоких частот.

Магнітне екранування застосовують для захисту радіоелектронного пристрою або його окремих частин чи вузлів від зовнішнього магнітного поля завади або від взаємного впливу при постійному магнітному полі чи низькочастотних струмах. Для магнітних екранів використовують метали-феромагнетики з високою магнітною проникністю, низькою залишковою індукцією та малою коерцитивною силою [1].

1.2 Електромагнітне екранування

Екранування за своєю суттю є захистом чутливих до впливу різних полів (електричних, магнітних, електромагнітних) електронних пристроїв за допомогою металевих конструкцій – екранів, які мають певні захисні властивості.

Для цього режиму екранування характерний найбільш невизначений характер розрахункових даних. Режим електромагнітного екранування має істотну особливість в тому, що ефективність роботи екранів в цьому режимі підвищується з підвищенням частоти електромагнітного поля. Для нього не характерна єдність принципу дії в дуже широкому діапазоні частот, що характеризується відносною шириною в декілька порядків.

Необхідною умовою одержання достовірних розрахунків, що добре співвідносяться з практичними дослідженнями, є визначення основного режиму електромагнітного екранування — електродинамічного чи хвильового. У хвильових режимах роботи екранів в діапазоні НВЧ ($10^9..10^{11}$ Гц) ефект екранування визначається фізичними явищами та процесами взаємодії відбитих, заломлених та падаючих хвиль на межах неоднорідних середовищ поширення полів та металевих матеріалів екранів. У таких режимах моделі показників екранування є найбільш прийнятними, тому що властивості їх подібностей зберігаються при використанні фундаментальних аналітичних методів моделювання (рівняння Максвелла, закони Снеліуса). У хвильових режимах роботи екранів моделі цільових показників екранування є найбільш «аналітичними», оскільки зберігаються основні властивості їх подібностей при використанні найбільш відомих аналітичних методів моделювання.

В діапазоні радіочастот при реальних габаритах вузлів та деталей РЕА в енергетиці джерел полів, що екрануються у внутрішньому середовищі апаратури, переважають реактивні та перерозподільні процеси, а хвильові є менш значущими.

Апарат математичної фізики, що відповідає процесам взаємодії полів та екранів в діапазоні радіочастот, може бути представлений у вигляді диференціальних рівнянь в частинних похідних другого порядку [2]:

$$A \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} + C \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + a \frac{\partial U}{\partial x} + b \frac{\partial U}{\partial z} + cU = F(x, z, \tau), \quad (1.1)$$

де x, z, τ — просторові координати та час;

U — інтегральні параметри (індуктивності, ємності, опори, струми та напруги в екранах);

A, B, C, a, b, c — коефіцієнти, що залежать від x, z, τ .

Такі рівняння доцільні для моделювання неусталених процесів дифузійного типу (наприклад, дифузійне проникнення електромагнітних полів у товщі металевих матеріалів екранів шляхом масопереносу електронів, що втягуються полями, що екрануються, в напівхаотичні рухи, які утворюють слабко-каналізовані вихрові струми).

Проте, є обмеження для широкого використання рівнянь в часткових похідних для моделювання процесів при екрануванні, оскільки ефекти взаємодії полів з екранами зводяться до найпростіших аналогів за типами механічного тертя та виконуються за усередненими оцінками основних параметрів.

Такі обмеження можна подолати, використовуючи чисельні математичні методи відносно моделей процесів дифузії полів у екрани.

Електромагнітне екранування у хвильовому режимі на НВЧ реалізується доповненням механізму поглинання механізмом відбиття електромагнітної енергії від екрана. Поглинання в екрані обумовлене перетворенням електромагнітної енергії на теплову, в тому числі за рахунок втрат на вихрові струми, тому ефективність екранування поглинанням зростає з підвищенням частоти поля та магнітної проникності матеріалу, а також збільшенням електропровідності екрана. Відбиття енергії пов'язане з невідповідністю хвильових характеристик (в основному хвильового опору) металу екрана та діелектрика, який оточує екран (наприклад, повітря). В цьому випадку ефективність екранування зростає з ростом цієї невідповідності.

У хвильовому режимі роботи довжина хвилі може співпадати з розмірами самого екрана. Тому в цьому діапазоні частот розрахунки екранів необхідно

проводити, враховуючи струми зміщення за повними рівняннями електродинаміки.

Важливою відмінною рисою електромагнітного екранування в області ВЧ на відміну від НЧ є змінний характер залежності коефіцієнта екранування від частоти, що можна пояснити хвильовою природою НВЧ, і призводить до його резонансу при відповідних значеннях відношення поперечного розміру екрана до довжини хвилі.

Таким чином, при розрахунку екранів необхідно враховувати не лише поперечну електромагнітну хвилю TEM, яку обов'язково використовують у магнітостатичному режимі екранування, а також хвилі вищого порядку та поперечну магнітну хвилю ТМ, яка характеризує екранування магнітного поля, та поперечну електричну ТЕ, яка, відповідно, характеризує екранування електричного поля [3].

В цьому випадку потрібно розглядати TEM-хвилі, де вектори E та H лежать у площині, що перпендикулярна до напрямку поширення енергії, що подано на рис. 1.1:

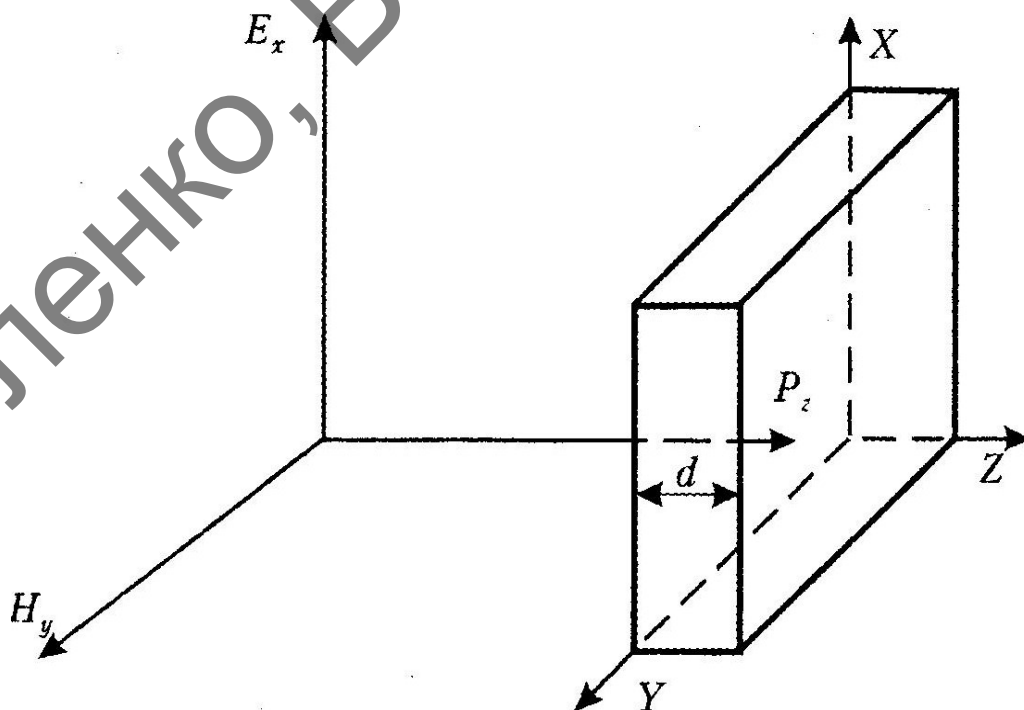


Рисунок 1.1 — Плоский екран

1.3 Екранування надвисокочастотних полів

В діапазоні частот, які перевищують 1 ГГц, коли довжина хвилі менша або одного порядку з розміром екрана, та коли відсутні сторонні струми та заряди, рівняння електродинаміки для хвильового режиму виглядають таким чином [4]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = \sigma E + j\omega \varepsilon E, \\ \operatorname{rot} E = -j\omega \mu H \end{cases} \quad (1.1)$$

де E — вектор напруженості електричного поля;

H — вектор напруженості магнітного поля;

μ — магнітна проникність матеріалу;

ε — діелектрична проникність матеріалу;

σ — провідність матеріалу.

Ці рівняння можна виразити в диференціальній формі для хвилі ТМ, ТЕ вищого порядку відповідно:

$$\begin{aligned} \Delta E + (-j\omega \mu \sigma + \omega^2 \varepsilon \mu) E &= 0, \\ \Delta E &= (-\omega^2 \varepsilon \mu + j\omega \mu \sigma) E = 0, \\ \Delta H + (-j\omega \mu \sigma + \omega^2 \varepsilon \mu) H &= 0, \\ \Delta H &= (-\omega^2 \varepsilon \mu + j\omega \mu \sigma) H = 0, \\ \Delta E + k^2 E &= 0, \\ \Delta H + k^2 H &= 0, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де $k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu + j\omega \mu \sigma}$ — коефіцієнт поширення в середовищі, для діелектрика

($\sigma = 0$) коефіцієнт поширення $k_d = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$, а для металу ($\varepsilon = 0$) $k_m = \sqrt{j\omega \mu \sigma}$

Наведені диференціальні рівняння можна виразити у вигляді однорідних рівнянь Гельмгольца:

$$\begin{cases} \Delta E + \omega^2 \varepsilon \mu E = 0, \\ \Delta H + \omega^2 \varepsilon \mu H = 0, \end{cases} \quad (1.3)$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа для прямокутної системи координат.

Кожне з рівнянь (1.3) еквівалентне трьом скалярним рівнянням для поздовжньої та двох поперечних хвиль. Поперечні складові можна одержати із поздовжніх за допомогою диференціальних рівнянь Максвелла. Для цього запишемо їх в диференціальній формі у прямокутній системі координат у вигляді:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_z}{\partial y} + jkH_y &= j\omega\epsilon E_x; & -jkE_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega\mu H_y; \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} + jkE_y &= j\omega\mu H_x; & -jkH_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= -j\omega\epsilon E_y;\end{aligned}\quad (1.4)$$

де k — дійсна частина коефіцієнта поширення.

Розв'язуючи перші два рівняння відносно E_x та H_y , отримуємо:

$$\begin{aligned}-k^2 E_x &= jk \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y}; \\ -k^2 H_y &= jk \frac{\partial H_z}{\partial x} + j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y}.\end{aligned}\quad (1.5)$$

Аналогічно визначаються E_y та H_x з двох інших рівнянь:

$$\begin{aligned}-k^2 E_y &= jk \frac{\partial E_z}{\partial x} - j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x}; \\ -k^2 H_x &= jk \frac{\partial H_z}{\partial x} + j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x}.\end{aligned}\quad (1.6)$$

Ця система з чотирьох рівнянь зв'язує поздовжні та поперечні складові електромагнітного поля. Векторне підсумовування складових E через E_x , E_y та H через H_x , H_y дає такий результат [5]:

$$-k^2 E = jk \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} + \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - j\omega\mu \left(-\frac{\partial H_z}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) = jk \text{grad} E_z - j\omega\mu \text{grad} H_z \quad (1.7)$$

$$-k^2 H = jk \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + j\omega\epsilon \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} + \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) = jk \text{grad} H_z + j\omega\epsilon \text{grad} E_z \quad (1.8)$$

Остання система цілком характеризує електромагнітне поле з урахуванням всіх його складових.

Для випадку, коли наявні лише поперечні електромагнітні хвилі ТЕМ, а поздовжні хвилі у напрямку поширення z відсутні, складові вектора як електричного, так і магнітного полів рівні нулю, маємо [6]:

$$\begin{aligned} k^2 E &= 0, \\ k^2 H &= 0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Такі рівняння можливі при $E \neq 0$, $H \neq 0$ тільки у тому випадку, коли $k^2 = 0$. За цих умов рівняння (1.9) набувають такого вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta E &= 0, \\ \Delta H &= 0. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Для випадку поперечно-магнітної ТМ хвилі ($E_z \neq 0$; $H_z = 0$) та $H_z = 0$ в (1.7) та (1.8), маємо таку систему:

$$\begin{aligned} -k^2 E &= jk \operatorname{grad} E_z, \\ -k^2 H &= j\omega \epsilon \operatorname{grad} E_z. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Якщо розглядається випадок поперечно-електричної ТЕ хвилі ($E_z = 0$; $H_z \neq 0$), то після підстановки $E_z = 0$ до (1.11) отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} -k^2 H &= jk \operatorname{grad} H_z, \\ -k^2 E &= j\omega \mu \operatorname{grad} H_z. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Отримана система повністю характеризує екранування електромагнітних хвиль завад в діапазоні надвисоких частот.

1.4 Механізми екранування

В загальному випадку екранування забезпечується двома механізмами — поглинання та відбиття. Це відображено у формулі для ефективності екранування [7]:

$$S = \frac{1}{\operatorname{ch} kd} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th} kd} \quad (1.13)$$

де k — коефіцієнт вихрових струмів;

d — товщина екрана;

N — відношення хвильових опорів діелектрика (повітря) та металу.

Перша частина формули (1.12) характеризує механізм екранування поглинанням, $S_{\Pi} = \frac{1}{\text{ch}kd}$. Друга частина характеризує механізм екранування від-

биттям, $S_B = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \text{th}kd}$.

Коефіцієнт екранування

$$B = 20 \lg \left| \frac{1}{S} \right|, \text{дБ}$$

тому

$$B = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{\Pi} S_B} \right| = B_{\Pi} + B_B,$$

$$\text{де } B_{\Pi} = 20 \lg \left| \frac{1}{S_{\Pi}} \right|, \text{дБ}, \quad B_B = 20 \lg \left| \frac{1}{S_B} \right|, \text{дБ}$$

Коефіцієнт екранування B може виражатися також в неперах. Один непер — таке затухання поля, за якого його амплітуда зменшується в $e = 2,718$ разів. Це затухання, що обумовлене екраном товщиною, що рівна ефективній глибині проникнення δ , тобто $d = \delta$. На рис. 1.2 подані залежності глибини проникнення від частоти для основних матеріалів, що використовуються в практиці екранування при радіоконструюванні:

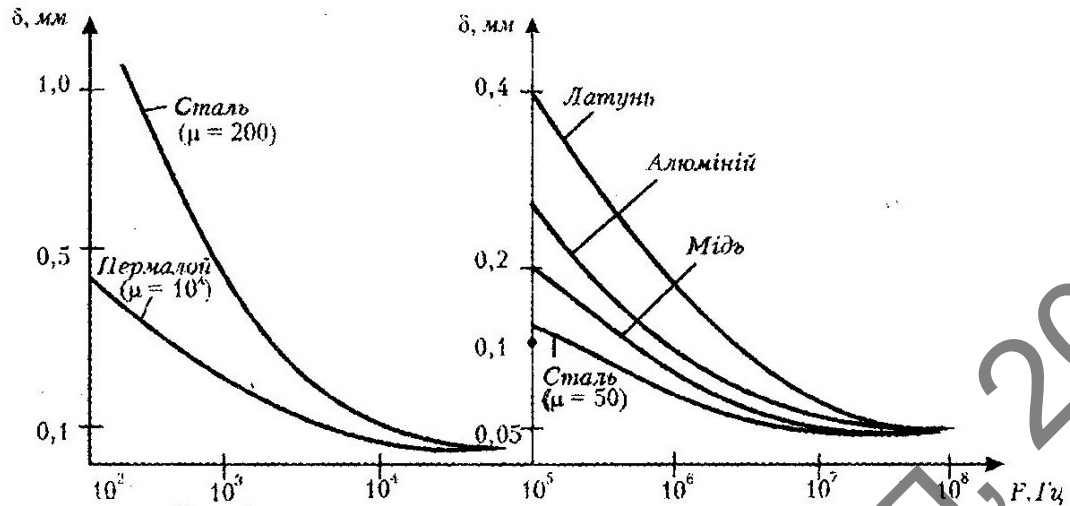


Рисунок 1.2 — Залежність ефективної глибини проникнення для різних матеріалів

Зазвичай на практиці коефіцієнт екранування виражається в децибелах:

$$B = 20 \lg \left| \frac{E}{E^e} \right| = 20 \lg \left| \frac{H}{H^e} \right|$$

Відношення одиниць виміру наступне: 1 Нп = 8,69 дБ (1 дБ = 0,115 Нп).

Ефективність екранування — величина, що обернена до коефіцієнта екранування, тому зі збільшенням частоти ефективність екранування зменшується, що показано на рис. 1.3. В подальшому досліджуються частотні залежності коефіцієнтів екранування

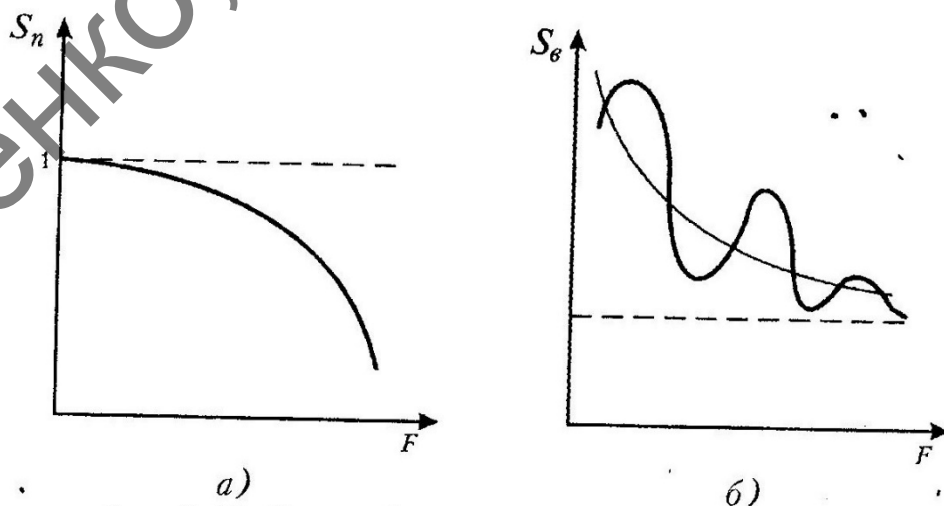


Рисунок 1.3 — Частотна залежність екранування поглинанням (а) та відбиттям (б)

1.4.1 Екранування поглинанням

Механізмом екранування поглинанням є теплові втрати в екрані, що викликані вихровими струмами. Ефективність екранування зростає прямо пропорційно товщині екрана та частоті, оскільки $k = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$.

При додатних значеннях аргументу, тобто при $(kd) > 0$, функція $\text{ch}(kd)$ змінюється у межах від 1 до ∞ , інакше S_{Π} змінюється від 1 до 0, характеризуючи максимальний екрануючий ефект при $S_{\Pi} \approx 0$.

Комплексний характер S_{Π} свідчить про те, що модуль його характеризує ступінь екранування, а кут показує зміщення фази, яке отримує вектор напруженості електромагнітного поля, проходячи через екран.

Екрануючий ефект поглинання тим вищий, чим більша магнітна проникність і електрична провідність металу. Тому екрануючий ефект поглинання значно більший у магнітних матеріалів, ніж у немагнітних [8].

На рис. 1.4. подано залежність коефіцієнтів екранування для міді та сталі в залежності від частоти при екрануванні поглинанням для екранів товщиною 0,1 мм:

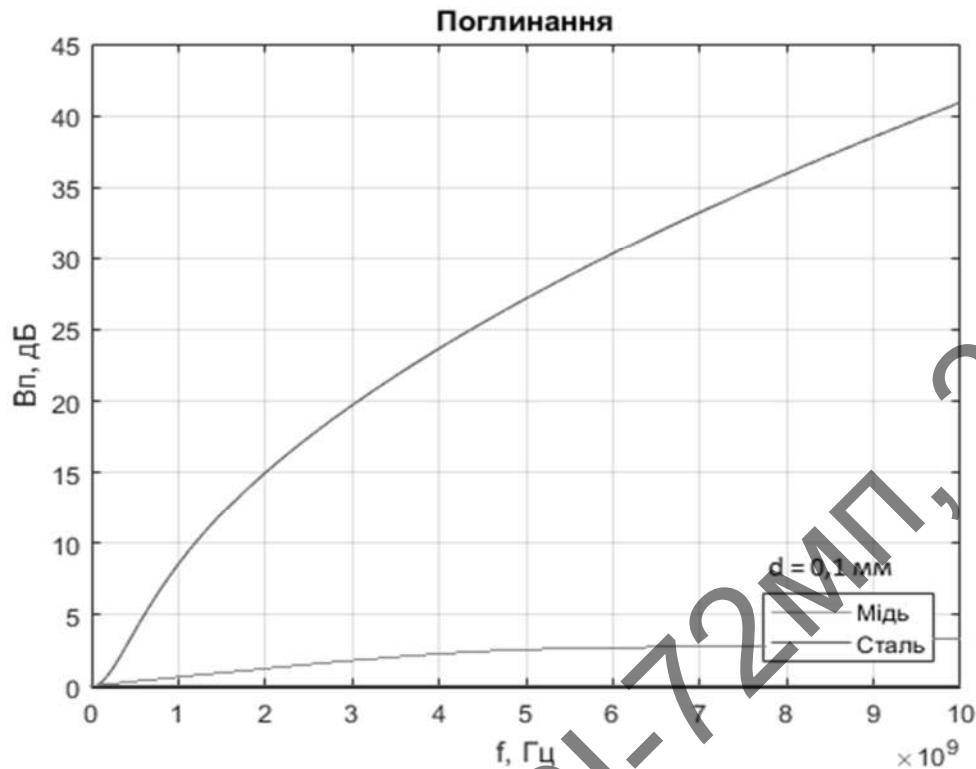


Рисунок 1.4 — Частотна залежність коефіцієнтів екранування поглинанням

З отриманого графіка видно, що краще поглинання у магнітних матеріалів, а немагнітні матеріали мають низьке поглинання електромагнітного поля.

1.4.2 Екранування відбиттям

Цей механізм екранування пов'язаний з невідповідністю хвильових характеристик екрана, металу та навколишнього середовища, яке є діелектриком. Чим більша різниця між хвильовими опорами металу та діелектрика, тим сильнішим буде ефект відбиття.

В області високих частот хвильовий опір діелектрика (повітря) значно більший, ніж у металу, причому ця різниця відносно немагнітних матеріалів значно більша, ніж відносно магнітних. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що екрани з немагнітних матеріалів працюють на відбиття краще, ніж екрани з магнітних матеріалів.

Рівень екранування відбиттям змінюється хвилеподібно відносно величини $\frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right)$

На рис. 1.5. подано розраховану в *MATLAB* залежність коефіцієнтів екранування для міді та сталі в залежності від частоти при екрануванні відбиттям:

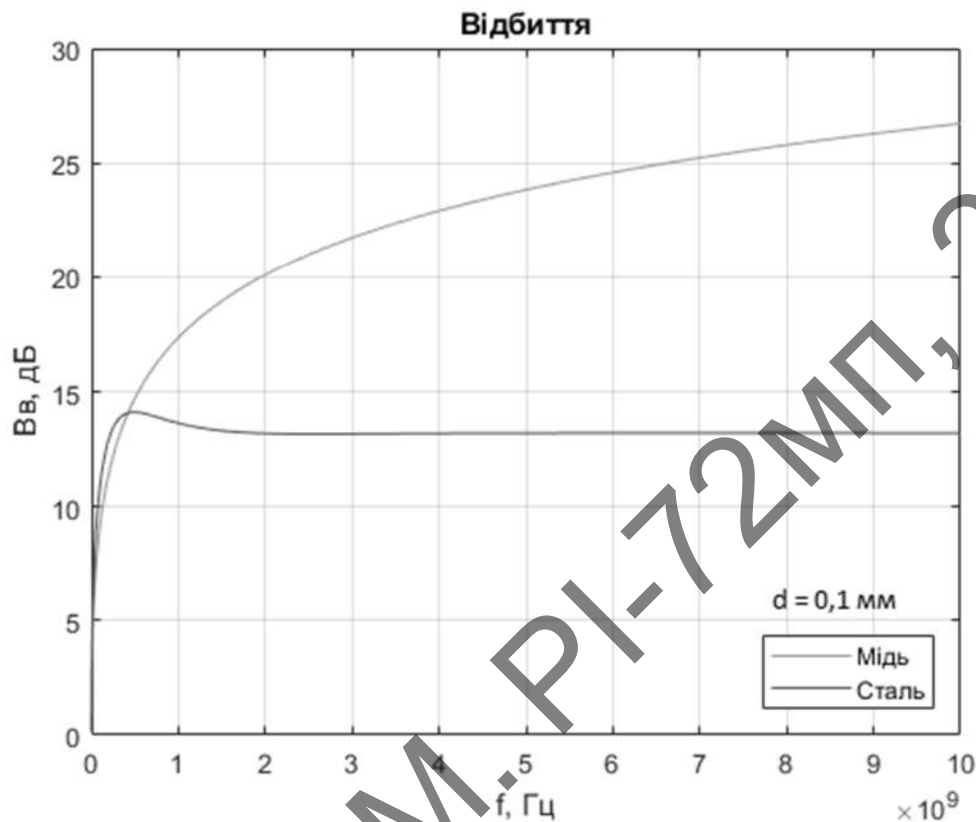


Рисунок 1.5 — Частотна залежність коефіцієнтів екранування відбиттям

З отриманого результату можна зробити висновки, що найкраще відбиття забезпечується немагнітними матеріалами, причому відбиття від міді більш ефективне, ніж від алюмінію, у зв'язку з тим, що останній по відношенню до міді має меншу електричну провідність

1.5 Конструкції електромагнітних екранів

У техніці зв'язку та радіотехніці мають широке застосування всі три основних конструктивних різновиди екранів:

- 1) Плоскі;
- 2) Циліндричні;
- 3) Сферичні.

Коефіцієнт екранування всіх типів екранів визначається формулою:

$$B = 20 \lg \left| \frac{1}{S} \right|,$$

де S — ефективність екранування.

Різниця між екранами полягає лише в величині хвильового опору, який входить до відношення хвильових опорів «метал-діелектрик» [9]. Хвильовий опір, який створює діелектричне середовище, тобто, повітря, виражається наступними формулами.

Для плоскої хвилі

$$Z_{\text{д}}^{\text{п}} = j\omega\mu 2r_{\text{е}}$$

де $r_{\text{е}} = \frac{l}{2}$ — радіус екрана;

l — відстань між паралельними пластинами плоского екрана.

Для циліндричної хвилі

$$Z_{\text{д}}^{\text{ц}} = \frac{j\omega\mu r_{\text{е}}}{n}$$

де n — радіус циліндра (або сфери).

Для сферичної хвилі

$$Z_{\text{д}}^{\text{с}} = \frac{j\omega\mu r_{\text{е}}}{\sqrt{2}n}$$

Зв'язок між коефіцієнтами екранування для трьох різних конструкцій екранів відображає такий вираз

$$B^{\text{с}} = \ln \left| \frac{1}{S^{\text{с}}} \right| = \ln \left| \frac{1}{3S^{\text{п}}} \right| = B^{\text{п}} - \ln 3 = B^{\text{п}} - 1,1.$$

Отже, коефіцієнт екранування циліндричного електромагнітного екрана менша за коефіцієнт екранування плоского екрана на 0,7 Нп, а сферичного відносно плоского — на 1,1 Нп за умови, що товщина екрана становить 0,1 мм

Різниця в коефіцієнтах екранування циліндричного та сферичного екранів становить 0,4 Нп і вища у циліндричного екрана.

$$B^{\Pi} - B^C = \ln \left| \frac{1}{S^{\Pi}} \right| - \ln \left| \frac{1}{S^C} \right| = \ln \left| \frac{S^C}{S^{\Pi}} \right| = \ln \frac{3}{2} = 0,4 \text{ Нп}$$

Конструкційна форма екрана мало впливає на його екрануючі характеристики. Вирішальне значення має матеріал, з якого виготовлений екран ($k_m = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$), а також товщина та радіус екрана.

Малий вплив форми екрана дозволяє в практиці розрахунку в конструюванні екранів, а також при визначенні ефективності існуючих екранів застосовувати приведені формули екранування плоского, циліндричного та сферичного екранів до екранів, що близькі до них за своєю конструкцією [10].

На рис. 1.6, 1.7 та 1.8 показані основні форми електромагнітних екранів, що широко використовуються у практиці захисту РЕЗ.

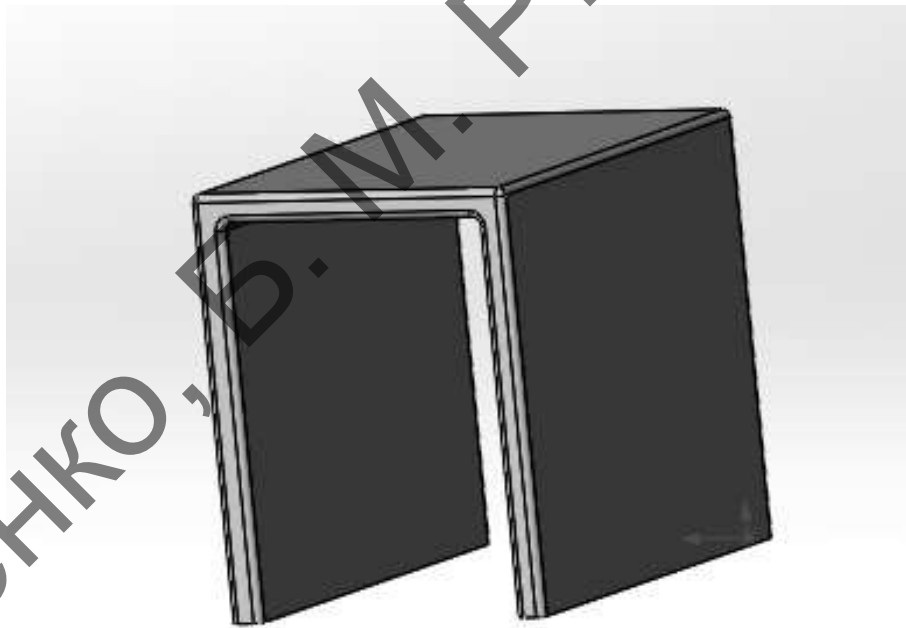


Рисунок 1.6 — Плоский електромагнітний екран



Рисунок 1.7 — Циліндричний електромагнітний екран

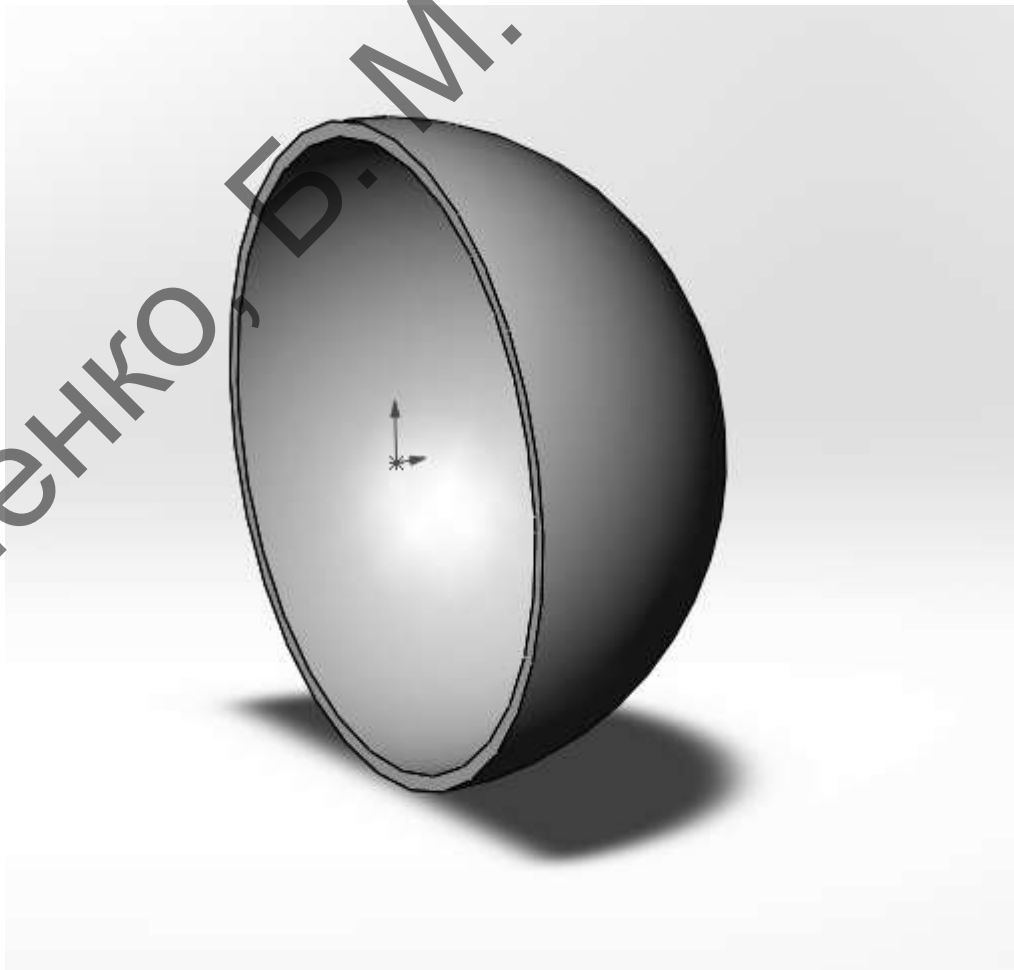


Рисунок 1.8 — Сферичний електромагнітний екран

Якщо взяти коефіцієнт екранування плоского екрана рівним одиниці, то коефіцієнт екранування циліндричного екрана — вдвічі більшим ($B^{\text{ц}} = 2B^{\text{п}}$), а коефіцієнт екранування екрана сферичної конструкції — втричі більшим ($B^{\text{с}} = 3B^{\text{п}}$). Оскільки екрануюча дія екрана тим більша, чим меншим є значення ефективності екранування S , то за ефектом екранування ці три конструктивних різновиди екранів можна розташувати в наступній послідовності:

- плоский екран;
- циліндричний екран;
- сферичний екран.

Це відношення справедливе для екранів, що виготовлені з однакового металу та з рівними товщинами стінок, причому відстань між паралельними пластинами плоского екрана дорівнює діаметру сферичного або циліндричного екранів.

У даній магістерській дисертації для дослідження обрано електромагнітний екран плоскої форми. Така конструкція найбільш поширена у сучасній техніці, добре освоєна на виробництві, технологічна та відносно недорога.

Висновки за розділом

У даному розділі було досліджено механізми екранування. Потрібно зазначити, що екранування ЕА одношаровим екраном з магнітного або немагнітного матеріалу в діапазоні надвисоких частот недоцільне, оскільки необхідні добрі характеристики як для поглинання, так і для відбиття. Такі характеристики можливо забезпечити при використанні багатошарових екранів, в яких є як немагнітні, так і магнітні шари, причому у якості зовнішніх шарів потрібно обирати немагнітні матеріали. Мідна оболонка забезпечує високе відбиття, а сталевий прошарок, що має високу магнітну проникність, забезпечує добре поглинання енергії електромагнітного поля завади.

Був проведений аналіз основних конструкційних виконань електромагнітних екранів. Виходячи з отриманої інформації, оптимальним є використання

плоского електромагнітного екрана, оскільки він найкраще освоєний промисловістю, технологічний, відносно недорогий. Також потрібно зазначити, що форма екрана досить незначно впливає на його екрануючі властивості, найбільший вплив мають характеристики матеріалів екрана.

Ніколенко, Б. М. РІ-72МП, 2018

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ ЕКРАНІВ

Вибір матеріалу екрана проводиться з огляду на забезпечення необхідної ефективності екранування у заданому діапазоні частот.

Для електромагнітних екранів використовуються магнітні та немагнітні матеріали, зазвичай це метали. Для забезпечення найкращого екранування створюються багат шарові екрани з чергуванням шарів магнітного та немагнітного матеріалів.

2.1 Математична модель аналізу характеристик матеріалів екранів

Теорія електромагнітних екранів ґрунтується на розв'язанні основних рівнянь електродинаміки — закону повного струму та закону Фарадея із системи рівнянь Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = i + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} E = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \end{cases} \quad (2.1)$$

де i — густина струму провідності

D — електричне зміщення або електрична індукція, $D = \epsilon_a E$;

B — магнітна індукція, $B = \mu_a H$;

μ_a та ϵ_a — абсолютна магнітна та діелектрична проникності відповідно;

E — вектор напруженості електричного поля;

H — вектор напруженості магнітного поля.

При гармонічних полях вирази (2.1) є еквівалентними до виразів:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = (\sigma + j\omega\epsilon)E, \\ \operatorname{rot} E = -j\omega\mu H. \end{cases} \quad (2.2)$$

де σ — питома електропровідність середовища; $j = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця.

Складова $j\omega\epsilon E$ описує вторинні струми зміщення, урахування яких є обов'язковим на високих частотах ($f > 10^6 \dots 10^{10}$ Гц).

За наявності полів, де сторонні струми і заряди відсутні, хвильові рівняння стають однорідними [11]:

$$\begin{cases} \Delta E - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \\ \Delta H - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Ці рівняння були одержані з двох перших рівнянь Максвелла, використовуючи оператор rot :

$$\begin{cases} \text{rot} H = i + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; D = \epsilon E; \\ \text{rot} E = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; B = \mu H. \end{cases}$$

Для середовища, яке не проводить, рівняння (2.3) набувають такого вигляду:

$$\begin{cases} \Delta E - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \\ \Delta H - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

При більшому спрощенні рівняння (2.4) зводяться до вигляду:

$$\begin{cases} \Delta E - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \\ \Delta H - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

де $v = (\epsilon\mu)^{-\frac{1}{2}}$ — фазова швидкість поширення електромагнітних збурень.

При гармонічній зміні полів $E = E_0 e^{j\omega t}$; $H = H_0 e^{j\omega t}$ рівняння (2.5) набувають вигляду $\Delta E + \omega^2 E / v^2 = 0$; $\Delta H + k^2 H = 0$, де k — стала поширення; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Для середовища, яке проводить, у випадку плоскої хвилі, рівняння (2.3) можна переписати у вигляді:

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

Продиференціюючи ці рівняння у часі, одержимо таку систему:

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

Або у більш компактній формі:

$$\begin{cases} \Delta E + k^2 E = 0, \\ \Delta H + k^2 H = 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

де $k = (\omega^2\epsilon\mu - j\omega\mu\sigma)^{\frac{1}{2}}$ — коефіцієнт поширення в середовищі з параметрами (ϵ, μ, σ).

Коефіцієнт поширення в такому середовищі є комплексною величиною:

$$k = (\epsilon_k \mu)^{\frac{1}{2}} = \beta - j\alpha, \quad \epsilon_k = \epsilon \left(1 - \frac{j\sigma}{\epsilon\omega} \right) = \epsilon (1 - j\operatorname{tg}\delta), \quad \text{де } \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \text{ — тангенс кута втрат,}$$

β — фазова стала (коефіцієнт фази), α — коефіцієнт затухання на одиницю довжини.

Фазова стала та коефіцієнт затухання:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \right)^2} + 1 \right)}, \quad \alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \right)^2} - 1 \right)}.$$

У комплексній формі коефіцієнт поширення $k = |k| e^{-j\psi}$, де

$$|k| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \omega \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \right)^2}}, \quad \psi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sigma}{\omega\epsilon}.$$

Між хвилями, що поширюються в діелектричному та провідниковому середовищі, є різниця. Розв'язок рівнянь (1.6) плоскої хвилі для діелектрика в напрямку осі z може бути записаний у комплексній формі:

$$\begin{cases} E = E_0 e^{-j(\omega t - kz)}, \\ H = H_0 e^{-j(\omega t - kz)}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Хвильова функція являє собою гармонічну плоску хвилю, яка поширюється вздовж осі z , що показано на рис. 2.1:

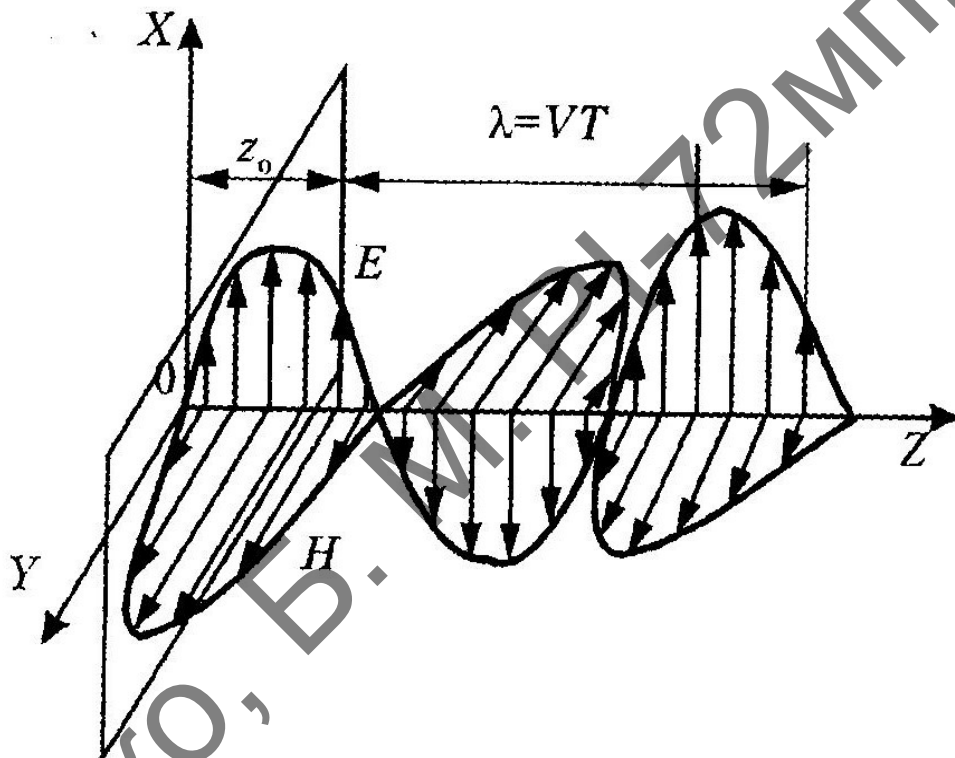


Рисунок 2.1 — Поширення напруженостей електричної та магнітної складових плоскої хвилі в діелектрику

Вектори напруженості електричного та магнітного полів плоскої хвилі є синфазними та знаходяться у взаємно перпендикулярних площинах, перпендикулярні до напрямку поширення (ТЕМ поперечні хвилі).

Поверхня $z = z_0$, на якій фази E та H однакові, є поверхнею постійної фази, чи хвильовою поверхнею. Поверхня поширюється з фазовою швидкістю

$$v = \frac{\omega}{k} = (\epsilon\mu)^{\frac{1}{2}}.$$

Для провідникового середовища справедливими є рівняння (2.6). Користуючись тригонометричною формою комплексного числа, їх можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} E = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z), \\ H = H_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \psi), \end{cases} \quad (2.10)$$

де α — фазова стала, α — коефіцієнт затухання.

З цих рівнянь видно, що вектори E та H зміщені за фазою на кут ψ , вектор магнітного поля відстає. Це зображено на рис. 2.2:

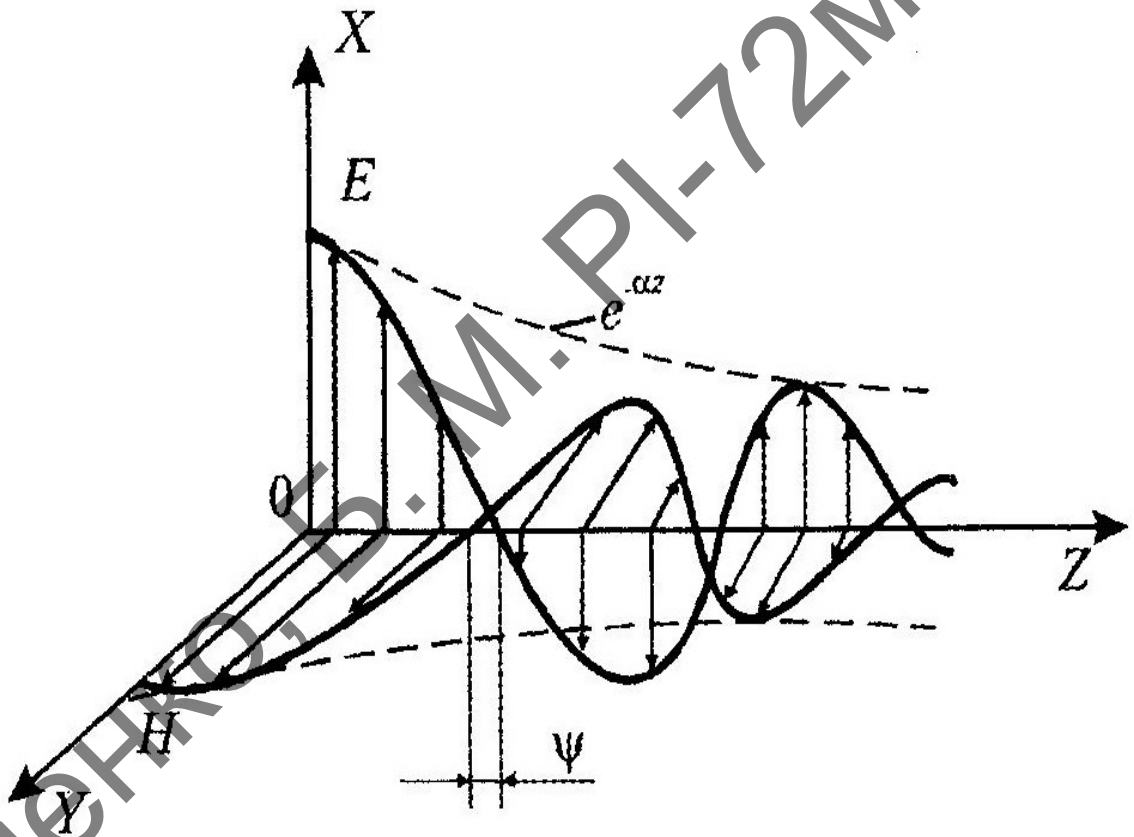


Рисунок 2.2 — Поле плоскої хвилі в провідниковому середовищі

Множник $e^{-\alpha z}$ вказує на експоненціальне ослаблення поля у напрямку його поширення. Довжина хвилі визначається дійсною частиною комплексного коефіцієнта поширення, тому фазова швидкість поширення хвилі у провідниковому середовищі:

$$v = \frac{\omega}{\alpha} = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}.$$

Отже, фазова швидкість залежить від параметрів середовища ϵ , μ , σ та ω , тобто має місце дисперсія хвиль у провідниковому середовищі.

Для середовищ, що добре проводять, тангенс кута втрат $\operatorname{tg}\delta \gg 1$, тобто $\sigma \gg \omega\epsilon$, для ізоляторів $\operatorname{tg}\delta \ll 1$, $\sigma \ll \omega\epsilon$. Мірою різниці провідникових та напівпровідникових середовищ може бути величина $\eta = \operatorname{tg}\delta$. Але варто зауважити, що електричні властивості середовища залежать не тільки від його параметрів, а й від частоти [12].

Виходячи з цього, маємо, що на низьких частотах деякі матеріали можуть виявляти властивості провідника, на високих — властивості діелектрика, але підвищення частоти у будь-якому випадку зменшує величину $\eta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$, тобто, опір матеріалу підвищується.

$$\text{Для якісного діелектрика } \beta \approx \omega\sqrt{\epsilon\mu} = k; \alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\sigma}{2}Z_0$$

Загальний коефіцієнт поширення в діелектриках при $\sigma=0$ ($k = \sqrt{\omega^2\epsilon\mu - j\omega\mu\sigma}$) набуває вигляду $k_d = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ та являє собою коефіцієнт поширення в непровідниковому середовищі.

Частотна характеристика параметра η подана на рис. 2.3:

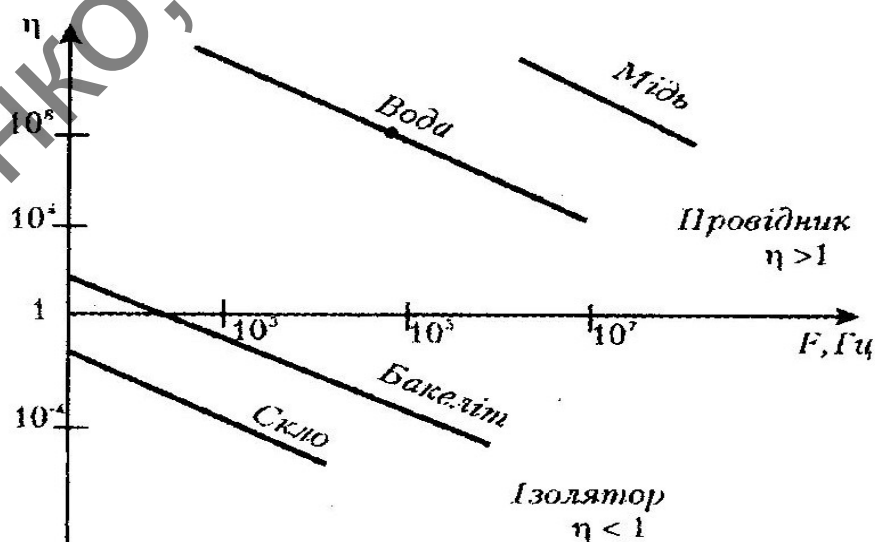


Рисунок 2.3 — Залежність параметрів η від частоти

Для якісного провідника $\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$; $\operatorname{tg}\psi = \frac{\alpha}{\beta} = 1$, тобто зміщення векторів E і H досягає максимальної величини $\psi = \frac{\pi}{4}$.

Загальний коефіцієнт поширення в металі має вигляд $k_m = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$ та являє собою коефіцієнт поширення у провідниковому середовищі (або коефіцієнт вихрових струмів).

Напруженості електричних та магнітних полів зменшуються за експоненціальним законом у напрямку поширення.

Якщо i_x — густина струму на глибині металу x , i_0 — на поверхні, то $i_x = i_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$, де δ — ефективна глибина проникнення (товщина скін-шару). При $x = \delta$, $i_x = i_0 e^{-1}$, що означає, що на глибині δ густина струму послаблюється в e разів.

У квазістаціонарному виді рівняння (2.2) набувають вигляду:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = \sigma E, \\ \operatorname{rot} E = -j\omega\mu H. \end{cases} \quad (2.11)$$

Рівняння (1.12) у прямокутній системі координат можна переписати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x; & \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu H_x, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y; & \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \sigma E_z; & \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z. \end{cases} \quad (2.12)$$

Для хвилі ТЕМ в дальній зоні, що поширюється в металі (складові векторів E та H $E_y = E_z = 0$ та $H_x = H_z = 0$), достатньо математичних операцій із складовими E_x та H_y , тому рівняння (2.13) набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial z} = -j\omega\mu H_y, \\ -\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x. \end{cases} \quad (2.14)$$

Взявши похідну H_y по z $\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2}$, підставимо її у друге рівняння системи (2.14):

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma E_x.$$

Виходячи з того, що $k_m = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$ — коефіцієнт поширення в металі, то отримаємо такий вираз:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = k_m^2 E_x. \quad (2.15)$$

Коли k — значуще, розв'язком диференціального рівняння для металу (1.15) буде $E_x = C_1 e^{k_m z} + C_2 e^{-k_m z}$. Тоді, відповідно до системи рівнянь (1.14), вираз для магнітного поля має такий вигляд:

$$H_y = -\frac{k}{j\omega\mu} (C_1 e^{k_m z} - C_2 e^{-k_m z})$$

З останніх двох виразів видно, що в екрані присутні дві хвилі. Напруженість однієї з них спадає з відстанню, а напруженість іншої, навпаки, збільшується прямо пропорційно збільшенню координати (складові $C_2 e^{-k_m z}$ та $C_1 e^{k_m z}$ відповідно).

Виходячи з цього, для першого випадку маємо падаючі хвилі, напруженість яких, зважаючи на втрати енергії в екрані, є обернено пропорційною до координати z . У другому випадку відбувається відбиття хвиль від другої грані екрана і напруженість поля зростає.

Тобто, у товщі металу діють дві хвилі — падаюча та відбита [13]:

$$\begin{aligned} E_x &= E_x^B + E_x^P = C_1 e^{k_m z} + C_2 e^{-k_m z} \\ H_y &= H_y^B + H_y^P = -\frac{C_1 k}{j\omega\mu} e^{k_m z} + \frac{C_2 k}{j\omega\mu} e^{-k_m z}. \end{aligned}$$

2.2 Розробка комп'ютерної моделі

На основі приведеної у підрозділі 2.1 математичної моделі створені програми у системі *MATLAB* [14] для автоматизованого розрахунку наступних характеристик екранування різних матеріалів.

2.2.1 Коефіцієнти екранування

Коефіцієнт екранування є основним параметром матеріалу, який суттєво впливає на екрануючі властивості всього багат шарового екрана. Розглянемо розраховані коефіцієнти екранування для деяких магнітних і немагнітних матеріалів. Оскільки розглядається екранування надвисокочастотних полів, необхідно, щоб коефіцієнт екранування був якомога вищим у діапазоні НВЧ.

2.2.2 Хвильовий опір

Хвильовий опір — опір, який зустрічає електромагнітна хвиля при поширенні уздовж однорідної лінії без віддзеркалення, тобто за умови, що на процес передачі не впливають неузгодженості на кінцях лінії.

В металі діють падаюча та відбита хвилі. Для цих хвиль визначаються відповідні їм хвильові опори металу. Опір для падаючої хвилі має такий вираз [15]

$$Z_z^{\text{п}} = \frac{E_x^{\text{п}}}{H_y^{\text{п}}} = \frac{C_2 e^{-k_m z}}{\frac{C_2 k_m}{j\omega\mu} e^{k_m z}} = \frac{j\omega\mu}{k_m} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma_m}} = Z_m^{\text{п}} \quad (2.16)$$

Для відбитої хвилі хвильовий опір має вигляд

$$Z_z^{\text{в}} = \frac{E_x^{\text{в}}}{H_y^{\text{в}}} = \frac{C_1 e^{k_m z}}{-\frac{C_1 k_m}{j\omega\mu} e^{k_m z}} = -\frac{j\omega\mu}{k_m} = -\sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma_m}} = -Z_m^{\text{в}}. \quad (2.17)$$

З даних виразів видно, що хвильові опори металу для падаючої та відбитої хвиль є однаковими за абсолютним значенням та протилежними за знаком. Це говорить про протилежні напрямки руху падаючих та відбитих хвиль.

Хвильовий опір збільшується зі збільшенням частоти поля, залежить від матеріалу екрана, але не залежить від товщини екрана. У немагнітних матеріалів малі хвильові опори, магнітні ж матеріали мають підвищене значення хвильового опору [16].

Якщо переписати одержані вирази, не опускаючи абсолютні значення (індекси «а»), то отримаємо такі рівності

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\sigma_a}} \quad (2.18)$$

За таких умов вираз для хвильового опору будь-якого провідника через відносні значення магнітної проникності та електричної провідності має вигляд

$$Z_m = 3,7 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} f. \quad (2.19)$$

Для діелектрика рівняння (2.15) перетворюється на однорідне у зв'язку з тим, що $k = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = 0$:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = 0. \quad (2.20)$$

Розв'язком диференціального рівняння (2.20) для діелектрика є $E_x = C_z$.

Тоді, відповідно до (2.18):

$$H_y = -\frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{C}{j\omega\mu}.$$

Тоді хвильовий опір діелектрика у квазістаціонарному режимі характеризується виразом

$$Z_d = \frac{E_x}{H_y} = -j\omega\mu z.$$

На рис. 2.4 наведено частотні залежності хвильових опорів для різноманітних матеріалів, що можуть використовуватися у якості екранів.

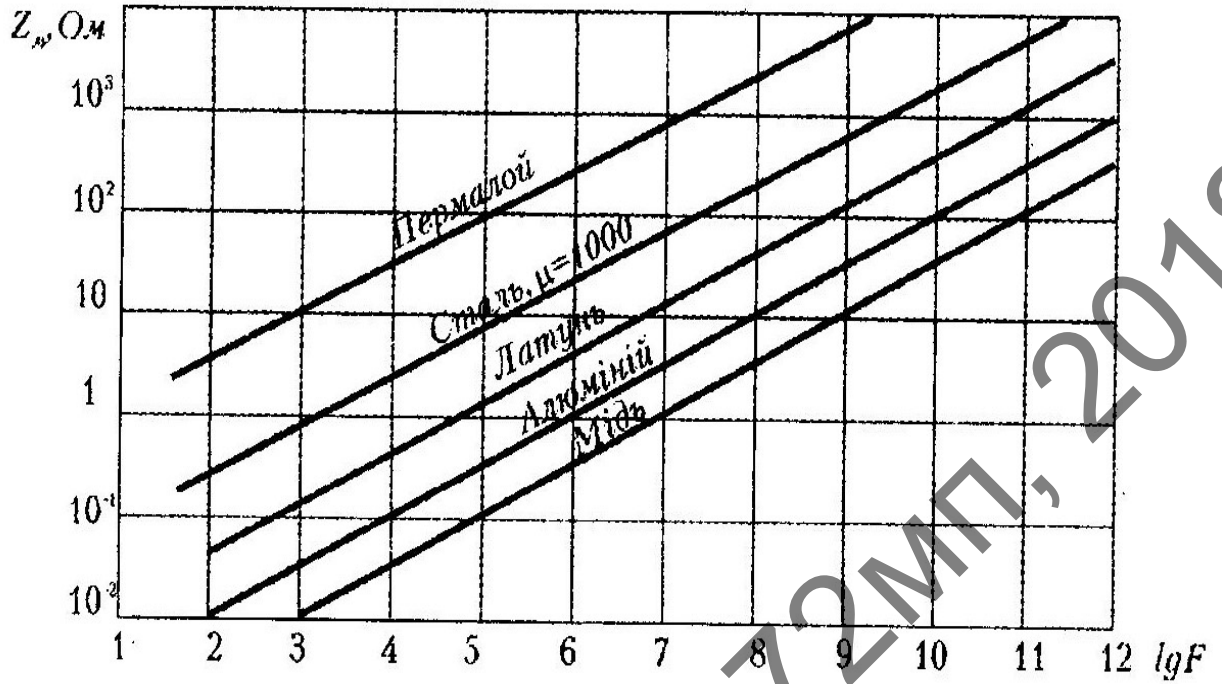


Рисунок 2.4 — Залежність хвильового опору (за модулем) металів від частоти

Для квазістаціонарного режиму хвильовий опір діелектрика прямо пропорційний відстані від джерела випромінювання та його частоті.

На рис. 2.5 для прикладу показана залежність модуля опору для повітря від відстані до джерела поля на різних частотах

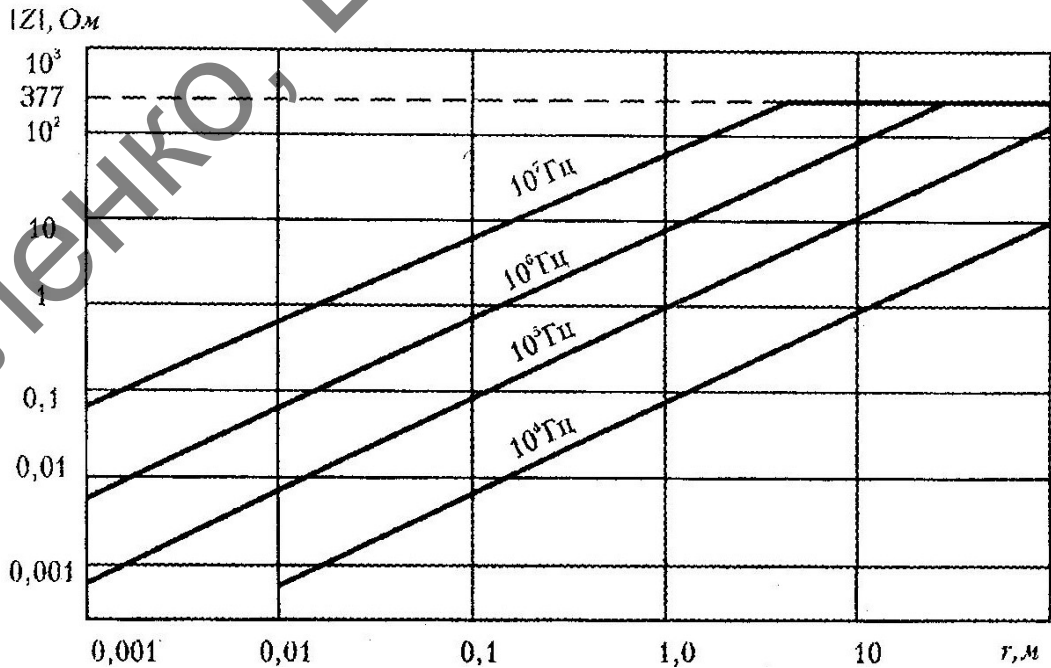


Рисунок 2.5 — Зміна хвильового опору діелектрика (повітря) з відстанню для квазістаціонарного режиму

Пряма залежність хвильового опору від відстані для поперечної електромагнітної хвилі TEM, що зароджується у ближньому полі, знаходиться у подібному співвідношенні залежності опору від відстані для ближнього магнітного поля, звідки виходить, що в даному частотному діапазоні деякі характеристики поля поперечної електромагнітної хвилі мають властивості поперечномагнітної хвилі ТМ, яка і визначає екранування магнітного поля [17].

2.2.3 Коефіцієнт вихрових струмів

Вихрові струми — струми, що виникають у провіднику під впливом змінного електромагнітного поля. Провідники мають мале значення електричного опору, тому вихрові струми можуть досягати великих значень, що дуже важливо, особливо в діапазоні надвисоких частот. Такі струми є небажаними для радіоелектронної апаратури, тому застосовується електромагнітне екранування.

В дисертації досліджується вплив вихрових струмів на екрани. Для цього розраховується коефіцієнт вихрових струмів:

$$k = \sqrt{j\omega\mu\sigma}.$$

Коефіцієнт вихрових струмів залежить від матеріалу екрана та частоти електромагнітного поля, під дією якого знаходиться екран. Відповідно, чим більша частота, тим вищий коефіцієнт вихрових струмів [18].

2.2.4 Глибина проникнення високочастотного струму

Ця характеристика пов'язана зі скін-ефектом — явищем проникнення високочастотного струму у приповерхневий шар матеріалу на певну глибину. Це явище є корисним при екрануванні, оскільки зменшує напруженості електричного і магнітного полів і, відповідно до загасання електромагнітного поля завади.

Явище поверхневого ефекту пов'язане з вихровими струмами, оскільки саме вони проникають у приповерхневий шар матеріалу.

Якщо i_x — густина струму на глибині металу x , а i_0 — на поверхні, то $i_x = i_0 e^{\frac{-x}{\delta}}$, де δ — ефективна глибина проникнення (товщина скін-шару). При $x = \delta$, $i_x = i_0 e^{-1}$, тобто на глибині δ густина струму послаблюється в e разів.

Ефективна глибина проникнення є функцією питомої провідності, магнітної проникності та частоти, і визначається за такою формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Відповідно до цього виразу, ефективна глибина проникнення зменшується зі збільшенням частоти, та електромагнітних характеристик матеріалів екранів. Тобто, велика глибина проникнення буде мати місце на відносно низьких частотах до 1 МГц. В діапазоні надвисоких частот глибина проникнення мінімальна.

Висновки за розділом

У даному розділі була розглянута та обрана математична модель для дослідження характеристик екранування. Також була розроблена комп'ютерна модель для розрахунку основних характеристик електромагнітних екранів у математичній системі *MATLAB*. Програма розраховує числові значення за точками та виводить їх у графіки частотних залежностей.

Був проведений опис основних числових параметрів, що характеризують електромагнітні екрани, зв'язок між цими параметрами, залежності від частот, матеріалів екранів, їх конструктивного виконання.

3 ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНО- ТА ТРИШАРОВИХ ЕКРАНІВ

В цьому розділі магістерської дисертації проводиться аналіз результатів та порівняння частотних характеристик матеріалів екранів.

Розглянуті окремі одношарові екрани з міді та сталі, а також комплексні тришарові екрани з товщинами шарів 0,1 мм з міді, сталі електротехнічної та алюмінію. Основні параметри матеріалів, що використовуються при розрахунках, наведені в табл. 3.1 [19].

Таблиця 3.1 — Основні характеристики досліджуваних матеріалів

Матеріал	$\sigma_a, \frac{\text{См}}{\text{м}}$	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	μ
Алюміній	$2,5 \cdot 10^7$	0,04	0,99
Мідь	$5,62 \cdot 10^7$	0,0178	1
Сталь 200	$3,7 \cdot 10^6$	0,27	200

Розрахунок проводиться у широкому діапазоні частот — від 10 кГц до 10 ГГц.

3.1 Одношарові екрани з традиційних матеріалів

3.1.1 Коефіцієнти екранування

Коефіцієнт екранування є основною характеристикою ефективності екранування. Виходячи з цього, розрахувавши частотні характеристики для декількох магнітних та немагнітних матеріалів, можна обрати два матеріала, які будуть використовуватися для подальших досліджень характеристик екранування як одношарового екрана, так і тришарового.

Розрахунок коефіцієнтів екранування проводиться з урахуванням обох складових екранування — відбиттям та поглинанням

На рис. 3.1 подані частотні залежності коефіцієнтів екранування для магнітних та немагнітних матеріалів товщиною 0,1 мм.

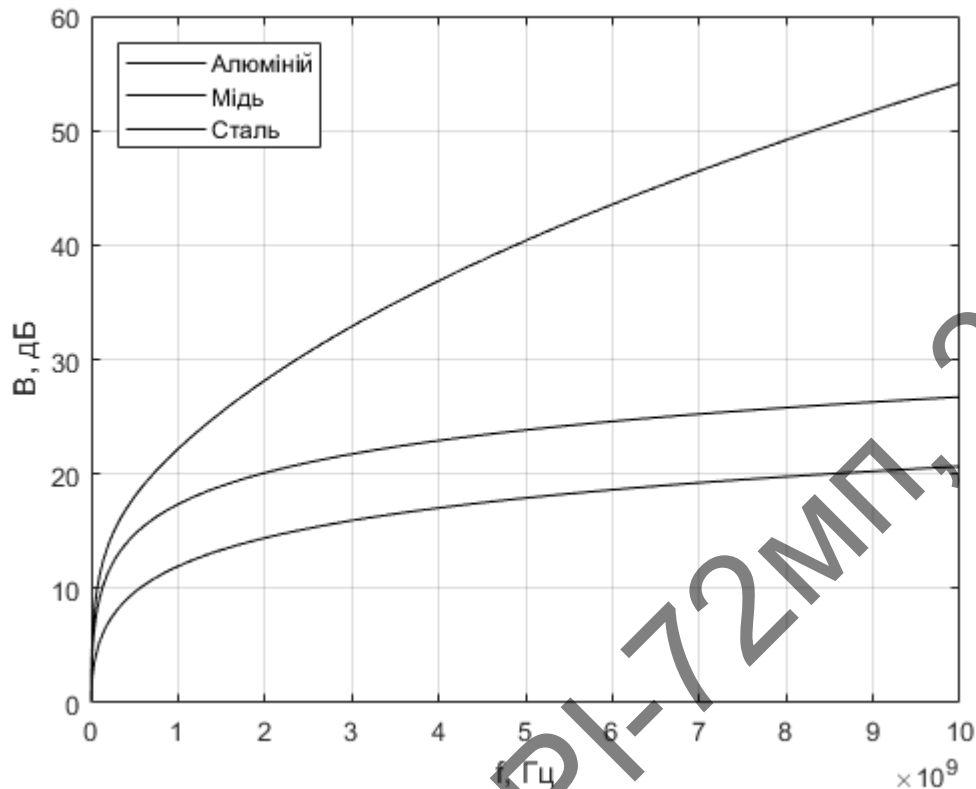


Рисунок 3.1 — Частотні характеристики коефіцієнтів екранування

З отриманих характеристик видно, що найбільший коефіцієнт екранування має електротехнічна сталь — від 23 до 54 дБ на частотах 1..10 ГГц, що цілком відповідає вимогам технічного завдання, щодо частотного діапазону.

Серед немагнітних матеріалів кращий коефіцієнт екранування має мідь — 17..26 дБ на таких самих частотах. Коефіцієнт екранування алюмінію суттєво менший, оскільки алюміній порівняно з міддю має високий електричний опір тому для подальших досліджень було обрано сталь та мідь.

3.1.2 Екранування поглинанням та відбиттям

Як було зазначено раніше, при екрануванні мають місце два механізми — поглинання та відбиття. Магнітні матеріали мають високе поглинання, немагнітні — високе відбиття.

Частотні характеристики коефіцієнтів екранування відбиттям та поглинанням подані на рис 3.2 та 3.3:

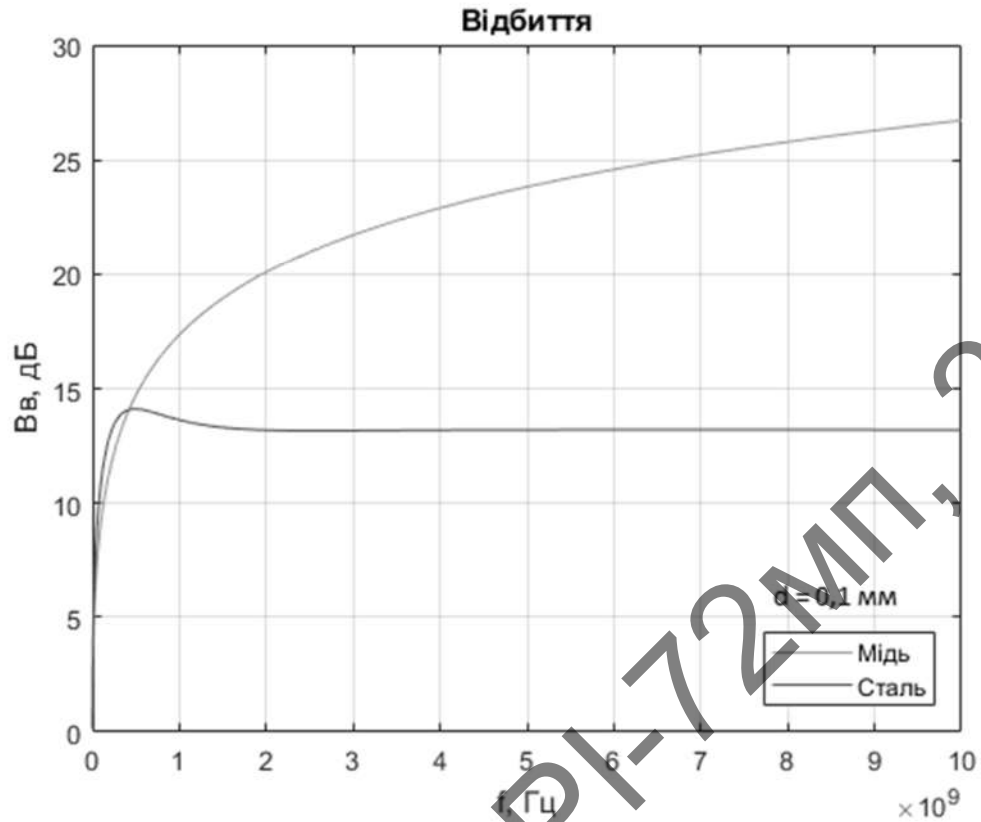


Рисунок 3.2 — Частотна залежність коефіцієнтів екранування відбиттям

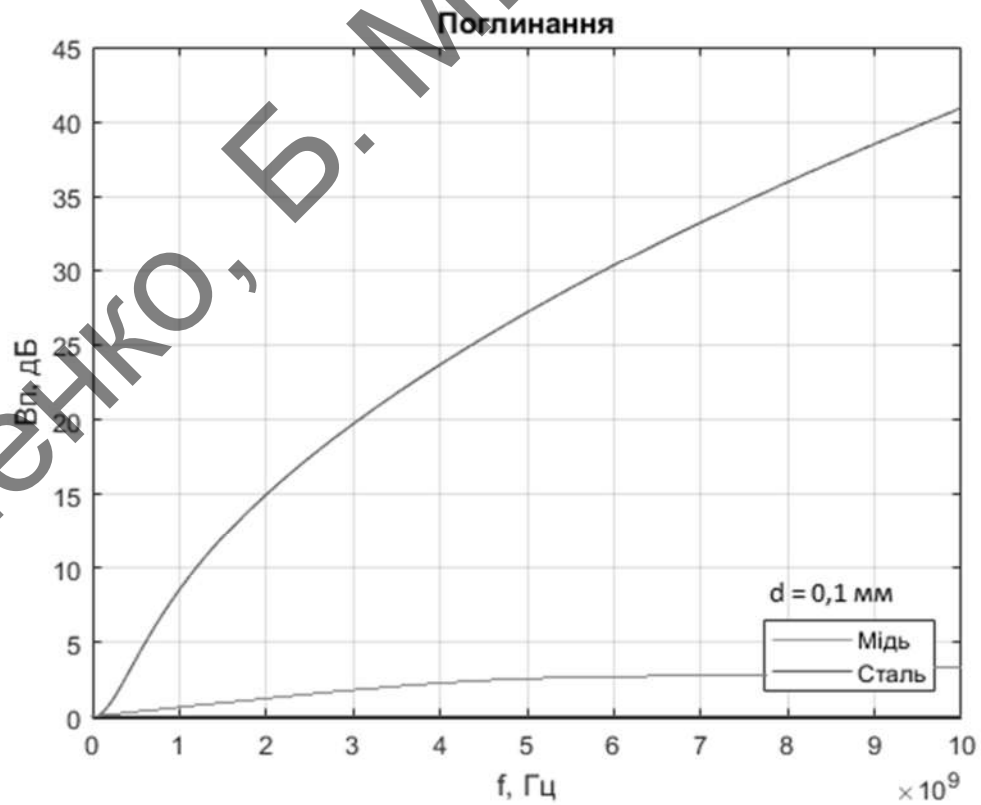


Рисунок 3.3 — Частотна характеристика коефіцієнтів екранування поглинанням

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що використання одношарових екранів з магнітних або немагнітних матеріалів не є ефективним, оскільки магнітні матеріали майже повністю поглинають поле, а немагнітні — відбивають. Найбільша ефективність екранування досягається при поєднанні таких матеріалів у тришаровий екран, товщина якого рівна товщині одного шару, причому шар магнітного матеріалу повинен знаходитися між двох шарів немагнітного матеріалу. Це пояснюється за допомогою кривої гістерезису для магнітних матеріалів, що подана на рис. 3.4.

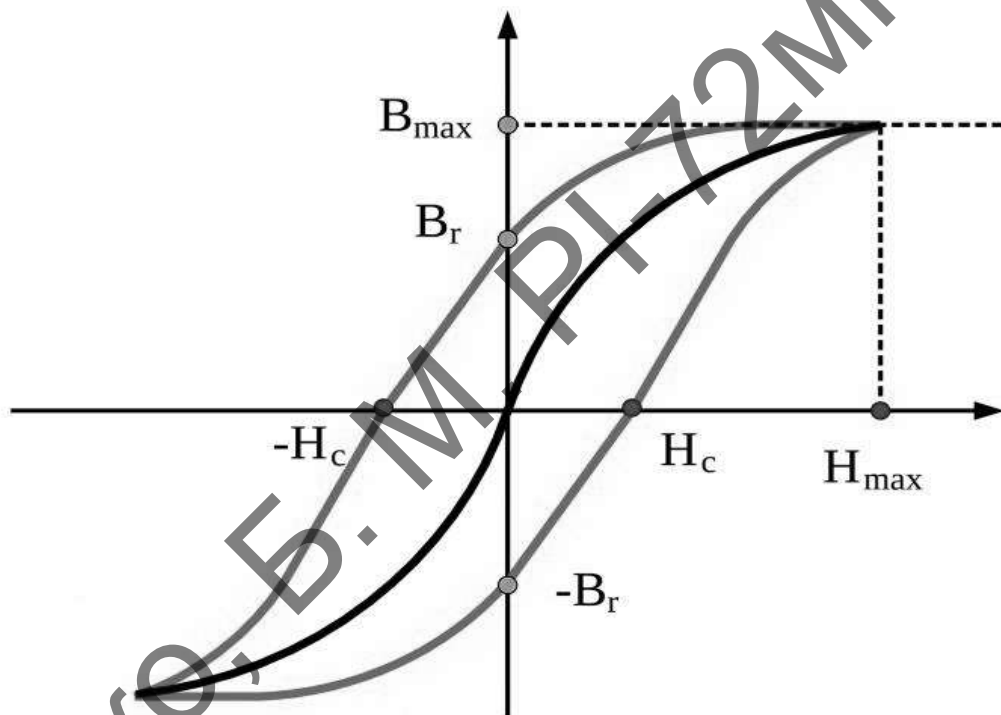


Рисунок 3.4 — Крива гістерезису

Оскільки $B = \mu H$, то при знаходженні точки на пологій ділянці кривої μ невелике, бо має місце велике значення H і мале значення похідної $\mu = \frac{\partial B}{\partial H}$.

Відповідно, у випадку з малою магнітною проникністю екранування магнітним матеріалом буде неефективним. На крутій ділянці кривої гістерезису з великим значенням похідної $\mu = \frac{\partial B}{\partial H}$, коли велике B , μ значне, що і необхідно для

доброго екранування. Магнітний шар оточують немагнітними з метою придушити електромагнітне поле зовнішнім екраном, щоб ефективність екранування була максимальною.

3.1.3 Хвильові опори

Частотні залежності хвильових опорів для міді та сталі подані на рис. 3.5:

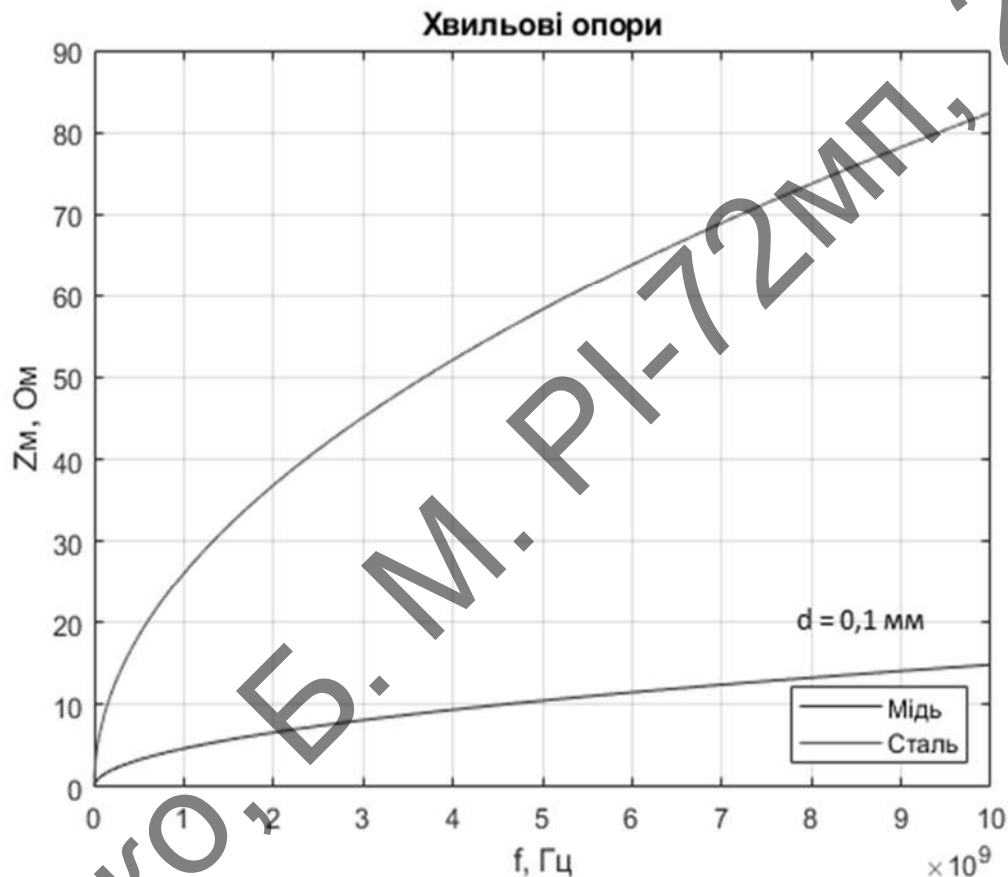


Рисунок 3.5 — Частотна залежність хвильових опорів матеріалів екранів. З отриманих характеристик видно, що магнітні матеріали характеризуються високими значеннями хвильового опору, а немагнітні, навпаки, мають малий хвильовий опір.

3.1.4 Коефіцієнт вихрових струмів

Поява вихрових струмів характерна для полів високих та надвисоких частот. На рис. 3.6 подані частотні залежності коефіцієнта вихрових струмів.

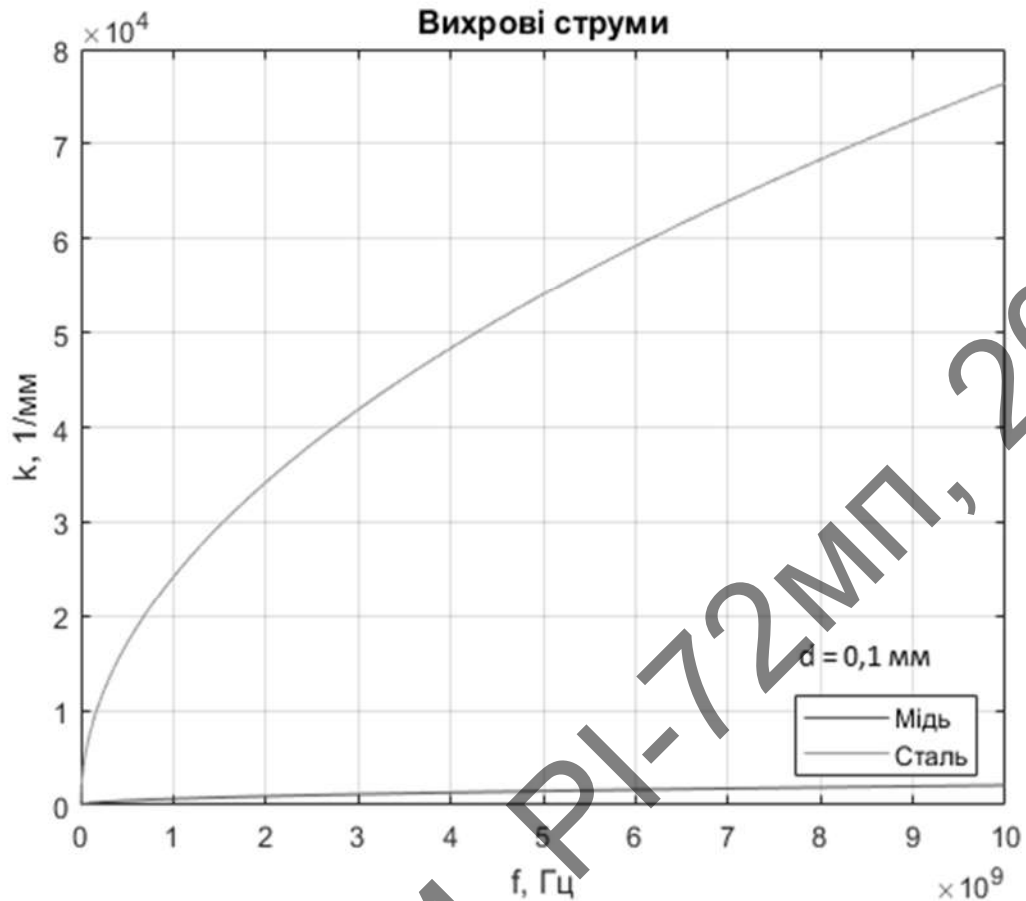


Рисунок 3.6 — Частотна залежність коефіцієнтів вихрових струмів

За розрахованою характеристикою отримуємо, що вихрові струми добре поширюються у магнітному матеріалі.

3.1.5 Глибина проникнення

При впливі надвисокочастотних полів має місце «скін»-ефект, коли вихрові струми проникають у приповерхневий шар матеріалу. На рис. 3.7 на наступній сторінці подані частотні залежності глибини проникнення для магнітних та немагнітних матеріалів, а також для тришарового екрана «мідь-сталь-мідь» з товщинами шарів 0,1 мм.

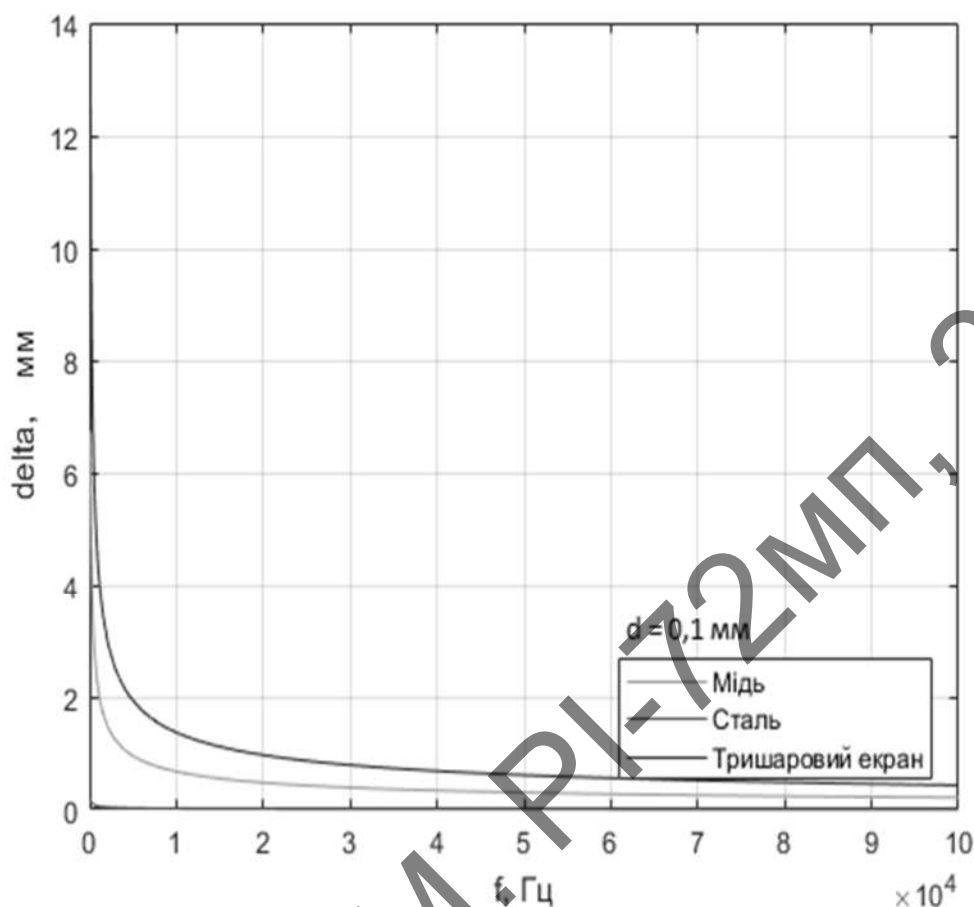


Рисунок 3.7 — Частотна залежність глибини проникнення височастотного струму

З отриманих залежностей видно, що зі збільшенням частоти глибина проникнення струму зменшується, а на надвисоких частотах наближається до нуля.

3.2 Одношарові екрани з феритових сплавів

Використання феримагнітних матеріалів — феритових сплавів — є актуальним у сфері екранування магнітної складової електромагнітного поля завади. Ферити є сполуками оксиду заліза Fe_2O_3 з оксидами інших металів.

В промисловості ферити найчастіше використовують у якості височастотних фільтрів для комп'ютерної техніки, а також для виготовлення магнітопроводів, осердь трансформаторів та котушок індуктивності.

Порівняно з металами ферити мають велике значення електричного опору (на декілька порядків вище, ніж у металів). У таблиці 3.2 приведені основні характеристики досліджуваних феритів [20].

Таблиця 3.2 — Характеристики феритів

Матеріал	$\sigma_a, \frac{C_M}{M}$	μ
НМ-7500	$6 \cdot 10^7$	7500
НН-3000	$6 \cdot 10^7$	3000

Завдяки тому, що ферити мають дуже високу магнітну проникність порівняно зі сталлю, коефіцієнти екранування при використанні феритів будуть суттєво більшими, що дуже важливо в діапазоні надвисоких частот.

На рис. 3.8 — 3.12 аналогічно до попереднього підрозділу подані основні частотні залежності для феромагнітних матеріалів

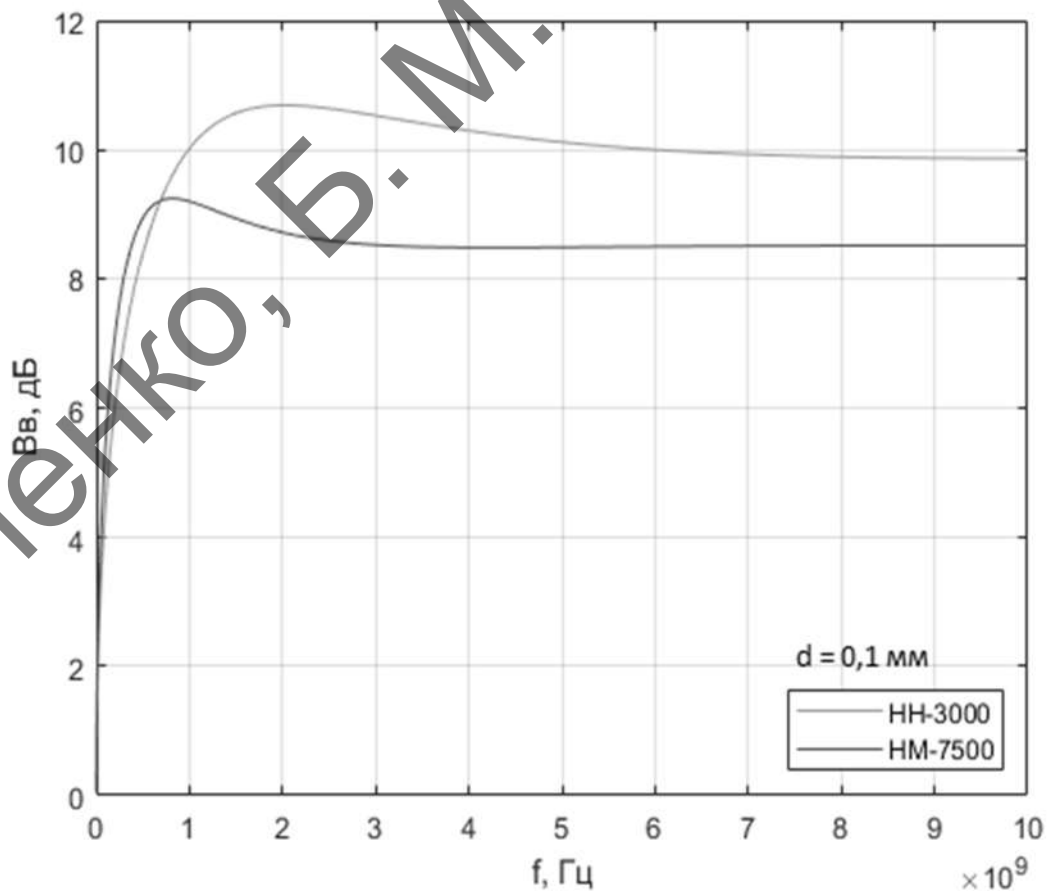


Рисунок 3.8 — Залежність коефіцієнтів екранування відбиттям від частоти

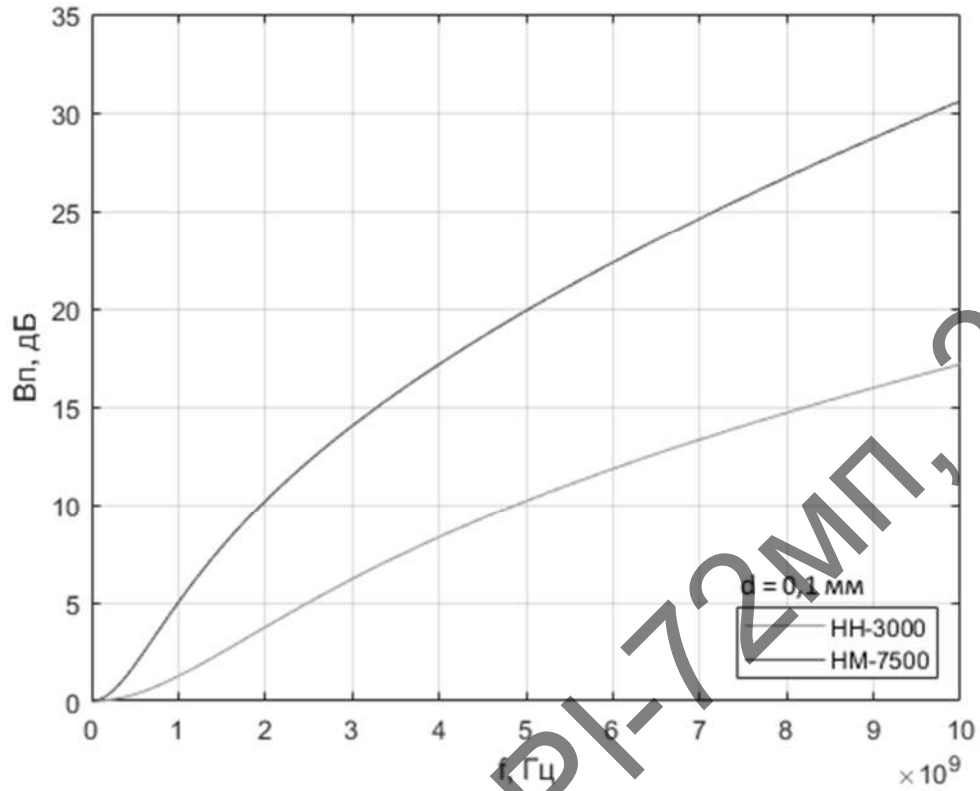


Рисунок 3.9 — Частотна залежність коефіцієнтів екранування поглинанням

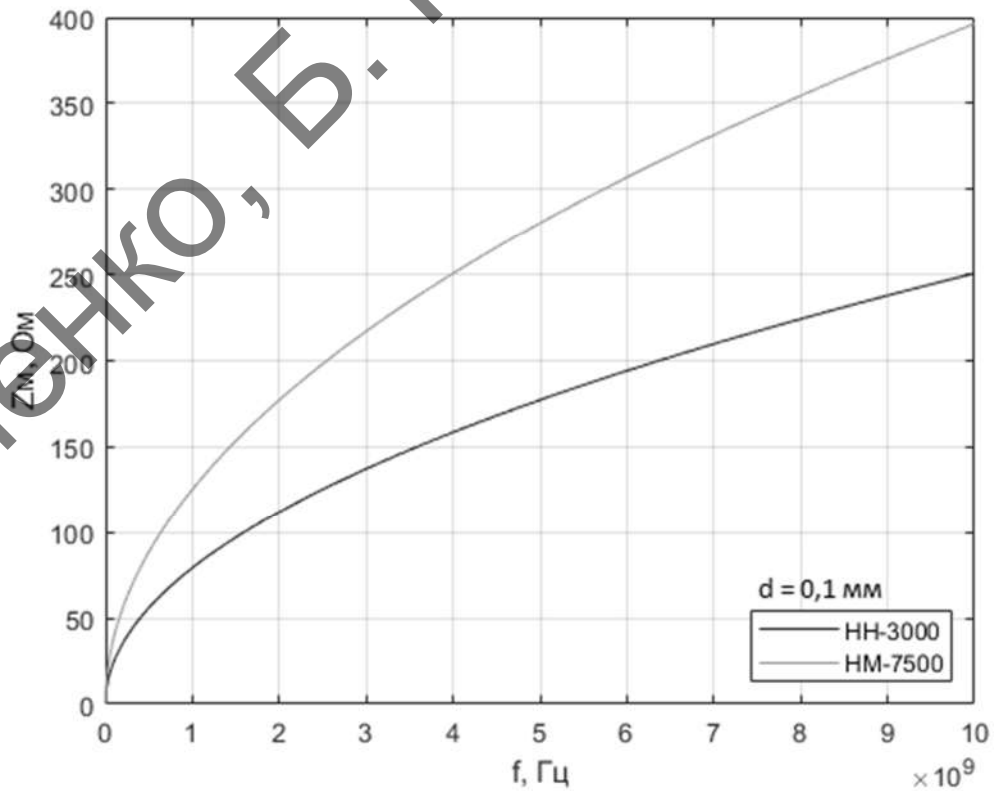


Рисунок 3.10 — Частотна залежність хвильових опорів феритів

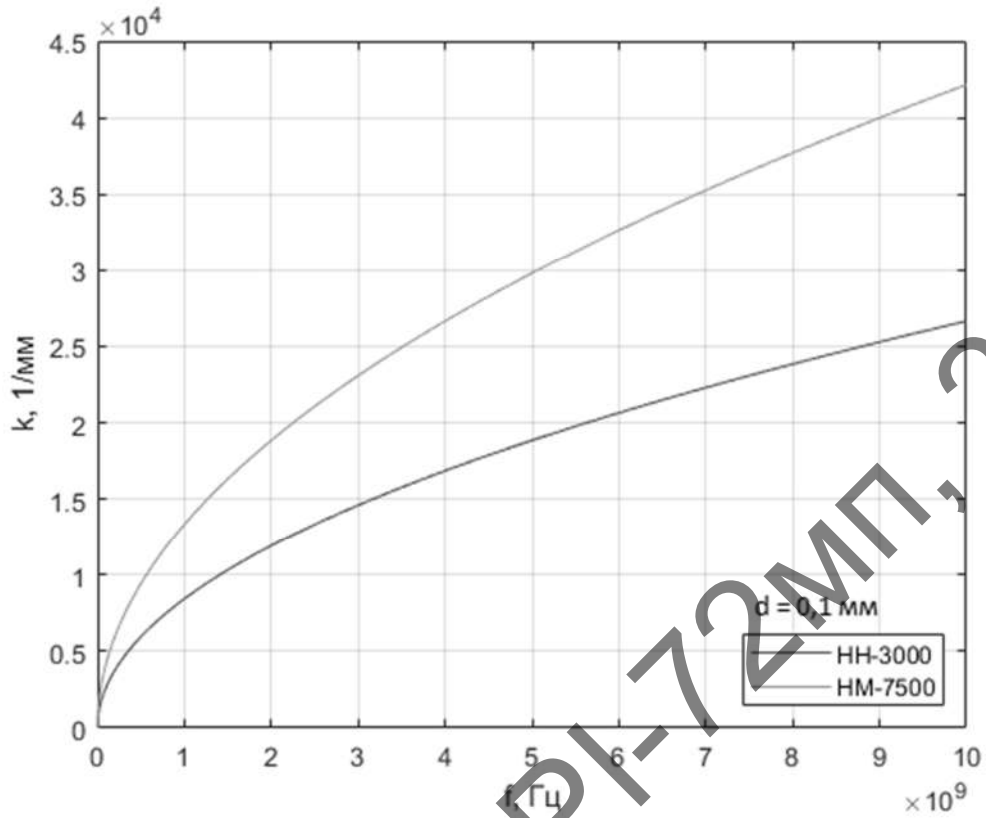


Рисунок 3.11 — Частотна залежність коефіцієнтів вихрових струмів

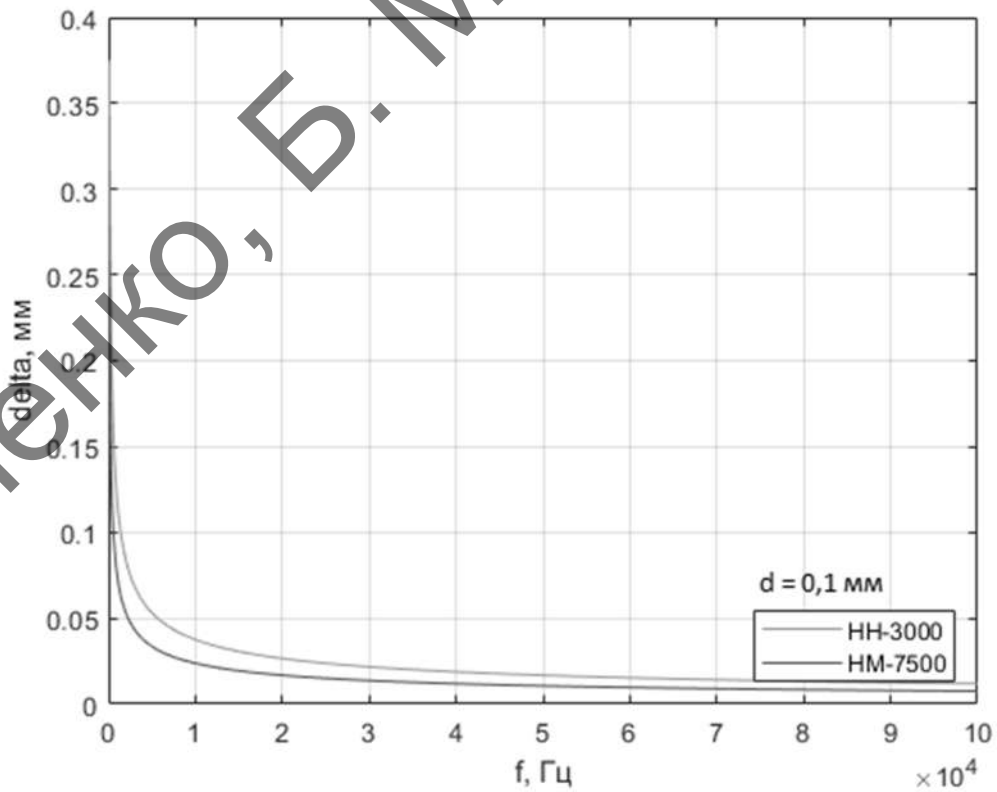


Рисунок 3.12 — Частотна залежність глибини проникнення високочастотного струму

3.3 Тришаровий екран

Особливістю будь-яких багатошарових екранів є висока ефективність екранування та відносно малі втрати в екрані. При роботі радіоелектронного пристрою в діапазоні надвисоких частот питання екранування є особливо важливим, тому зазвичай використовують саме багатошарові екрани.

3.3.1 Принцип дії багатошарових екранів

Електромагнітні екрани комбінованої багатошарової конструкції застосовуються у тому випадку, коли є необхідність у високому екрануючому ефекті. Такі екрани зазвичай складаються з немагнітних та феромагнітних шарів, що послідовно чередуються.

Висока ефективність екранування таких екранів пояснюється тим, що на межах розподілу «діелектрик — метал — діелектрик» у однорідних екранах енергія завад зустрічає на своєму шляху невідповідність хвильових характеристик суміжних середовищ (Z_d та Z_m). Чим більшою є ця невідповідність, тим більший екрануючий ефект. У зв'язку з тим, що $Z_d \neq Z_m$, енергія завади частково відбивається і лише частково проходить у екранований простір.

У багатошаровому екрані, складеному з металів з різними хвильовими опорами Z_m діє ціла система таких багатократних відбиттів від меж електричних невідповідностей, тобто $Z_{m1} \neq Z_{m2} \neq Z_{m3} \neq \dots \neq Z_{mn}$. Тому екран, що складається з декількох тонких шарів різних металів, буде мати вищу ефективність екранування порівняно з одношаровим екраном еквівалентної товщини.

В одношаровому екрані є дві межі розділу — «діелектрик — метал» та «метал — діелектрик», на яких відбувається відбиття.

У випадку тришарового екрана таких меж поділу вже чотири, оскільки додаються ще дві межі між різними металевими шарами. Суттєвим є порядок розташування шарів, їх електрична поєднуваність, співвідношення товщин шарів, а також їхнє місце відносно впливу електромагнітного поля [21].

Варто зазначити, що якщо зовнішні шари багатошарового екрана виконані з немагнітних матеріалів, то втрати в такому екрані порівняно невеликі.

3.3.2 Відбиття в тришарових екранах за різних умов

Дослідимо коефіцієнти екранування відбиттям для двох випадків:

- 1) Матеріали шарів приєднані один до одного.
- 2) Між шарами металів знаходяться тонкі шари діелектрика (повітря).

Ефективність екранування відбиттям визначається за наступною формулою:

$$S_B = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th} kd}.$$

Звідси коефіцієнт екранування відбиттям $B_B = 20 \lg \left| \frac{1}{S_B} \right|$, дБ.

За відомими формулами розрахуємо коефіцієнти екранування для обох випадків. На рис. 3.13 — 3.14. подані частотні залежності коефіцієнтів екранування відбиттям.

Величина ефективності екранування є прямою функцією відношення хвильових опорів середовищ N . Для отримання найменшого значення S і, відповідно, високого коефіцієнта екранування, необхідно, виконання такої умови:

$$N \rightarrow \infty$$

У першому випадку шари металів безпосередньо контактують один з одним, діелектрик між шарами відсутній. Тоді $N_1 = \frac{Z_{M1}}{Z_{M2}}$, причому N — величина незначна. Відповідно до цього значення ефективності S є відносно великим.

При наявності між шарами металів діелектрика (повітря) маємо наступний вираз для відношення хвильових опорів:

$$N_2 = \frac{Z_D}{Z_M}.$$

У цьому випадку $N_2 \gg N_1$, відповідно, $S_2^e \ll S_1^e$. За таких умов коефіцієнт екранування буде найбільшим.

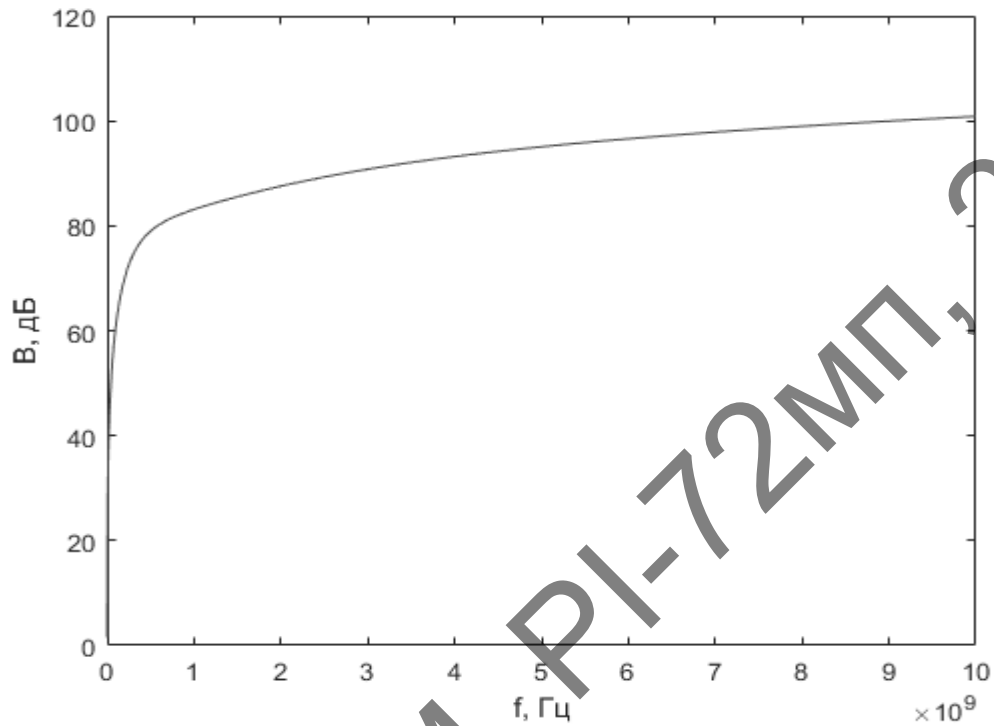


Рисунок 3.13 — Частотна залежність екранування відбиттям при щільному приляганні шарів

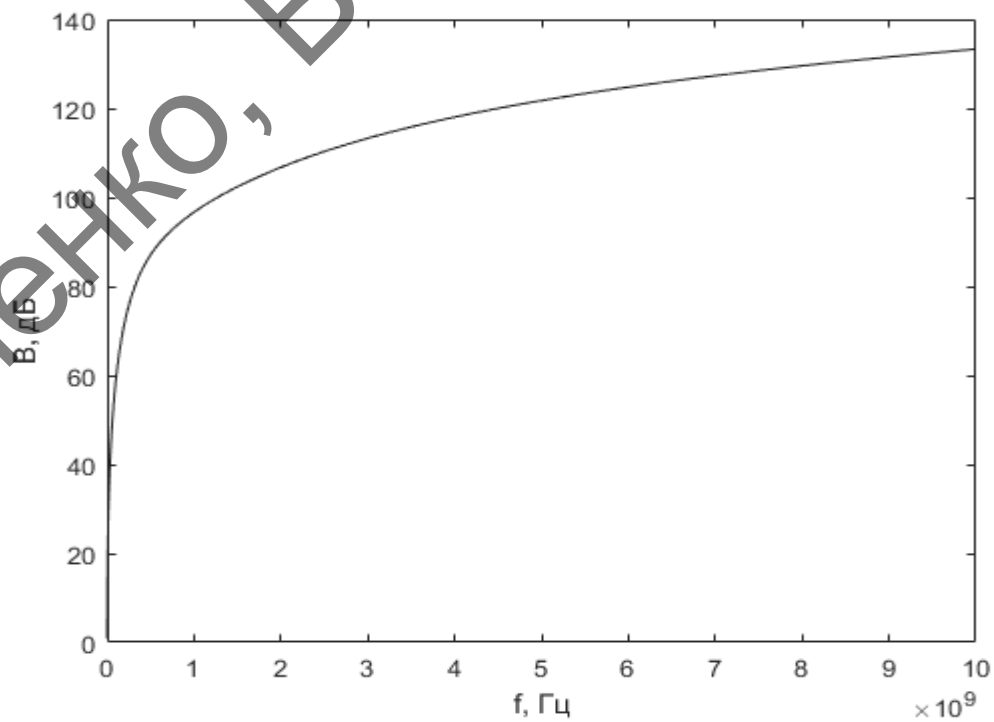


Рисунок 3.134 — Частотна залежність екранування відбиттям при внесенні діелектрика між шарами металів

Для якісного порівняння сумістимо отримані залежності на рис. 3.15

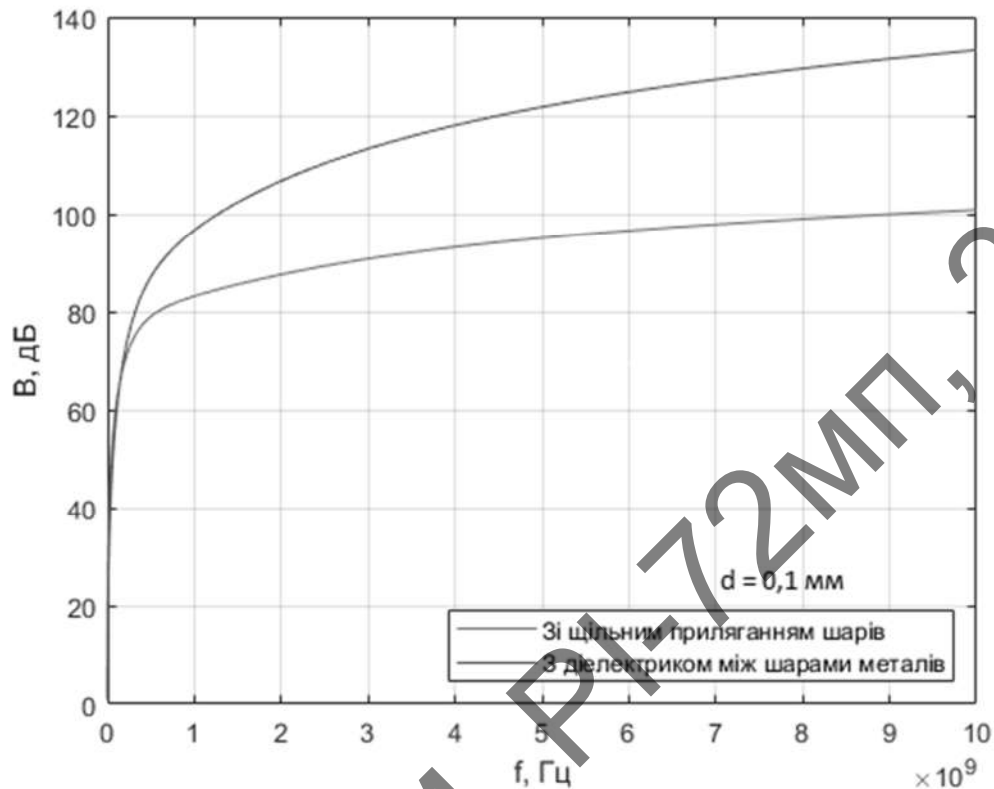


Рисунок 3.15 — Порівняння коефіцієнтів екранування відбиттям для різних випадків

З отриманої залежності видно, що більш ефективним є екран, в якому між шарами суміжних металів міститься діелектрик. Це пов'язано з тим, що кількість відбиттів в екрані зростає, а поле зовнішньої завади завдяки багатократному відбиттю суттєво згасає.

3.3.3 Розрахунки коефіцієнтів екранування тришарових екранів

На рис. 3.16 подані частотні залежності коефіцієнтів екранування для двох тришарових екранів. В першому випадку у якості немагнітних шарів використовується мідь, у іншому — алюміній. У якості магнітного матеріалу в обох випадках використовується електротехнічна сталь [22].

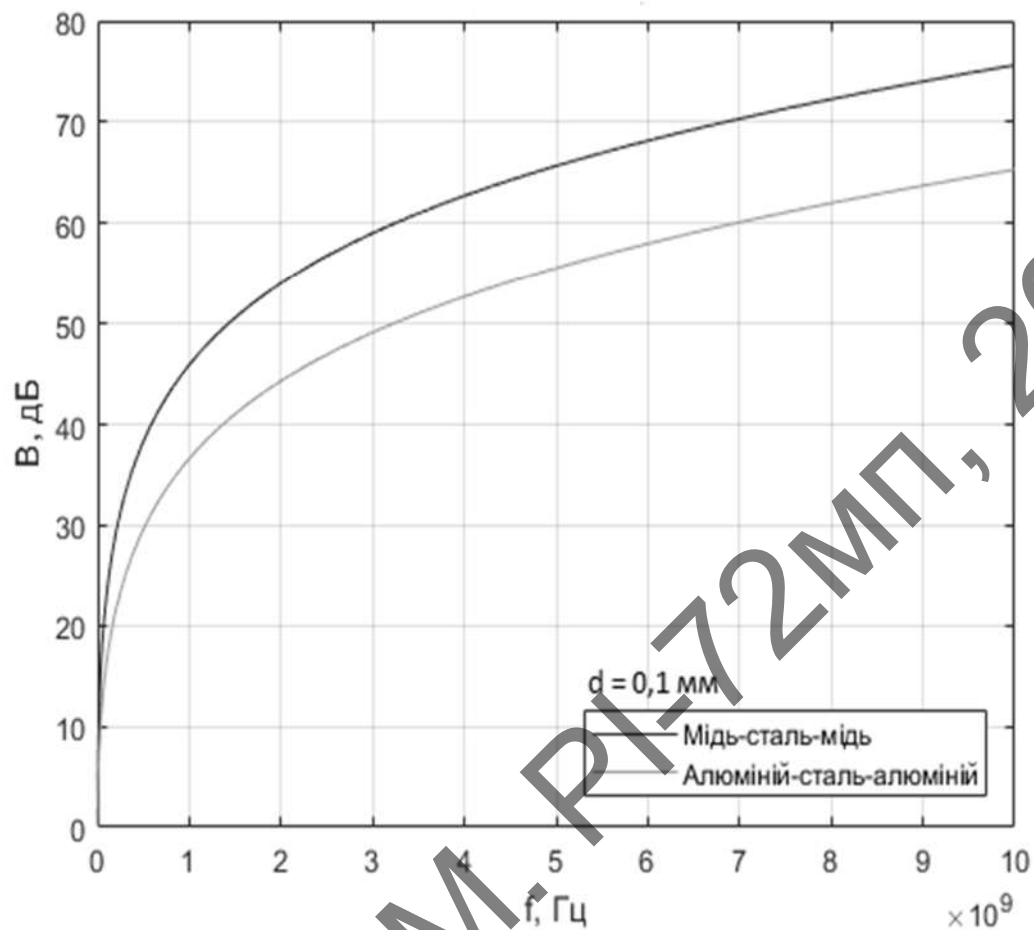


Рисунок 3.146 — Частотна залежність коефіцієнтів екранування тришарових екранів

Виходячи з отриманої залежності, можна зробити висновок, що у якості немагнітних шарів для багатошарових екранів, а у конкретному випадку — тришарових, доцільним буде використовувати мідь, оскільки вона має кращу характеристику при екрануванні відбиттям і майже не поглинає. Алюміній також майже не поглинає електромагнітне поле, проте, має суттєво менший коефіцієнт екранування при екрануванні відбиттям.

Проведемо розрахунок коефіцієнтів тришарових екранів, в яких немагнітними шарами є мідь, а у якості магнітного шара виступають ферити НН-3000 та НМ-7500. Порівняльна частотна залежність коефіцієнтів екранування для звичайних екранів та екранів з використанням феромагнітних матеріалів подана на рис. 3.17

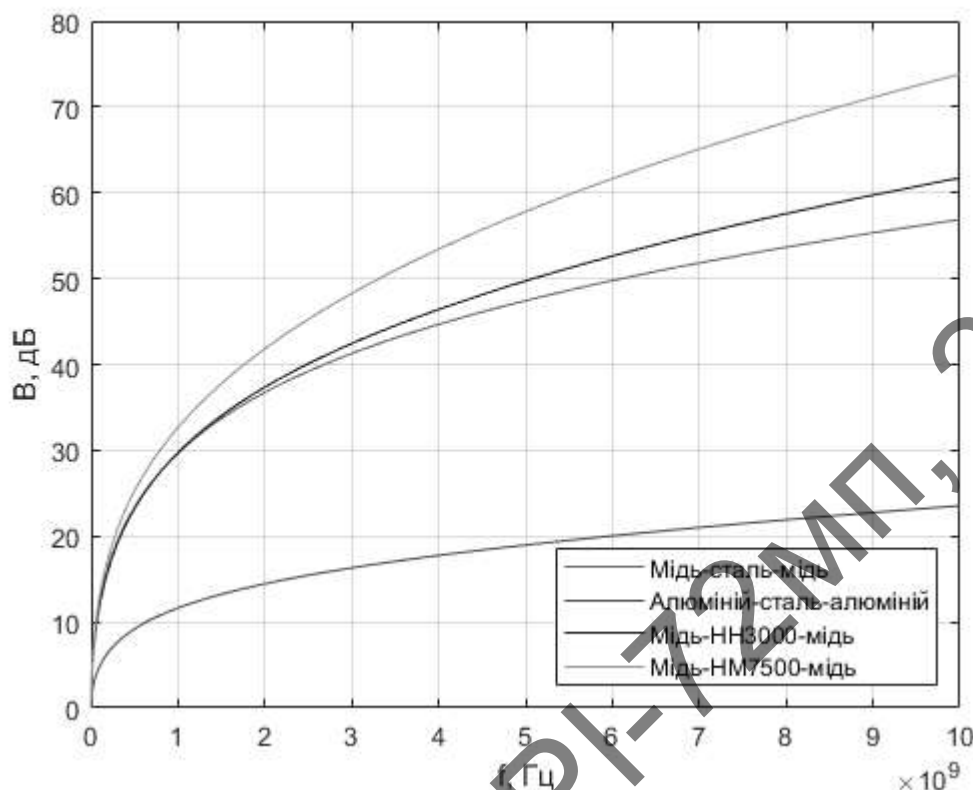


Рисунок 3.157 — Порівняльна характеристика коефіцієнтів екранування тришарових екранів з традиційних та феромагнітних матеріалів

Отримані результати демонструють, що найкраще екранування забезпечується у випадку використання феритів та міді. Проте, є деяка складність у виготовленні багатошарових екранів з феритами товщиною 0,1 мм.

Висновки за розділом

Проведені розрахунки та їх подальша обробка демонструють, що в діапазоні надвисоких частот (1 ГГц..10 ГГц) найбільший коефіцієнт екранування мають ферити НМ-7500 та НН-3000, а також електротехнічна сталь з магнітною проникністю 200. Коефіцієнт екранування сталі гірший, ніж у феритів, проте також забезпечує захист РЕА від впливів електромагнітного поля завади. Також варто зазначити, що електротехнічна сталь є дешевшою за ферити. Оскільки досліджувався широкий діапазон частот, то й на низьких частотах сталь та ферити демонструють високу ефективність екранування завад.

Розрахунок проводився для шарів екранів товщиною 0,1 мм, що менше довжин хвиль в діапазоні надвисоких частот.

Серед немагнітних матеріалів найбільший коефіцієнт екранування має мідь, дещо гіршу ефективність екранування забезпечує алюміній. Також у якості матеріалу немагнітного шару можна рекомендувати латунь, оскільки вона є дешевшою за мідь і забезпечує менший коефіцієнт екранування в зв'язку з меншою електричною провідністю.

Отримані результати дають можливість рекомендувати використання електротехнічної сталі та міді для створення багатошарових екранів як низькочастотних так і надвисокочастотних електромагнітних полів завад.

Ферити є перспективними для застосування при екрануванні РЕА, але рекомендувати їх для використання зарано, оскільки виготовлення таких екранів є складним, особливо для сферичних та циліндричних екранів.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Цей розділ магістерської дисертації присвячений маркетинговому аналізу стартап-проекту для визначення можливості ринкового впровадження та можливих шляхів реалізації даного впровадження [23].

4.1 Опис ідеї

В цьому підрозділі проводиться аналіз змісту ідеї, можливі напрямки застосування, відмінності від існуючих рішень та вигоди, які може отримати користувач товару.

Таблиця 4.1 — Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Екранування радіо-електронних засобів від дії електромагнітних завад	Наука	Здешевлення процесу розроблення екранів РЕЗ для захисту від електромагнітних НВЧ-полів
	Виробництво	

Основний конкурент розроблюваного проекту — пакет прикладного програмного забезпечення *CST Studio Suite*, який дозволяє моделювати пристрої надвисоких частот.

Таблиця 4.2 — Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари конкурентів		W (Слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1	Простота					✓
2	Дешевизна					✓
3	Швидкодія					✓

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В реалізації даного проекту можна застосовувати автоматизовані розрахунки за допомогою математичних систем. Розглянуто чотири системи:

1. *Maple* — математична система для складних розрахунків, створення програм виконується *C* — подібною мовою програмування.
2. *Mathcad* — математична система для відносно нескладних розрахунків, є найпростішою з-поміж представлених, оскільки майже не потребує знань програмування.
3. *MATLAB* — потужна математична система, що для розрахунків використовує операції з векторами та матрицями. Написання програм виконується мовою програмування *MATLAB*, яка подібна до *C*.
4. Ручне створення потрібних алгоритмів.

Таблиця 4.3 — Технологічна здійсненність проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Екранування радіо-електронних засобів від дії електромагнітних завад	Maple	Так	Ні
2		Mathcad	Так	Ні
3		MATLAB	Так	Так
4		Ручне створення потрібних алгоритмів	Ні	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту — розробка програм для розрахунку екранів в MATLAB				

Даний проект можливо реалізувати шляхом створення потрібних алгоритмів у математичній системі *MATLAB*, оскільки у автора є знання для роботи з цією системою.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

В цьому підрозділі проводиться визначення ринкових можливостей, що можна використати для ринкового впровадження проекту, ринкових загроз, що можуть перешкодити його реалізації. Визначення ринкових можливостей дозволяє планувати можливі напрями розвитку проекту, враховуючи стан ринкового середовища, потреб у продукті потенційних клієнтів, пропозиції проектів, що можуть скласти конкуренцію.

Таблиця 4.4 — Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	1
2	Загальний обсяг продажів, ум. од.	Невідомий
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входження	Невідома
5	Середня норма рентабельності в галузі, %	Невідома
6	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують

За результатами попереднього аналізу потрібно зробити висновок щодо привабливості для входження.

Визначимо групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.5 — Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова ауди- торія	Відмінності у поведінці різ- них потенцій- них цільових груп клієнтів	Вимоги спо- живачів до товару
1	Створення електро- магнітних екранів з потрібними частот- ними характеристи- ками	Розробники пристроїв над- високих частот, наукові праців- ники	Невідомі	Точність, швидкість розрахунків, адекватність отриманих результатів

Проведемо аналіз ринкового середовища та складемо таблиці чинників, що сприяють та перешкоджають ринковому впровадженню проекту.

Таблиця 4.6 — Чинники можливих загроз

№ п/п	Чинник	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Вдоскона- лення ПЗ конкурентів	Додання нового функціоналу та вдосконалення існуючих алгоритмів у <i>CST Studio Suite</i> , аналогічних до розроблюваних у цьому проекті	Вихід з ринку

Таблиця 4.7 — Чинники можливостей

№ п/п	Чинник	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новий функціо- нал розроблюва- ного проекту	Додання нових можливостей у розроблюваний проект	Розробка нового функціоналу

Проведемо аналіз пропозиції та визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8 — Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції — монополістична	Одне підприємство займає майже всю нішу	Значний
За рівнем конкурентної боротьби — національне	Підприємство відоме в межах держави	Значний
За галузевою ознакою — внутрішньогалузеве	Конкуренція діє в рамках однієї галузі	Значний
За характером конкурентних переваг — цінова	Товар має високу вартість	Значний
Конкуренція за видами товарів — невідомо		Невідомий
За інтенсивністю — невідомо		Невідомий

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції у галузі.

Таблиця 4.9 — Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	<i>CST Studio Suite</i>	Розробники ПЗ для моделювання НВЧ-структур	Невідомі	Невідомі	Невідомі

Виходячи з результатів аналізу, можна зробити висновок, що робота на даному ринку можлива, незважаючи на конкурентну ситуацію. Але для поширення продукту він повинен володіти рядом особливостей, що відрізнятимуть його від існуючого конкурента.

Перелічимо фактори конкурентоспроможності.

Таблиця 4.10 — Обґрунтування чинників конкурентоспроможності

№ п/п	Чинник конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Дешевизна	Поширюється безкоштовно і доступна для кожного
2	Простота	Розробка не вимагає від користувача особливих знань в галузі

Проведемо аналіз сильних та слабких сторін проекту

Таблиця 4.11 — Сильні та слабкі сторони проекту

№ п/п	Чинник конкурен- тоспромож- ності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ро- зроблюваним проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Дешевизна								
2	Простота								

Проведемо SWOT-аналіз розроблюваного проекту

Таблиця 4.12 — SWOT-аналіз

Сильні сторони: Простота Дешевизна	Слабкі сторони Невідома для існуючого ринку компанія Відсутність стартового капіталу
Можливості: Розширення та вдосконалення функціональності Впровадження нових технологій	Загрози: Велика кількість продуктів-замінників

Виходячи з результатів SWOT-аналізу проекту робимо висновок, що потреба у альтернативному ринковому впровадженні розроблюваного проекту відсутня.

4.4 Розробка ринкової стратегії проекту

Першим кроком розроблення ринкової стратегії проекту є визначення стратегії охоплення ринку та опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.13 — Цільові групи споживачів

№ п/п	Профіль цільової групи потенцій- них споживачів	Стан готов- ності спо- живачів прийняти продукт	Орієнтов- ний попит в межах цільової групи	Інтенсив- ність кон- куренції в сегменті	Простота входження у сегмент
1	Науковці	Готові	Високий	Значна	Важко
2	Розробники при- строїв НВЧ	Готові	Високий	Незначна	Важко
Обрані цільові групи: науковці та розробники пристроїв надвисоких частот					

Для роботи в обраних ринкових сегментах необхідно визначити базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.14 — Базова стратегія розвитку

№ п/п	Стратегія охо- плення ринку	Ключові конкурентоспро- можні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Диференційова- ний маркетинг	Простота, дешевизна	Стратегія спеціалізації

Тепер потрібно обрати конкурентну поведінку.

Таблиця 4.15 — Базова стратегія конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є про- ект «піо- нером» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових спо- живачів, або заби- рати існуючих у конкурентів	Чи буде ком- панія копіювати основні характе- ристики товару конкурента?	Стратегія конку- рентної по- ведінки компанії
1	Ні	Так	Ні	Заняття конку- рентної ніші

Наступним кроком є розроблення стратегії позиціонування. Вона полягає у формуванні ринкової пропозиції, за якою споживачі мають можливість ідентифікувати проект з-поміж інших.

Таблиця 4.16 — Стратегія позиціонування

№ п/п	Вимоги цільової аудиторії до то- вару	Базова стратегія розвитку	Ключові конку- рентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Асоціації, що мають сформувати ком- плексну позицію власного проекту
1	Точність			
2	Адекватність та зрозумілість ре- зультатів			

4.5 Розробка маркетингової програми стартап проекту

Необхідно сформувати маркетингову концепцію товару, який отримає кінцевий споживач

Таблиця 4.17 — Ключові переваги концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги пе- ред конкурентами
1	Розробка електро- магнітних екранів для захисту апарату- ри від завад НВЧ-діапазону	Просте створення структур з потрібними частотними характери- стиками	Точність, простота, де- шевизна

Тепер необхідно визначити рівні моделі товару

Таблиця 4.18 — Рівні моделі товару та їх суть

Рівні товару	Суть рівня, його складові
Товар за задумом	Спрощення розробки електромагнітних екранів за до- помогою готових алгоритмів
Товар у реаль- ному виконанні	Властивості: 1. Простота 2. Дешевизна 3. Точність
	Якість: апробація на фізичних моделях
	Пакування: відсутнє
	Марка : відсутня
Товар з підкріпленням	До продажу: невідомо
	Після продажу: невідомо

Товар не матиме захисту від копіювання та буде вільно поширюватись за принципом «*as is*» («як є»).

Тепер необхідно визначити цінові межі для продажу

Таблиця 4.19 — Визначення меж встановлення цін

№ п/п	Рівень цін на то- вари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встанов- лення ціни на то- вар
1	50-70 тис. ум. од	До 20 тис. ум. од	Середній	Безкоштовно

Визначимо оптимальну систему збуту

Таблиця 4.20 — Система збуту товару

№ п/п	Специфіка купівельної по- ведінки цільових груп споживачів	Функції збуту, що має виконувати по- стачальник товару	Глибина ка- налу збуту	Оптимальна система збуту
1	Невідома	Вільний доступ	Невідома	Вільний доступ

Проведемо розробку концепції маркетингових комунікацій

Таблиця 4.21 — Маркетингові комунікації

№ п/п	Специфіка поведінки цільових груп спо- живачів	Канали ко- мунікацій, які викори- стовують споживачі	Ключові по- зиції, що обрані для пози- ціонування	Завдання ре- кламного звернення	Концепція ре- кламного звернення
1	Невідома	Мережа Ін- тернет, нау- кові публікації	Можливості проекту	Донесення можливостей проекту	Акцентування на сильних сторонах про- екту

Висновки за розділом

Виходячи з проведеного аналізу було отримано, що є можливість ринкової комерсализації стартап-проекту, тому що на ринку є попит на продукцію.

Але, зважаючи на те, що проект не має на меті матеріальне збагачення авторів, проект буде поширюватись безкоштовно через мережу Інтернет без будь-яких обмежень та захисту від копіювання. Виходячи з цього, комерсализація стартап-проекту не має сенсу.

Ніколенко, Б. М. РІ-72МП, 2018

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Відповідно до статті 1 Закону України «Про охорону праці» охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Даним законом визначені основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, на гідні безпечні та здорові умови праці. Дотримання безпечних умов праці є обов'язковим для будь-якого підприємства будь-якої форми господарювання, яке використовує найману працю. Ухилення від виконання Закону України «Про охорону праці» є тяжким злочином та тягне за собою адміністративну або кримінальну відповідальність.

Даний розділ магістерської дисертації присвячений розробці комплексу заходів з охорони праці при виконанні науково-дослідної роботи.

У дисертації необхідно проаналізувати умови праці з огляду на фактори, що шкідливо впливають на здоров'я працівників та на якість роботи, що ними виконується. Також потрібно провести розробку заходів по зниженню впливів шкідливих та небезпечних факторів до допустимих значень. Найбільш шкідливими факторами, що виникають при виконанні науково-дослідних робіт є: небезпека ураження електричним струмом; незадовільна освітленість робочих місць чи підвищена яскравість; вплив електромагнітних випромінювань відеодисплейних терміналів персональних електронно-обчислювальних машин (ВДТ ПЕОМ); запиленість чи загазованість робочої зони; незадовільні метеорологічні умови; психофізичні перевантаження тощо [24].

В даному розділі визначені основні потенційно шкідливі і небезпечні чинники, а також запропоновані відповідні технічні рішення та організаційні заходи з безпеки, гігієни праці та виробничої санітарії

5.1 Визначення основних потенційно шкідливих і небезпечних виробничих чинників при виконанні науково-дослідної роботи

В магістерській дисертації проводиться дослідження характеристик матеріалів електромагнітних екранів, шляхом комп'ютерного моделювання у спеціалізованих математичних середовищах.

До основних шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на працівників, задіяних на виробництві розроблюваного пристрою, можуть належати наступні:

- Недостатня освітленість робочої зони (умови освітленості виробничих приміщень мають задовольняти нормам ДБНВ 2.5-28-2006);
- Незадовільні параметри мікроклімату робочої зони (значення показників мікроклімату у виробничих приміщеннях мають задовольняти нормам ГОСТ 12.1.005-88 та ДСН 3.3.6.042-99);
- Небезпека враження працівників електричним струмом;
- Підвищений рівень шуму на робочому місці (допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях слід контролювати відповідно до санітарних норм припустимих рівнів шуму на робочих місцях ДСН 3.3.6.037-99);
- Наявність випромінювання оптичного діапазону (рівні виробничого випромінювання ВДТ ПЕОМ на робочих місцях мають задовольняти нормам, що визначені в ДСанПіН 3.3.2.007-98);
- Підвищені рівні електромагнітного випромінювання (рівні випромінювання мають задовольняти вимогам ГОСТ 2.1.006-84).

Для забезпечення безпечного проведення науково-дослідної роботи необхідно, щоб всі перераховані вимоги відповідали допустимим або оптимальним значенням.

5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки, гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Відповідність параметрів робочого приміщення санітарним нормам

Для створення сприятливих умов праці для працівників при виконанні науково-дослідних робіт потрібно забезпечити дотримання санітарних норм. Основні вимоги до приміщень викладені в СНиП 2.09.02-85.

Висота виробничого приміщення складаватиме 4 м, довжина 8 м, ширина 6 м. Отже, площа приміщення становить 32 м^2 , а об'єм — 192 м^3 . Загальна кількість працівників становить 8 чоловік, тому на кожного працівника припадає площа 6 м^2 та об'єм 24 м^3 . Згідно СНиП 2.09.02-85 на одного працюючого в приміщенні повинна припадати площа не менше $4,5 \text{ м}^2$, а об'єм — не менше 15 м^3 , тому таке виробниче приміщення цілком відповідає санітарним вимогам.

Працівником виконуються дослідницькі роботи з технічною документацією, макетами вимірювальних приладів;. Такі роботи не вимагають систематичного значного фізичного навантаження і належать до легких фізичних робіт з енерговитратами до 120 ккал/год (категорія Ia, постійне робоче місце).

5.2.2 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Здоров'я працівника, а також рівень його працездатності залежать від метеорологічних умов — мікроклімату повітряного середовища, до якого входять швидкість руху повітря, відносна вологість, температура та інтенсивність теплового опромінення.

Мікроклімат виробничих приміщень — умови внутрішнього середовища цих приміщень, що впливають на теплообмін працівників з оточенням шляхами конвекції, кондукції, випаровування вологи та теплового випромінювання. Ці умови визначаються поєднанням температури, швидкості руху повітря та відносної вологості, температури поверхонь, що оточують працівника та інтенсивності теплового (інфрачервоного) опромінення.

Оптимальними вважаються такі поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалій та систематичній дії на організм людини забезпечують зберігання організму у нормальному тепловому стані без активізації механізмів терморегуляції. Такі умови мікроклімату забезпечують відчуття теплового комфорту та є передумовою для високого рівня працездатності робітників.

При відхиленні параметрів мікроклімату від оптимальних значень в організмі людини відбуваються спрямовані на терморегулювання процеси. Існує два види терморегуляції — фізична та хімічна. Фізична відбувається за допомогою теплопровідності (кондукції), конвекції, випаровування та випромінювання, а хімічна — шляхом зниження рівня обміну речовин в організмі.

Значні відхилення параметрів мікроклімату від оптимальних можуть стати наслідком ряду застудних захворювань, які можуть перейти у більш важкі форми, якщо не вжити відповідних заходів до оздоровлення та покращення мікроклімату приміщення.

Робочою зоною є простір, що обмежений конструкціями виробничих приміщень, які мають значну висоту над рівнем підлоги чи майданчика, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працівників. Склад повітря у робочій зоні залежить від складу атмосферного повітря, а також впливу на нього виробничих чинників, що утворюються в процесі трудової діяльності.

Нормальним для життєдіяльності людини є парціальний тиск 21331 Па (або 160 мм рт.ст.). Також необхідно, щоб концентрація кисню у повітрі приміщень становила не менше 19-20%.

Важливою умовою є те, щоб повітря мало визначений іонний склад. У ньому містяться позитивні та негативні іони, що за своєю рухливістю поділяються на легкі, середні та важкі. Позитивний вплив на життєдіяльність людини мають негативні іони кисню. Вміст легких іонів у повітрі виробничих та громадських приміщень, повітряне середовище яких піддається спеціальній обробці у системах кондиціонування, наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 — Допустимий вміст легких іонів у повітрі робочої зони

Рівень іонізації повітря	Число іонів у 1 см ² повітря		Значення показників полярності
	n^+	n^-	
Мінімально необхідний	400	600	-0,2
Оптимальний	1000-3000	3000-5000	від -0,67 до 0
Максимально допустимий	5000	5000	від -0,05 до +0,05

Бажаною умовою є відповідність рівня іонізації повітря в виробничому приміщенні оптимальному рівню [25].

Для забезпечення нормованих параметрів мікроклімату в робочій зоні використовують ГОСТ 12.4.021-75 та СНиП 2.04.05-84. Нормовані значення параметрів мікроклімату в робочій зоні зазначені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 — Нормовані значення параметрів мікроклімату робочої зони

Період року	Параметр мікроклімату	Нормативні значення параметрів мікроклімату	
		Оптимальні	Допустимі
Холодний	Температура, °C	22-24	21-25
	Відносна вологість, %	40-60	75
	Швидкість руху, м/с	Не більше 0,1	Не більше 0,1
Теплий	Температура, °C	23-25	22-28
	Відносна вологість, %	40-60	55 при +28°C
	Швидкість руху, м/с	Не більше 0,1	0,1-0,2

Потрібно дотримуватись оптимальних нормованих значень параметрів мікроклімату. Для цього треба використовувати спеціальні мікрокліматичні пристрої для обігріву та/або охолодження. Також варто зазначити, що мікроклімат впливає не лише на організм людини, а також і на вимірювальну техніку,

тому недотримання вимог мікроклімату може значно вплинути на точність показань вимірювань цієї техніки.

Теплим періодом року прийнято вважати період, який характеризується середньодобовою температурою зовнішнього середовища більше $+10^{\circ}\text{C}$. Холодним періодом року вважається період, який характеризується середньодобовою температурою зовнішнього середовища, що дорівнює $+10^{\circ}\text{C}$ та нижче.

5.2.3 Освітлення робочих місць

У світлий час доби використовується природне освітлення через вікна у стінах приміщення, а також штучне освітлення, що складається з загального і місцевого освітлення, тобто, є суміщеним.

Загальне штучне освітлення забезпечується за допомогою світильників з лампами денного світла типу ЛТБ-40, які мають потужність 40 Вт, індивідуальне освітлення робочого місця забезпечується настільними світильниками з лампами розжарювання потужністю 60 Вт та напругою 36 В.

Для розрахунку загального штучного освітлення у робочому приміщенні використаємо метод коефіцієнта використання світлового потоку, призначеного для розрахунку загального рівномірного освітлення горизонтальних поверхонь за відсутності предметів, що затемнюють. При цьому в розрахунках враховується пряме та відбите світло [26]. Необхідний світловий потік ламп у кожному світильнику визначається за формулою:

$$F_{\text{л}} = \frac{E_{\phi} \cdot k_z \cdot S \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta}, \quad (5.1)$$

Фактичне освітлення робочих місць штучним освітленням визначається за формулою:

$$E_{\phi} = \frac{N \cdot n \cdot \eta \cdot F_{\text{л}}}{k_z \cdot S \cdot z} \quad (5.2)$$

де $F_{\text{л}}$ — номінальний світловий потік лампи, лм;

N — кількість ламп, шт;

n — кількість ламп у світильнику, шт;

η — коефіцієнт використання світлового потоку;

S — площа приміщення, м^2 ;

k_z — коефіцієнт запасу, приймаємо $k_z=1,5$;

z — коефіцієнт нерівномірності освітлення, приймаємо $z=1,1$.

Для визначення коефіцієнта використання світлового потоку визначимо індекс приміщення i та коефіцієнт відбиття стелі ρ_n , стін ρ_c та робочої поверхні ρ_p за наступною формулою:

$$i = \frac{l \cdot b}{h_c \cdot (l + b)}, \quad (5.3)$$

де l — довжина приміщення, м;

b — ширина приміщення, м;

h_c — висота підвісу світильників, м.

Відповідно до (5.3), визначимо індекс приміщення:

$$i = \frac{8 \cdot 6}{3,2 \cdot (8 + 6)} = 1,07.$$

Коефіцієнт відбиття побіленої стелі $\rho_n=0,7$, побілених стін при незавішених вікнах $\rho_c=0,5$, середніх робочих поверхонь $\rho_p=0,3$.

Маючи значення індексу приміщення i , оберемо коефіцієнт використання світлового потоку з табличних даних. Отримаємо $\eta=0,43$.

Знаючи тип ламп, а це лампи ЛТБ-40 (чотири лампи з розсіювачем), за табличними даними визначимо номінальний світловий потік, лм. Отримаємо $F_{\lambda}=3120 \text{ лм}$, тоді маємо наступний вираз згідно формули (5.2):

$$E_{\phi} = \frac{3120 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 0,43}{48 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 677,5 \text{ лм}.$$

Штучне освітлення у приміщеннях регламентується нормами ДБНВ 2.5.-28-2006. Для зорової роботи категорії 3в при загальному освітленні значення потоку фактичного освітлення становить 600 лм. У нашому випадку

фактичне освітлення більше мінімально допустимого, тому робимо висновок, що освітленість приміщення відповідає нормам.

5.2.4 Електробезпека

Електроустаткування, що знаходиться у робочому приміщенні, згідно ГОСТ 12.2.007.0-77 належить до 0І, І та ІІ класів:

- 0І клас — вимірювальні прилади;
- І клас — системний блок ПЕОМ, має робочу ізоляцію відповідно ГОСТ 12.1.009-76;
- ІІ клас — ВДТ ПЕОМ, має подвійну робочу ізоляцію;

Все електроустаткування підключається до електромережі за допомогою трьохконтактних вилок, один з виводів якої підключається до заземленого виводу розетки. Підключення устаткування виконане у відповідності до вимог ПУЕ.

Робоче приміщення нежарке, сухе, належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки ураження персоналу електричним струмом. Відносна вологість повітря не перевищує 78%, температура не більша за +35°C, хімічно-агресивні середовища у приміщенні відсутні (ПУЕ).

Живлення електроприладів у приміщенні здійснюється від трифазної мережі із глухозаземленою нейтраллю напругою 220 В та частотою 50 Гц з використанням струмозахисних автоматів. У приміщенні застосовується схема занулення.

Для зменшення значень напруги дотику та відповідних їм величин струму, при нормальному і аварійному режимах роботи устаткування необхідно виконати повторне захисне заземлення нульового дроту.

Для перевірки вимикаючої здатності струмозахисних автоматів при аварійному режимі роботи електроустаткування доцільно виконати розрахунок струму короткого замкнення. Для цього використаємо наступну формулу:

$$I_{кз} \cong \frac{U_{\phi}}{R_0 + R_{\phi} + Z_m}, \quad (5.4)$$

де R_0 — опір нульового дроту (0,5 Ом);

R_ϕ — опір фазового дроту (0,5 Ом);

Z_m — розрахунковий опір трансформатора $\left(\frac{Z_m}{3} = 0,25\right)$.

Визначимо струм короткого замкнення:

$$I_{K3} \cong \frac{220}{0,5 + 0,5 + 0,25} = 102 \text{ A}.$$

Для надійної роботи автоматів необхідно виконання наступної умови:

$$I_{K3} > 1,25 \cdot I_{cp}. \quad (5.5)$$

Так як в робочому приміщенні використовується система максимального струмового захисту з $I_{cp} = 30 \text{ A}$, то дана вимога виконується

Отже, за електробезпекою робоче приміщення відповідає існуючим нормам.

5.2.5 Правила безпеки при експлуатації ВДТ ПЕОМ

Правила безпеки під час використання ВДТ ПЕОМ регламентуються ДСанПіН 3.3.2.007-98, ДСТУ ISO 09241:6-04 та НПАОП 0.00-1.28-2010. Ці стандарти встановлюють вимоги щодо безпеки та санітарно-гігієнічні вимоги до обладнання робочих місць користувачів ВДТ ПЕОМ та працівників, що виконують технічне обслуговування, ремонт та налагоджування ПЕОМ, ВДТ ПЕОМ, роботи з застосуванням ПЕОМ відповідно до стану техніки та досліджень у сфері безпечної організації робіт, пов'язаних з експлуатацією ПЕОМ та з урахуванням положень міжнародних нормативно-правових актів з цих питань.

5.2.6 Вимоги до приміщень, де розміщені ПЕОМ

Облаштування робочих місць, обладнаних ПЕОМ, повинно забезпечувати:

- належні умови освітлення приміщення і робочого місця, відсутність відблисків;

- оптимальні параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху, рівень іонізації повітря);
- належні ергономічні характеристики основних елементів робочого місця;

Будівлі та приміщення, в яких експлуатуються ЕОМ та виконуються їх обслуговування, налагодження і ремонт, повинні відповідати вимогам: СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания», СНиП 2.09.04-87 «Административные и бытовые здания», «Правил устройства электроустановок», затверджених Головдерженергонаглядом СРСР 1984 р. (ПУЕ), «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей», затверджених Головдерженергонаглядом СРСР 21.12.84 (ПТЕ, СНиП 2.08.02-89 «Общественные здания и сооружения» з доповненнями, затвердженими наказом Держкоммістобудування України від 29.12.94 № 106, СН 512-78 «Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин», затверджених Держбудом СРСР, ДСанПіН 3.3.2.-007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», затверджених МОЗ України 10.12.98.

Заборонено розмішувати робочі місця з ПК у підвальних приміщеннях, на цокольних поверхах, поряд з приміщеннями, в яких рівні шуму та вібрації перевищують допустимі значення (поряд з механічними цехами, майстернями тощо), з мокрими виробництвами, з вибухопожежонебезпечними приміщеннями категорій А і Б, а також над такими приміщеннями або під ними.

Приміщення мають бути обладнані системами водяного опалення, кондиціонування або припливно-витяжною вентиляцією відповідно до СНиП 2.04.05-91.

Згідно з НПАОП 0.00-1.28-2010 площу приміщень визначають із розрахунку, що на одне робоче місце вона має становити не менше ніж 6 м^2 , а об'єм не менше ніж 20 м^3 з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно

працюють у зміні. Приміщення являє собою кімнату розміром 8 х 4 м., висотою 6 м. Розмір дверного прорізу 1,5м.

Площу та об'єм приміщення знаходимо по формулах (5.6 – 5.7):

$$S = a \cdot b = 8 \cdot 4 = 32 \text{ м}^2 \quad (5.6)$$

$$V = S \cdot h = 32 \cdot 6 = 192 \text{ м}^3 \quad (5.7)$$

де $a = 8$ м – довжина;

$b = 4$ м – ширина;

$h = 6$ м – висота приміщення.

Занесемо фактичні та нормативні параметри приміщення у таблицю 5.3:

Таблиця 5.3 — Параметри робочого приміщення

Характеристика	Нормативне значення	Фактичне значення
Розрахункова площа приміщення	$> 6 \text{ м}^2$	32 м
Розрахунковий об'єм приміщення	$> 20 \text{ м}^3$	192 м ³
Висота приміщення	3,5..4 м	6 м
Розміри дверей	$\geq 1,1 \times 1,8 \text{ м}$	1,2x1,8 м
Відстань від стіни зі світловими прорізами до монітора	$\geq 1 \text{ м}$	1,5 м

Виходячи з отриманих результатів робимо висновок про те, що геометричні параметри робочого приміщення повністю відповідають нормативним вимогам.

Стіни, стелю, та підлогу приміщення оздоблюють матеріалами, дозволеними органами державного санітарно-епідеміологічного нагляду. Заборонено застосовувати полімерні матеріали (деревостружкові плити, шпалери, що можна мити, рулонні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик, тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини. За розміщенням робочих місць з ПЕОМ потрібно витримувати такі відстані: від стін зі світловими

прорізами не менше 1 м; між бічними поверхнями ВДТ не менше 1,2 м; між тильною поверхнею одного ВДТ та екраном іншого не менше 2,5 м; прохід між рядами робочих місць не менше 1 м. Робочі місця з ПЕОМ щодо світлових прорізів розміщують так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. ВДТ і клавіатура мають розміщуватися на оптимальній відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків і символів. Розміщення ВДТ ПЕОМ має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом $\pm 30^\circ$ від лінії зору працівника.

Усі зазначені вимоги відповідають робочому приміщенню, де проводяться дослідження.

5.2.7 Виробничий шум

Рівень шуму в приміщенні не повинен перевищувати 50 дБА.

Приміщення віддалене від проїжджої частини вулиці, тому основними джерелами шуму є устаткування та працівники.

Оскільки розглянуте приміщення не призначене для прийому відвідувачів і має невелику кількість працівників, то основними джерелами шуму в ньому є ПК, принтер, система кондиціонування, голоси працівників. Відсутні зовнішні джерела шуму.

Допустимі рівні звуку та звукового тиску подані у таблиці 5.4. Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку й еквівалентні рівні звуку на робочих місцях нормуються відповідно до ДСН 3.3.6.037-99. Загальний рівень звуку не перевищує 50 дБА.

Відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 та ДСН 3.3.6.037-99 захист від шуму в приміщенні, створеного на робочих місцях внутрішніми джерелами повинен здійснюватися наступними методами: зменшенням шуму в джерелі, раціональним плануванням і оздобленням робочого приміщення звукоізоляційними матеріалами. Результати відповідають допустимим, представленим у табл. 5.4.

Таблиця 5.4 — Допустимі рівні звукового тиску і звуку для постійного(непостійного) широкосмугового (тонального) шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску, дБ в стандартизованих октавних смугах частот із середньгеометричними значеннями, Гц									Допустимий рівень звуку, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Інженер технічної лабораторії	86	71	61	54	49	45	42	40	28	50

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в надзвичайних ситуаціях регламентується планами ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС). Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організаційних заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій, а також вирішення питань з пожежної безпеки.

5.3.1 Вимоги до організації ефективної роботи систем сповіщення персоналу у випадку надзвичайних ситуацій

Сповіщення виробничого персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації (НС), наприклад при пожежі, здійснюється відповідно до вимог НАПБ А.01.003-2009.

Необхідність обладнання виробничих приміщень певним типом системи оповіщення (СС) визначається згідно з додатком Е до ДБНВ.1.1-7-2002 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва».

При обладнанні виробничих будівель системою оповіщення, їх необхідно поділяти на зони оповіщення з урахуванням об'ємно-планувальних рішень будинків, шляхів евакуації, поділення на протипожежні відсіки тощо, а також з

урахуванням вимог, що наведені в примітці 1 таблиці Е.1 додатка Е до ДБНВ.1.1-7-2002.

Сповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- 1) поданням звукових або світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- 2) трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямки руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- 3) трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;
- 4) розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;
- 5) ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";
- 6) ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових показників напрямку евакуації;
- 7) дистанційним відкриванням дверей евакуаційних виходів;
- 8) зв'язком оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста) із зонами сповіщення.

Повинен бути забезпечений розподіл пріоритетів щодо повідомлень для виробничого персоналу у такій послідовності:

I (найвищий) — повідомлення оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста) під час пожежі, або у разі виникнення будь-якої іншої НС;

II — повідомлення, які записані на будь-якому носії та вмикаються автоматично від спрацювання систем пожежної автоматики, або за сигналом оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста);

III — службові повідомлення, що не стосуються організації та управління евакуацією людей.

Затримку часу оповіщення про НС для різних поверхів будинку необхідно передбачати з урахуванням злиття потоків людей на шляхах евакуації відпо-

відно до розрахунків по ГОСТ 12.1.004 «ССБТ. Пожежна безпека. Загальні вимоги».

Пульти управління СС необхідно розміщувати у приміщенні пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення (в разі його наявності). Ці приміщення повинні відповідати вимогам ДБНВ.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».

Встановлення звукових та мовних сповіщувачів у виробничих приміщеннях повинно виключати можливість концентрації та нерівномірного розподілу звуку.

Настінні звукові та мовні сповіщувачі кріпляться на висоті не менше 2,2 м від підлоги, при цьому відстань від стелі до оповіщувача повинна становити не менше 150 мм.

Звукові сповіщувачі повинні комбінуватися зі світловими, які працюють у режимі спалахування, у таких випадках:

- А) у приміщеннях, де люди перебувають у шумозахисному спорядженні;
- Б) у приміщеннях з рівнем шуму понад 95 дБ.

Евакуаційні світлові покажчики "Вихід" слід вмикати разом з основними освітлювальними приладами робочого освітлення.

Вимоги до світлових покажчиків "Вихід" приймаються відповідно до ДБНВ.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення».

Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж сповіщення приймаються згідно з вимогами до систем пожежної сигналізації за ДБНВ.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».

Вимоги до евакуаційного освітлення приймаються відповідно до ДБНВ.2.5-28-2006 «Природне та штучне освітлення».

СС в режимі «Тривога» повинна функціонувати протягом часу, необхідного для евакуації людей з будинку, але не менше 15 хвилин.

Електропостачання СС здійснюється за I категорією надійності згідно з ПУЕ від двох незалежних джерел енергії: основного — від мережі змінного струму, резервного — від акумуляторних батарей тощо.

Звукові сповіщувачі повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 54-3:2003 «Системи пожежної сигналізації. Частина 3. Сповіщувачі пожежні звукові».

5.3.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив, повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС) та державної пожежної охорони, вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце виникнення пожежі, наявність людей, а також своє прізвище;

- організувати сповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установи, яким повідомлено про виникнення НС, повинні:

- перевірити, чи викликано підрозділи ДСНС та державної пожежної охорони;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації наслідків НС;
- перевірити здійснення сповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які приймають участь у ліквідації наслідків НС;
- організувати зустріч підрозділів ДСНС та державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації пожежі.

Після прибуття підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

5.3.3 Пожежна безпека

Приміщення за рівнем пожежної безпеки та вибухонебезпечності належать до категорії В (пожежонебезпечні) згідно НАПБ Б.03.002-2007 та СНиП 2.09.02-5. У приміщенні знаходяться тверді горючі речовини, що не здатні переходити до зваженого стану, тому робочі зони за пожежною безпекою відносяться до класу II-Па.

Причиною виникнення пожежі у приміщенні можуть бути паління, пошкодження ізоляції струмоведучих дротів, коротке замикання та порушення правил експлуатації електроприладів.

У випадку виникнення пожежі повинна бути забезпечена можливість швидкої та безпечної евакуації працюючих через евакуаційні виходи. Необхідна кількість виходів, їх ширина та ступінь вогнестійкості будівлі мають відповідати вимогам СНиП 2.01.02-85 та СНиП 2.09.02-85. В будівлі є три евакуаційних виходи — один зі сторони фасаду будівлі, інші два з бічних сторін.

Кількість, місця розташування та умови зберігання засобів пожежогасіння (вогнегасники) мають відповідати вимогам ГОСТ 12.1.004-85 та ГОСТ 3675-98.

У приміщенні згідно вимог ДСТУ 3675-98 та ISO 3941-77 встановлюються два вогнегасники ВВ-4 — вуглекислотні об'ємом 4 літри для гасіння електроустановок напругою до 1000 В.

З метою забезпечення належної пожежної безпеки у приміщенні передбачаються наступні заходи:

- 1) Заборона паління в приміщенні;
- 2) Заборона експлуатації електрообладнання з саморобними запобіжниками або без них;
- 3) Перегрів та перевантаження при роботі обладнання є недопустимими;
- 4) Постійний контроль за станом засобів для гасіння пожежі;

- 5) Встановлення пожежних сповіщувачів рівномірно по всьому просторі приміщення;
- 6) Контроль за станом ізоляції струмоведучих дротів.

В робочому приміщенні виконані усі вимоги пожежної безпеки відповідно до НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Ніколенко, Б. М. РІ-72МП, 2018

ВИСНОВКИ

1. За результатами аналітичного огляду способів екранування електромагнітного випромінювання надвисокочастотного діапазону найбільш ефективним є екранування з використанням багатошарових конструкцій екранів з магнітних та немагнітних матеріалів.

2. Забезпечення електромагнітної сумісності як між пристроями та системами, так і між окремими функціональними вузлами одного пристрою має велике значення, оскільки суттєво впливає на можливість функціонування електронної апаратури. Для цього потрібно створювати екрануючі структури, до яких висуваються все жорсткіші вимоги. Оскільки екранування має два механізми — відбиття та поглинання, доцільно створювати багатошарові конструкції з необхідними товщинами шарів з магнітних та немагнітних матеріалів.

3. Комп'ютерне моделювання показало, що для екранування електромагнітного поля надвисокої частоти доцільно використовувати у якості основних матеріалів екранів сталь з великим значенням магнітної проникності (відносна величина 200 та більше), феромагнітні матеріали, серед немагнітних матеріалів — мідь, алюміній. За результатами моделювання серед одношарових екранів найбільший коефіцієнт екранування у фериту НМ-7500. Якщо розглядати багатошарові електромагнітні екрани (в магістерській дисертації досліджується тришаровий екран), то найкращі результати демонструє електромагнітний екран, що має зовнішні мідні шари та внутрішній шар зі сталі з магнітною проникністю 200, а також феритів НМ-7500 та НН-3000.

4. Шляхом комп'ютерного моделювання було досліджено ефективність екранування тришарових плоских екранів з щільним приляганням шарів металів один до одного та при наявності між шарами металів діелектрика. Дослідження показало, що за наявності діелектрика між шарами коефіцієнт екранування суттєво зростає (на 20 дБ вище порівняно з кон-

струкцією з щільним приляганням металів один до одного), особливо в діапазоні надвисоких частот, що і є необхідною умовою. Виходячи з цього, такі екрани можливо рекомендувати для подальших досліджень.

Ніколенко, Б. М. РІ-72МП, 2018

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Газизов Т. Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. — Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. — 256 с.
2. Комиссаров Ю. А., Родионов С. С., Князев А. Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1984. — 335 с.
3. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М. Теория поля // М.: Наука, 1988. — 512с.
4. G. Sindura, K. Ram Prakash, P. Salil. Control of electromagnetic waves through electromagnetic shielding — режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5760158>. — Назва з екрану.
5. EMC Formulas — режим доступу: http://www.ieca-inc.com/images/EMC_Formulas_and_Equations.pdf. — Назва з екрану.
6. Вольман И. И., Пименов Ю. В. Техническая электродинамика. — М.: Связь, 1971. — 487 с.
7. Dave Bursky. RF Shielding: The Art and Science of Eliminating Interference — режим доступу: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jan/rf-shielding-the-art-and-science-of-eliminating-interference>. — Назва з екрану.
8. Ионон А. Д., Попов Б. В. Линии связи. — М.: Радио и связь, 1990. — 165 с.
9. S. Kovar. Design of shielding enclosure to protect security devices — режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8293543>. — Назва з екрану.
10. Гроднев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. — М.: Радио и связь, 1972. — 112 с.
11. Tim Williams. Designing for EMC — режим доступу: http://www.ieca-inc.com/images/Designing_for_EMC.pdf. — Назва з екрану.

12. Зінковський Ю. Ф., Клименко В. Г. Електромагнітна, інформаційна захищеність та сумісність електронних апаратів: Навчальний посібник для студентів вищих технічних закладів. — Ж.: ЖІТІ, 1999. — 376 с.

13. Теория и методы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств /Под ред Ю. А. Феокистова. — М.: Радио и связь, 1988. — 215 с.

14. Дьяконов В. П. MATLAB: Учебный курс //СПб: Питер, 2001 — 592 с.

15. Хвильовий опір — режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Хвильовий опір](https://uk.wikipedia.org/wiki/Хвильовий_опір) — Назва з екрану. .

16. Jasna Pasic. Approach to faulted line impedance calculation — режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/619662>. — Назва з екрану.

17. Зиньковский Ю. Ф., Клименко В. Г. Расчет волновых сопротивлений излучателей помех при экранировании //Вестник РТФ КПИ. Радиотехника, 1993. — Вып. 30. — С. 58.

18. Kyoung-Chul Min. Eddy-Current Loss Analysis of Noncontact Magnetic Device With Permanent Magnets Based on Analytical Field Calculations — режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7118733>. — Назва з екрану. .

19. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования / Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1980. — 478 с.

20. Tim Williams. Using ferrites for interference suppression — режим доступу: http://www.ieca-inc.com/images/Using_ferrites_for_interference_suppression.pdf. — Назва з екрану.

21. Y. Trenkler, L.E. McBride. Shielding improvement by multi-layer design — режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/252721>. — Назва з екрану.

22. Ніколенко Б. М. Електромагнітні екрани для надвисокочастотних полів / Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції / ДВНЗ "УДХТУ". — Дніпро: Баланс-клуб, 2018. — с. 91 - 93.

23. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. — Київ : НТУУ "КПІ", 2016. — 28 с.

24. Ткачук К.Н., Зацарний В.В. та ін. Охорона праці та промислова безпека. Навчальний посібник. — К.: Лібра, 2010. — 559 с.

25. ДСН 3.3.6.042-99 "Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень" — К.: МОЗ України, 2000. — 12 с.

26. Методичні вказівки до розробки розділу "Охорона праці" в дипломних проектах /роботах/магістерських дисертаціях для студентів РТФ освітнього рівня бакалавр/магістр. Укладачі: С. Ф. Каштанов, А. М. Гусєв — К.: НТУУ "КПІ", 2011. — 33 с.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри

радіоконструювання і виробництва

радіоапаратури, д.т.н., професор

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Є. А. Нелін

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської дисертації

з теми: «Електромагнітні екрани для надвисокочастотних полів»

Київ 2018

1 Підстава для виконання

Підставою для виконання магістерської дисертації (МД) є завдання, видане кафедрою радіоконструювання та виробництва радіоапаратури, керівник та тема МД затверджені наказом № _____ від «___» _____ 2018 р.

Термін виконання:

початок 01 вересня 2017 р,

закінчення: 30 листопада 2018 р.

2 Мета і призначення магістерської дисертації

Метою дисертації є моделювання та аналіз частотних характеристик екранування для різних матеріалів та формулювання рекомендацій по використанню цих матеріалів як екранів.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- виконати аналітичний огляд джерел інформації;
- проаналізувати особливості математичної моделі, що використовується для моделювання;
- розробити комп'ютерну модель;
- дослідити частотні залежності коефіцієнтів екранування магнітних та немагнітних матеріалів;
- дослідити частотні залежності хвильових опорів для різних матеріалів;
- дослідити частотні залежності коефіцієнтів вихрових струмів;
- проаналізувати результати, порівняти залежності для різних матеріалів;
- дослідити коефіцієнти екранування для комплексного тришарового екрана.
- зробити висновки за результатами досліджень.

3 Вихідні дані для проведення магістерської дисертації

Діапазон частот: 10 кГц..10 ГГц.

Досліджувані матеріали та їх характеристики наведені у табл.1:

Таблиця 1 — Характеристики досліджуваних матеріалів

Матеріал	$\sigma_a, \frac{См}{м}$	$\rho, \frac{Ом \cdot мм^2}{м}$	μ
Алюміній	$2,5 \cdot 10^7$	0,04	0,99
Мідь	$5,62 \cdot 10^7$	0,0178	1
Сталь 200	$3,7 \cdot 10^6$	0,27	200

4 Виконавці НДР

Виконавець — магістрант гр. РІ-72мп Ніколенко Богдан Миколайович.

Науковий керівник — д.т.н., проф. Зіньковський Юрій Францевич.

5 Етапи магістерської дисертації та термін їх виконання

№	Назви етапів	Термін виконання		Форма звітності
		початок	кінець	
1	Аналіз джерел інформації			Звіт магістра, 1-ша публікація
2	Теоретичні дослідження			Звіт магістра, Розділ 1 МД
3	Комп'ютерне моделювання			Звіт магістра, комп. моделі, розділи 2, 3 МД
4	Представлення результатів МД			Магістерська дисертація, презентація
5	Захист МД			

6 Вимоги до виконання МД

1. Виконати аналітичний огляд.
2. Розробити комп'ютерну модель в математичному середовищі MATLAB.
3. Розрахувати частотні залежності коефіцієнтів екранування, хвильових опорів та коефіцієнтів вихрових струмів для заданих матеріалів.
4. Порівняти отримані залежності для заданих матеріалів.
5. Проаналізувати отримані результати.
6. Зробити висновки за результатами.

7 Очікувані результати МД

- результати аналітичного огляду
- комп'ютерна модель;
- частотні залежності коефіцієнтів екранування, хвильових опорів, коефіцієнтів вихрових струмів заданих матеріалів;
- частотні залежності розрахованих параметрів;
- аналіз і порівняння отриманих результатів;
- висновки;
- публікації.

8 Матеріали, які подають під час закінчення МД та її етапів

Результати виконання етапів МД подаються керівнику. Після закінчення роботи подаються такі матеріали:

- завдання;
- технічне завдання;
- пояснювальна записка;
- публікації у вигляді статей чи тез конференції;
- презентація роботи (не менше 15 слайдів).

9 Орієнтовний зміст магістерської дисертації

Зміст

Вступ

1 Механізми взаємодії полів з металевими екранами

1.1 Електромагнітне екранування

1.2 Механізми екранування

Висновки за розділом 1

2 Характеристики матеріалів екранів

2.1 Математична модель для аналізу характеристик матеріалів екранів

2.2 Розробка комп'ютерної моделі

Висновки за розділом 2

3 Характеристики комплексних тришарових екранів

Висновки за розділом 3

4 Розробка стартап проекту

5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

Перелік джерел посилань

Додаток А Технічне завдання

Додаток Б Публікації за темою дисертації

Додаток В Лістинг програм в середовищі MATLAB

10 Порядок приймання МД та її етапів

Періодичне обговорення проміжних результатів МД на консультаціях з науковим керівником;

Подання звітів за індивідуальним планом;

Представлення завершеної МД кафедри;

Попередній захист МД;

Публічний захист дисертації перед ЕК.

Виконавець
магістерської дисертації
студент гр. РІ-72мп
Науковий керівник
д.т.н., професор кафедри
радіоконструювання та вироб-
ництва радіоапаратури

Ніколенко Б. М.
Зінковський Ю. Ф.

ДОДАТОК Б

ЛІСТИНГИ ПРОГРАМ

1.1 Коефіцієнти екранування досліджуваних традиційних матеріалів (файл *B_graph.m*)

```
clc; close all; clear;
f=1e4:1000:1e10;
mu=[1 0.99 200];
sigma=[20 56.2 370];
N=[160 200 7];
mu=mu*4*pi*1e-7;
d=0.1e-3;
figure(1)
for i= 1:1:3
    k=sqrt(1i*2*pi*f*mu(i)*sigma(i));
    Sp=1./cosh(d.*k);
    Sv=1./(1+(1/2).*(N(i)+1/N(i)).*tanh(d.*k));
    S=Sp.*Sv;
    B=20*log10(abs(1./S));
    plot (f, B,'K')
    hold on
    grid on
    %title ('Коефіцієнти екранування')
    ylabel ('B, дБ')
    xlabel ('f, Гц')
    % axis ([min(f) max(f) -1.1*min(B) 1.1*max(B)])
    legend ({'Алюміній','Мідь','Сталь'}, 'location', 'NorthWest')
end
```

1.2 Основні параметри матеріалів екранів (файл *Bsumm.m*)

```

clc; close all; clear;

f=1e4:1000:1e10;

mu1=0.99; %мідь
mu2=200; %сталь
mu3=3000; %ферит НН-3000
mu4=7500; %ферит НМ-7500

sigma1=5.62;
sigma2=37.0;
sigma3=6;
sigma4=6;

N1=200; N2=7; N3=4; N4=3;

mu11=mu1*4*pi*1e-7; mu22=mu2*4*pi*1e-7;
mu33=mu3*4*pi*1e-7; mu44=mu4*4*pi*1e-7;

d=0.1e-3; %товщина
% коеф вихрових струмів
k1=sqrt(1i*2*pi*f*mu11*sigma1); %мідь
k2=sqrt(1i*2*pi*f*mu22*sigma2); %сталь
k3=sqrt(1i*2*pi*f*mu33*sigma3); %ферит НН-3000
k4=sqrt(1i*2*pi*f*mu44*sigma4); %ферит НМ-7500

% ефективність екр. мідь
Sv1=1./(1+(1/2).*(N1+1/N1).*tanh(d.*k1)); Sp1=1./cosh(d.*k1);
S1=Sp1.*Sv1;

% ефективність екр. сталь
Sv2=1./(1+(1/2).*(N2+1/N2).*tanh(d.*k2)); Sp2=1./cosh(d.*k2);
S2=Sp2.*Sv2;

% ефективність екр. НН-3000
Sv3=1./(1+(1/2).*(N3+1/N3).*tanh(d.*k3)); Sp3=1./cosh(d.*k3);
S3=Sp3.*Sv3;

% ефективність екр. НМ-7500

```

```

Sv4=1./(1+(1/2).*(N4+1/N4).*tanh(d.*k4)); Sp4=1./cosh(d.*k4);
S4=Sp4.*Sv4;
% коеф. екр. сумм.
B1=20*log10(abs(1./S1)); B2=20*log10(abs(1./S2));
Bsum=B1+B2+B1;
% еф. глибина проникнення
f1=1e2:100:1e5;
delta1=sqrt(2./(2*pi*f1*mu11*sigma1));
delta2=sqrt(2./(2*pi*f1*mu22*sigma2));
delta3=sqrt(2./(2*pi*f1*mu33*sigma3));
delta4=sqrt(2./(2*pi*f1*mu44*sigma4));
deltas=2*delta1+delta2;
% 3-шаровий екран
figure(1)
plot(f,Bsum,'r')
% title ('Коефіцієнт екранування тришарового екрану')
ylabel ('B, дБ')
xlabel ('f, Гц')
hold on
grid on
plot(f,B1,'g')
plot(f,B2,'b')
legend({'Тришаровий екран','Мідь','Сталь'},'location','SouthEast')
% характеристика поглинання
figure (2)
% Bp=20*log10(abs(1./(Sp1+Sp2)));
Bp=20*log10(abs(1./Sp1));
plot(f,Bp,'g')
title ('Поглинання')
hold on

```

```

grid on
Bp=20*log10(abs(1./Sp2));
plot(f,Bp,'b');
ylabel ('Bп, дБ')
xlabel ('f, Гц')
legend({'Мідь','Сталь'},'location','SouthEast')
% характеристика відбиття
figure (3)
% Bv=20*log10(abs(1./(Sv1+Sv2)));
Bv=20*log10(abs(1./Sv1));
plot(f,Bv,'g')
title ('Відбиття')
hold on
grid on
Bv=20*log10(abs(1./Sv2));
plot(f,Bv,'b');
ylabel ('Bв, дБ')
xlabel ('f, Гц')
legend({'Мідь','Сталь'},'location','SouthEast')
% характеристика коеф-ів вихр. струмів
figure (4)
k1=abs(sqrt(1i*2*pi*f*mu11*sigma1));
k2=abs(sqrt(1i*2*pi*f*mu22*sigma2));
plot (f,k1,'b')
hold on
grid on
plot (f,k2,'g')
title ('Вихрові струми')
ylabel ('k, 1/мм')
xlabel ('f, Гц')

```

```

legend({'Мідь','Сталь'},'location','SouthEast')
% хвильові опори
figure (5)
Z1=5.62e-7*sqrt((mu11/sigma1)*f);
Z2=3.7e-6*sqrt((mu22/sigma2)*f);
plot (f, Z1,'r')
title ('Хвильові опори')
hold on
grid on
plot(f,Z2,'y')
ylabel('Zм, Ом')
xlabel('f, Гц'),
legend({'Мідь','Сталь'},'location','SouthEast')
% глибина проникнення
figure (6)
plot(f1,delta1,'-g')
hold on
grid on
plot(f1,delta2,'b')
hold on
grid on
plot(f1,deltas,'r')
ylabel('delta, мм')
xlabel('f, Гц')
legend({'Мідь','Сталь','Тришаровий екран'},'location','SouthEast')
% ФЕРИТИ %
figure(7)
Bp=20*log10(abs(1./Sp3));
plot(f,Bp,'g')
hold on

```

```

grid on
Bp=20*log10(abs(1./Sp4));
plot(f,Bp,'b');
ylabel ('Bп, дБ')
xlabel ('f, Гц')
legend({'НН-3000','НМ-7500'},'location','SouthEast')
% характеристика відбиття
figure (8)
% Bv=20*log10(abs(1./(Sv1+Sv2)));
Bv=20*log10(abs(1./Sv3));
plot(f,Bv,'g')
hold on
grid on
Bv=20*log10(abs(1./Sv4));
plot(f,Bv,'b');
ylabel ('Bв, дБ')
xlabel ('f, Гц')
legend({'НН-3000','НМ-7500'},'location','SouthEast')
% характеристика коеф-ів вихр. струмів
figure (9)
plot (f,k3,'b')
hold on
grid on
plot (f,k4,'g')
ylabel ('k, 1/мм')
xlabel ('f, Гц')
legend({'НН-3000','НМ-7500'},'location','SouthEast')
% хвильові опори
figure (10)
Z3=6e-6*sqrt((mu33/sigma3)*f);

```

```

Z4=6e-6*sqrt((mu44/sigma4)*f);
plot (f, Z3,'r')
hold on
grid on
plot(f,Z4,'y')
ylabel('ZM, Ом')
xlabel('f, Гц'),
legend({'НН-3000','НМ-7500'},'location','SouthEast')
% глибина проникнення
figure (11)
plot(f1,delta3,'-g')
hold on
grid on
plot(f1,delta4,'b')
ylabel('delta, мм')
xlabel('f, Гц')
legend({'НН-3000','НМ-7500'},'location','SouthEast')

```

1.3 Коефіцієнт екранування тришарових екранів з щільним приляганням шарів металу та діелектриком між ними (файл *Bexp.m*)

```

clc; close all; clear;
f=1e4:1000:1e10;
mu1=0.99; %мідь
mu2=200; %сталь
sigma1=56.2; %мідь
sigma2=370; %сталь
Ncu=200;
Nst=7;
Zd=377;
Zcu=Zd/Ncu;

```

```

Zst=Zd/Nst;
d=0.1e-3; %товщина
mucu=mu1*4*pi*1e-7; must=mu2*4*pi*1e-7;
k1=sqrt(1i*2*pi*f*mucu*sigma1); %мідь
k2=sqrt(1i*2*pi*f*must*sigma2); %сталь
% екран з щільним приляганням шарів (4 відбиття)
Sv1=1./(1+(1/2).*((Zd/Zcu)+1/(Zd/Zcu)).*tanh(d.*k1));
Sv2=1./(1+(1/2).*((Zcu/Zst)+1/(Zcu/Zst)).*tanh(d.*k2));
Sv3=1./(1+(1/2).*((Zst/Zcu)+1/(Zst/Zcu)).*tanh(d.*k2));
Sv4=1./(1+(1/2).*((Zcu/Zd)+1/(Zcu/Zd)).*tanh(d.*k1));
Ssumm=Sv1.*Sv2.*Sv3.*Sv4;
B=20*log10(abs(1./Ssumm));
figure(1)
plot(f,B,'r')
ylabel ('B, дБ')
xlabel ('f, Гц')
% екран з нещільним приляганням шарів (6 відбиттів)
S1v1=1./(1+(1/2).*((Zd/Zcu)+1/(Zd/Zcu)).*tanh(d.*k1));
S1v2=1./(1+(1/2).*((Zcu/Zd)+1/(Zcu/Zd)).*tanh(d.*k1));
S1v3=1./(1+(1/2).*((Zd/Zst)+1/(Zd/Zst)).*tanh(d.*k2));
S1v4=1./(1+(1/2).*((Zst/Zd)+1/(Zst/Zd)).*tanh(d.*k2));
S1v5=1./(1+(1/2).*((Zd/Zcu)+1/(Zd/Zcu)).*tanh(d.*k1));
S1v6=1./(1+(1/2).*((Zcu/Zd)+1/(Zcu/Zd)).*tanh(d.*k1));
S1summ=S1v1.*S1v2.*S1v3.*S1v4.*S1v5.*S1v6;
B1=20*log10(abs(1./S1summ));
figure (2)
plot(f,B1,'b')
ylabel ('B, дБ')
xlabel ('f, Гц')
% comparison

```

```
figure(3)
plot(f,B,'m')
ylabel ('B, дБ')
xlabel ('f, Гц')
hold on
grid on
plot(f,B1,'b')
ylabel ('B, дБ')
xlabel ('f, Гц')
legend({'«Зі щільним приляганням шарів','«З діелектриком між шарами металів'},'location','SouthEast')
```

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЕКРАНИ ДЛЯ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ПОЛІВ

Ніколенко Б. М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Екранування — один з основних технічних засобів електромагнітного та інформаційного захисту електронної апаратури. Його сутність полягає у захисті чутливих пристроїв від дії електричних, магнітних та електромагнітних полів джерела за допомогою металевих екранів[1].

Розрізняють електростатичне, магнітостатичне та електромагнітне екранування. Проте, чіткий поділ полів за частотою та властивостями на практиці відсутній, оскільки є складним. Для досягнення потрібної ефективності екранування досліджуються фізичні процеси та ефекти. Основним способом екранування сьогодні є електромагнітне екранування, оскільки його ефективність збільшується з підвищенням частоти магнітного поля, що є особливо актуальним для пристроїв, що працюють в діапазоні надвисоких частот[2].

Електромагнітне екранування у хвильовому режимі на НВЧ реалізується доповненням механізму поглинання механізмом відбиття електромагнітної енергії від екрана. Поглинання в екрані обумовлене перетворенням електромагнітної енергії на теплову, в тому числі за рахунок втрат на вихрові струми, тому ефективність екранування поглинанням зростає з підвищенням частоти поля та магнітної проникності матеріалу, а також збільшенням електропровідності екрана. Відбиття енергії пов'язане з невідповідністю хвильових характеристик (в основному хвильового опору) металу екрана та діелектрика, який оточує екран (наприклад, повітря).

В цьому випадку ефективність екранування зростає з ростом цієї невідповідності. У хвильових режимах роботи екранів в діапазоні НВЧ ($10^8..10^{10}$ Гц) ефект екранування визначається фізичними явищами та процесами взаємодії відбитих, заломлених та падаючих хвиль на межах неоднорідних середовищ поширення полів та металевих матеріалів екранів. У таких режимах моделі показників екранування є найбільш прийнятними, тому що властивості їх подібностей зберігаються при використанні фундаментальних аналітичних методів моделювання (рівняння Максвелла, закони Снеліуса)[3].

У хвильовому режимі роботи довжина хвилі може співпадати з розмірами самого екрана. Тому в цьому діапазоні частот розрахунки екранів необхідно проводити, враховуючи струми зміщення за повними рівняннями електродинаміки[4].

Важливою відмінною рисою електромагнітного екранування в області ВЧ на відміну від НЧ є змінний характер залежності коефіцієнта екранування від частоти, що можна пояснити хвильовою природою НВЧ, і призводить до його резонансу при відповідних значеннях відношення поперечного розміру екрана до довжини хвилі.

Пропонується за допомогою математичної системи *MATLAB* математично змодельовати два тришарових екрана та порівняти характеристики коефіцієнтів екранування. Структура екранів «алюміній-сталь-алюміній» та «мідь-сталь-мідь». Сталь використовується в обох випадках, оскільки має добрі магнітні властивості. Алюміній і мідь — немагнітні матеріали[5]. Дані для розрахунків подані у таблиці 1:

Таблиця 1 — Деякі параметри матеріалів екранів

Матеріал	Магнітна проникність μ	Провідність σ , См/м	Відношення хвильових опорів N
Мідь	0,99	$5,62 \cdot 10^7$	200
Сталь	200	$3,7 \cdot 10^6$	7
Алюміній	1	$2,5 \cdot 10^7$	160

Результати розрахунку коефіцієнтів екранування для обох екранів в діапазоні 10 кГц..10 ГГц подані на рисунку 1:

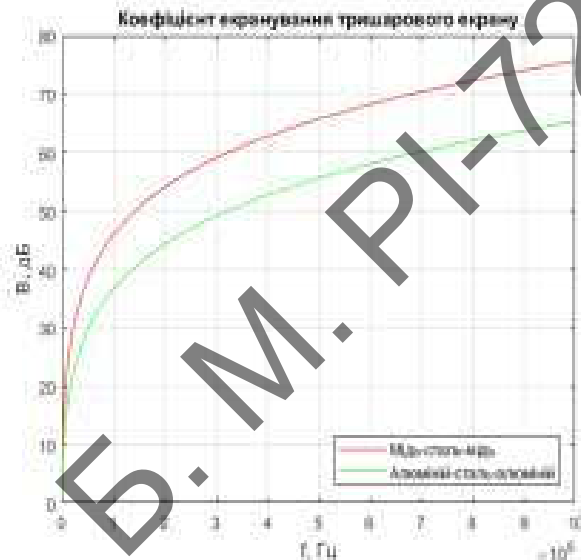


Рисунок 1 — Коефіцієнти екранування тришарових екранів

Список літературних джерел

1. ДСТУ 3396.0-96. Захист інформації. Технічний захист інформації. Основні положення. — К.: Держстандарт України, 1996. — 14 с.
2. Зінковський Ю.Ф., Клименко В.Г. Електромагнітна, інформаційна захищеність та сумісність електронних апаратів: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. — Ж.: ЖІТІ, 1999. — 376 с.
3. Зинковский Ю.Ф., Клименко В.Г. Расчет волновых сопротивлений излучателей помех при экранировании//Вестник РТФ КПИ. Радиотехника, 1994. — Вып. 30. — с. 58.
4. Вольман И.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика — М.: Связь, 1971. — 487 с.
5. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. — М.: Радио и связь, 1989. — 222 с.