

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання методів підвищення електромагнітної стійкості та сумісності
електронної техніки
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи АУТПм-21-1

Сахаров М.С.

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизоване
управління технологічними процесами

Керівник доц. Стародубцев М.Г.

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«21» грудня 2022 р.

Сахаров М.С.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____

Кафедра _____ КІТАМ _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» _____

(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Сахарову Максиму Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання методів підвищення електромагнітної стійкості та сумісності електронної техніки

затверджена наказом університету від _____ 07.11.2022р. № 1463 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 22.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Об'єкт дослідження – процеси та методи захисту РЕА від магнітного впливу

3.2 Математичні методи: методи математичного опису магнітного поля, методи вимірювання та аналізу магнітної напруженості

3.3 Вхідна інформація: сучасні методи підвищення магнітної стійкості та сумісності радіоелектронних засобів комп'ютерно-інтегрованих виробництв

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ

4.2 Аналіз вихідної інформації

4.3 Методи забезпечення і підвищення електромагнітної сумісності

4.4 Математична модель багатошарового магнітного екрана

4.5 Комп'ютерне моделювання та аналіз результатів

4.6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.7 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____
Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації Power Point (*ppt) – 19
ст. формату А4.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз вихідної інформації</i>	07.11.2022	<i>виконано</i>
2	<i>Методи забезпечення і підвищення електромагнітної сумісності</i>	15.11.2022	<i>виконано</i>
3	<i>Математична модель багатошарового магнітного екрана</i>	21.11.2022	<i>виконано</i>
4	<i>Комп'ютерне моделювання та аналіз результатів</i>	28.11.2022	<i>виконано</i>
5	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	05.12.2022	<i>виконано</i>
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	08.12.2022	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk</i>	10.12.2022	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на рецензію</i>	12.12.2022	<i>виконано</i>
9	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	15.12.2022	<i>виконано</i>
10	<i>Подання роботи до ЕК</i>	18.12.2022	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання _____ 07.11.2022 р.

Студент _____ Сахаров М.С.
 (підпис)

Керівник роботи _____ доц. Стародубцев М.Г.
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 13 табл., 23 рис., 1 дод., 14 джерел.

МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ, ЕКРАНУВАННЯ, БАГАТОШАРОВИЙ ЕКРАН, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКРАНУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – процеси та методи захисту радіоелектронних засобів від магнітного впливу.

Предмет дослідження – багатошарові магнітні екрани в конструкції радіоелектронних засобів.

Мета дослідження – теоретичне обґрунтування методу магнітного багатошарового екранування як пріоритетного методу вирішення завдання підвищення магнітної стійкості та сумісності радіоелектронних засобів.

Методи дослідження – методи математичного опису магнітного поля, методи вимірювання та аналізу магнітної напруженості.

У роботі проведено аналіз існуючих методів і способів підвищення електромагнітної стійкості та сумісності радіоелектронних засобів, основну увагу приділено багатошаровому магнітного екранування. Розроблено математичну модель розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового магнітного екрана, що враховує кількість шарів, властивості матеріалів та геометричні особливості конструкції екрана.

Проведене комп'ютерне моделювання різних варіантів виконання багатошарових магнітних екранів дозволило дослідити вплив різних параметрів на показник ефективності екранування.

Результати роботи будуть корисні для підприємств, що займаються проектуванням радіоелектронних засобів.

ABSTRACT

Explanatory note: 71 pages, 13 tables, 23 figures, 1 appendix, 14 sources.

MAGNETIC PERMEABILITY, SHIELDING, MULTILAYER SHIELD, SHIELDING EFFICIENCY.

The object of research is the processes and methods for protecting radio-electronic equipment from magnetic influence.

The subject of research is multilayer magnetic shields in the design of radio electronic equipment.

The purpose of the study is the theoretical substantiation of the method of magnetic multilayer shielding as a priority method for solving the problem of increasing the magnetic stability and compatibility of radio electronic equipment.

Research methods – methods of mathematical description of the magnetic field, methods of measurement and analysis of magnetic intensity.

The paper analyzes the existing methods and techniques for improving the electromagnetic stability and compatibility of radio-electronic means, the main attention is paid to multilayer magnetic shielding. A mathematical model has been developed for calculating the screening coefficient of a multilayer magnetic screen, taking into account the number of layers, material properties, and geometric features of the screen design.

The computer simulation of various variants of multilayer magnetic shields made it possible to study the influence of various parameters on the shielding efficiency index.

The results of the work will be useful for enterprises involved in the design of electronic equipment.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Аналіз вихідної інформації	12
1.1 Актуальність задачі	12
1.2 Види та допустимі норми електромагнітних завад	14
1.3 Основні проблеми забезпечення електромагнітної сумісності у РЕЗ та загальні методи їх вирішення	16
1.4 Роль ЕМС під час проектування РЕЗ	17
1.5 Спрощена модель взаємодії МЕМЗ з РЕЗ	20
1.6 Висновки до розділу.....	22
2 Методи забезпечення і підвищення електромагнітної сумісності.....	23
2.1 Методи підвищення стійкості електронних систем до впливу ЕМВ	23
2.2 Методи та способи оцінки стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ ...	27
2.3 Ефективність екранування	29
2.4 Різновиди екрануючих матеріалів	37
2.5 Методи забезпечення ЕМС	39
2.5.1 Екранування низькочастотних магнітних полів.....	39
2.5.2 Шунтуюча дія магнітного екрану.....	41
2.6 Багатошарове екранування	44
2.7 Висновки до розділу.....	48
3 Математична модель багатошарового магнітного екрану	49
3.1 Модель одношарового магнітного екрану	49
3.2 Модель багатошарового магнітного екрану	51
3.3 Вибір числа шарів багатошарового сферичного екрану	54

3.4 Висновки до розділу.....	55
4 Комп'ютерне моделювання та аналіз результатів	56
4.1 Реалізація моделі для комп'ютерного моделювання	56
4.2 Експериментальне обґрунтування реалізованої моделі	57
4.3 Комп'ютерне моделювання різних варіантів виконання багат шарових магнітних екранів	58
4.4 Дослідження градієнтної структури	60
4.5 Дослідження властивостей матеріалів для створення багат шарових екранів	61
4.6 Висновки до розділу.....	62
5 Охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях	63
5.1 Промислова безпека у приміщенні	63
5.2 Виробнича санітарія у приміщенні	64
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях	65
5.4 Висновки до розділу.....	67
Висновки	68
Перелік джерел посилання	70
Додаток А Демонстраційний матеріал	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БПЕ – багатошаровий плівковий екран;
ДП – друкована плата;
ЕМВ – електромагнітне випромінювання;
ЕМЗ – електромагнітна завада;
ЕМО – електромагнітна обстановка;
ЕМС – електромагнітна сумісність;
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
ЕРВ – електрорадіо вироби;
ККП – коректор коефіцієнта потужності;
МЕМЗ – мультиспектральні електромагнітні завади;
ПК – персональний комп'ютер;
РЕЗ – радіоелектронні засоби.

ВСТУП

Забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів (РЕЗ), тобто досягнення такого стану, коли електротехнічні, електронні та радіоелектронні апарати, системи та установки будуть придатні до виконання функцій за призначенням при впливі завад, створюваних електротехнічними виробами та викликаних природними явищами, стало необхідною умовою науково-технічного прогресу, а отже, і сталого розвитку економіки, суспільства та держави.

Сучасною тенденцією стало посилення вимог до електромагнітної сумісності (ЕМС) і поширення регулювання в цій галузі на технічні засоби всіх видів та призначень, схильних до впливу електромагнітних завад і є їх джерелами. Підвищення швидкодії обчислювальної техніки, мініатюризація елементної бази призвели до появи багатьох електричних пристроїв, рівні сигналів яких вимірюються в мікроамперах і мікрвольтах і нижче, а частоти сигналів можуть досягати гігагерц. За таких частот різко зросли випромінювання електромагнітних полів звичайних провідників у зовнішній простір і, як результат, наведення завад у сусідніх електричних елементах, порівнянних з корисними сигналами. Це негативно впливає на працездатність близько розташованих технічних засобів.

Необхідність цих змін була викликана тим, що у всі галузі економіки та різні сфери життя суспільства зростаючими темпами стали впроваджуватися мікроелектроніка, обладнання інформаційних технологій та засоби радіозв'язку, що мають підвищену сприйнятливність до електромагнітних завад. Особливе значення ЕМС має при розробці та виготовленні комп'ютерно-інтегрованих систем автоматички.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування методу магнітного багатосарового екранування як пріоритетного методу вирішення задачі підвищення магнітної стійкості та сумісності радіоелектронних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних задач:

- аналіз технічного завдання та літератури з питання, що розглядається;
- аналіз існуючих методів підвищення електромагнітної стійкості та сумісності РЕЗ;
- аналіз сучасних рішень з екранування;
- теоретичне обґрунтування методів підвищення EMC у РЕЗ;
- аналіз методів та способів оцінки стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ;
- розробка та програмна реалізація математичної моделі багатошарового магнітного екрану;
- експериментальне обґрунтування реалізованої моделі, проведення комп'ютерного моделювання різних варіантів виконання багатошарових магнітних екранів, дослідження властивостей матеріалів для створення багатошарових екранів;
- розгляд питань охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

Роботу виконано згідно з вимогами ДСТУ 3008:2015 [1] та рекомендаціями [2].

Результати дослідження опубліковано в збірнику Автоматизація та приладобудування ADED-2022, випуск 2 [3].

1 АНАЛІЗ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Актуальність задачі

Будь-які електричні та електронні вироби, включаючи апарати, системи, стаціонарні та рухомі установки, здатні створювати електромагнітні завади та (або) сприйнятливі до їх впливу, повинні бути виготовлені таким чином, щоб:

- електромагнітні завади, що створюються ними, не перевищували рівня, що забезпечує функціонування радіо- та телекомунікаційного обладнання та інших виробів відповідно до їх призначення;

- вироби мали достатній рівень власної стійкості до електромагнітних завад, що забезпечує їхнє функціонування відповідно до призначення.

Поняття електромагнітної сумісності виникло ще на початку розвитку радіотехніки і мало вузьке значення – вибір частотного діапазону роботи пристрою.

ЕМС можна визначити, як здатність обладнання чи системи задовільно працювати в даній електромагнітній обстановці без внесення до неї будь-якого неприпустимого електромагнітного збурення. Електромагнітна сумісність порушується, якщо рівень завад надто високий, завадостійкість обладнання недостатня.

Над проблемою ЕМС довгий час не замислювалися, доки не були зареєстровані збої в банківських системах під час завад. Сьогодні людина настільки залежить від електро- і радіотехніки, що проблема забезпечення ЕМС стала для нього життєво важливою [3].

Системи управління з використанням напівпровідникових елементів, і особливо засновані на застосуванні процесорів, стали виконувати багато функцій, які раніше покладалися на електромеханічні або аналогові пристрої, такі як елементи релейної логіки або пропорційні контролери. На відміну від пристроїв з жорсткими програмами, що застосовувалися раніше для

виконання конкретних завдань, електронні системи, що програмуються, засновані на використанні цифрових систем, з'єднаних із загальною шиною, в якій відповідно до програмного забезпечення обробляється безліч сигналів. Така структура не тільки сприйнятливіша до електромагнітних завад, тому що для зміни стану елемента необхідний низький рівень енергії, але і результат впливу завади неможливо передбачити, оскільки випадковий імпульс може або порушити, або не порушити функціонування системи залежно від його часового положення стосовно до стану зовнішнього тактового генератора, даних і стану виконуваної програми. Тривала завада може не впливати на роботу схеми до того часу, поки її рівень нижчий, ніж пороговий рівень логічних пристроїв, але коли завада збільшується подальше функціонування процесора буде повністю порушено. Зростання функціональної складності призводить до того, що стають можливими відмови системи загалом і несподівані аварійні режими роботи.

Умовно всі завади можна розділити на два класи:

- природного походження, не пов'язані з процесами життєдіяльності людини і існують, незалежно від них;
- штучного походження – виникають у процесі людської діяльності.

Завади штучного походження, у свою чергу, поділяються на ненавмисні та організовані.

Ненавмисні завади виникають у процесі використання людиною різноманітних пристроїв, генерація завад якими є природним наслідком їх функціонування.

Основними джерелами потужних електромагнітних завад є: грозові розряди, радіоелектронні засоби (потужні радіопередавальні засоби та радіолокаційні станції), високовольтні лінії передачі, контактна мережа залізниць, а також високовольтні установки для наукових досліджень та технологічних цілей.

Практичне вирішення проблем ЕМС спрощено зводиться до двох моментів: знання електромагнітної обстановки (ЕМО) та завадостійкості обладнання та у приведенні їх у відповідність один одному.

Застосування в технологічних процесах систем контролю, управління та сигналізації на базі сучасних електронних та мікропроцесорних пристроїв зумовлює жорсткі вимоги щодо забезпечення ЕМС на об'єктах. У зв'язку з цим розв'язувані у цій роботі задачі з розробки методів та засобів діагностики ЕМО та практичних заходів щодо забезпечення ЕМС в даний час, безсумнівно, актуальні.

1.2 Види та допустимі норми електромагнітних завад

Розглянемо види електромагнітних завад [4]. Відразу зазначимо, що випромінювана ЕМЗ – це завада, що поширюється у навколишньому просторі. Її опису та заходам придушення буде приділено менше уваги, оскільки, як буде показано далі, порівняно нескладні заходи конструктивного характеру дозволяють зменшити її рівень до допустимих норм.

Кондуктивна ЕМЗ – завада, що розповсюджується у провідному середовищі (по проводам, поверхням, що проводять, тобто завада, що передається контактним способом).

Високочастотні кондуктивні завади можуть бути за характером процесів віднесені або до безперервних коливань, або аперіодичним і коливальним перехідним процесам.

Залежно від походження та характеру поширення кондуктивні завади прийнято розділяти на такі види:

- симетричні (диференціальні – differential mode);
- несиметричні (синфазні чи загального виду – common mode).

За частотним діапазоном та енергетичним спектром завади поділяються:

– низькочастотна ЕМЗ – завада, переважна частина спектру якої лежить нижче певної частоти (у міжнародних нормативні документи за зазначену частоту приймають 9 кГц);

– високочастотна ЕМЗ – завада, переважна частина спектру якої лежить вище за певну частоту (за ГОСТ Р 51317.2.5-2000) це 9-150 кГц);

– радіозавада – завада, спектральна складова якої знаходиться у смузі радіочастот (по МЭК 50-160-90 – понад 150 кГц). Зазвичай у технічній літературі для зручності поєднують останні два види завад в один, званий ВЧ-завадами. Для джерел живлення, як правило, ВЧ-завади розглядаються у діапазоні до 30 МГц;

– вузькосмугова ЕМЗ – завада, що впливає на джерело живлення, у якої ширина спектра менше або дорівнює ширині смуги пропускання; для імпульсного джерела живлення за неї можна прийняти лінійний спектр частоти (частот) перетворення;

– широкосмугова ЕМЗ – завада, що впливає на джерело живлення, у якої ширина спектру ширша за смугу пропускання джерела.

По тривалості та регулярності завади поділяються:

– безперервна (тривала) ЕМЗ – завада, рівень якої не опускається нижче певного значення в регламентованому інтервалі часу (наприклад, гармоніки споживаного мережного струму джерела живлення);

– переривчаста ЕМЗ – завада, що триває протягом певних інтервалів часу, розділених інтервалами, вільними від завад (наприклад, під час роботи силових пристроїв з індуктивним навантаженням у повторно короткочасному режимі);

– короткочасна ЕМЗ – завада, тривалість якої, виміряна в регламентованих умовах, не перевищує певних значень (має багато спільного з переривчастою завадою; іноді проявляється як імпульсна завада);

– імпульсна ЕМЗ – завада, яка проявляється, наприклад, у такті робочої частоти джерела живлення, як послідовність окремих імпульсів чи перехідних процесів.

Електростатичний розряд – імпульсний перенесення електростатичного заряду між тілами з різними електростатичними потенціалами, наприклад, між корпусом (кожухом) джерела живлення та близько розташованими до нього високопотенційними поверхнями (виводами компонентів) усередині джерела.

Стандарти на випромінювання електромагнітних завад враховують два види випромінювань [4]:

- кондуктивні завади на вводах електроживлення;
- напруженість електричного поля завад при їхньому випромінюванні в ефір.

Існує два набори обмежень на рівні завад для певного виду обладнання:

- обладнання класу А (Class A), яке може використовуватися лише у промислових чи інших спеціально підготовлених зонах;

- обладнання класу В (Class B), яке може використовуватися лише у житлових приміщеннях, офісах, телекомунікаційному обладнанні.

Найбільш важливі міжнародні стандарти у цій галузі:

- EN55022 (CISPR22) – європейський стандарт для обладнання інформаційних технологій (ІТ);

- FCC (Розділ 15, підрозділ J) – американський стандарт для обладнання ІТ;

- VDE0871 – німецький стандарт обладнання ІТ.

1.3 Основні проблеми забезпечення електромагнітної сумісності у РЕЗ та загальні методи їх вирішення

Пристрої комп'ютеризації промислових ділянок піддаються впливу електромагнітних завад різного виду. Завади можуть надходити з електроживлення, наводитися зовнішніми високочастотними магнітними полями.

Тому, з одного боку, вони повинні мати необхідний рівень завадостійкості. З іншого боку, вони найчастіше є джерелами

електромагнітних завад у широкому діапазоні частот і тому повинні мати рівень завадоємкості, відповідний прийнятним нормам.

При цьому слід враховувати, що саме РЕЗ складається з функціональних вузлів та модулів різного призначення, що працюють у різних частотних діапазонах, з різними енергетичними рівнями, вимогами до чутливості, точності, найчастіше із зовнішнім інтерфейсом тощо. Таким чином, проблеми забезпечення ЕМС РЕЗ необхідно вирішувати у трьох основних напрямках:

- заходи щодо придушення (ослаблення) електромагнітних аномалій та завад з боку мережі електроживлення (входу);
- заходи щодо ослаблення власних (внутрішньооб'єктових) завад;
- заходи щодо придушення (ослаблення) кондуктивних завад на виході РЕЗ.

1.4 Роль ЕМС під час проектування РЕЗ

Проектування сучасних високошвидкісних плат передбачає моделювання та перевірку працездатності електронного модуля на деякій моделі. Основою такої моделі є:

- принципова схема електронного модуля;
- модель друкованої плати (ДП) з урахуванням усіх елементів конструкції (друковані провідники, виводи мікросхеми, провідники усередині корпусу мікросхеми тощо).

Ця комплексна модель є деяким віртуальним прототипом, який аналізується на етапі параметричної верифікації. У багатьох випадках отримати точну адекватну модель складно, але загальна методологія проектування є вирішальним чинником успішного проектування сучасних РЕЗ.

Потреба у створенні плат високої швидкодії та високої щільності монтажу призвела до зміни підходів та проектних рішень, складу САПР друкованих плат.

Створення віртуальних прототипів електронних модулів для вирішення задач верифікації полегшує налагодження пристрою, але роль фізичного прототипу залишається важливою при налагодженні пристрою (рис. 1.1).

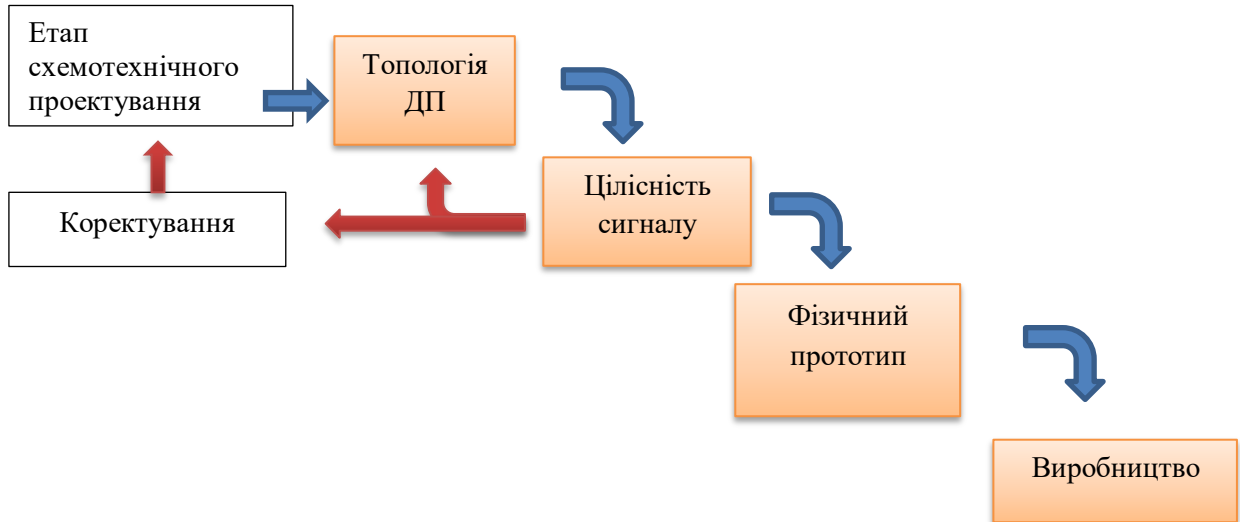


Рисунок 1.1 – Віртуальний прототип ДП у циклі створення РЕЗ

У майбутньому з розвитком знань у сфері опису електричних процесів у складних середовищах, збільшення потужності обчислювальних ресурсів стане можливим вирішення задачі параметричної верифікації та використання віртуального прототипу замість фізичного (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Віртуальний прототип у циклі створення виробу

Перспективним напрямом є вбудовування методів аналізу цілісності сигналу та електромагнітної сумісності у процес топологічного проектування. Це дозволяє вносити корективи у розміщення компонентів та трасування безпосередньо під час проектування плати.

Питання EMC обов'язкові для аналізу будь-якої електронної апаратури, оскільки параметри EMC обов'язкові для сертифікації готового виробу на відповідність стандартам EMC. Таким чином, верифікація проектних рішень при створенні ДП та електронних модулів може бути представлена у вигляді (рис. 1.3).

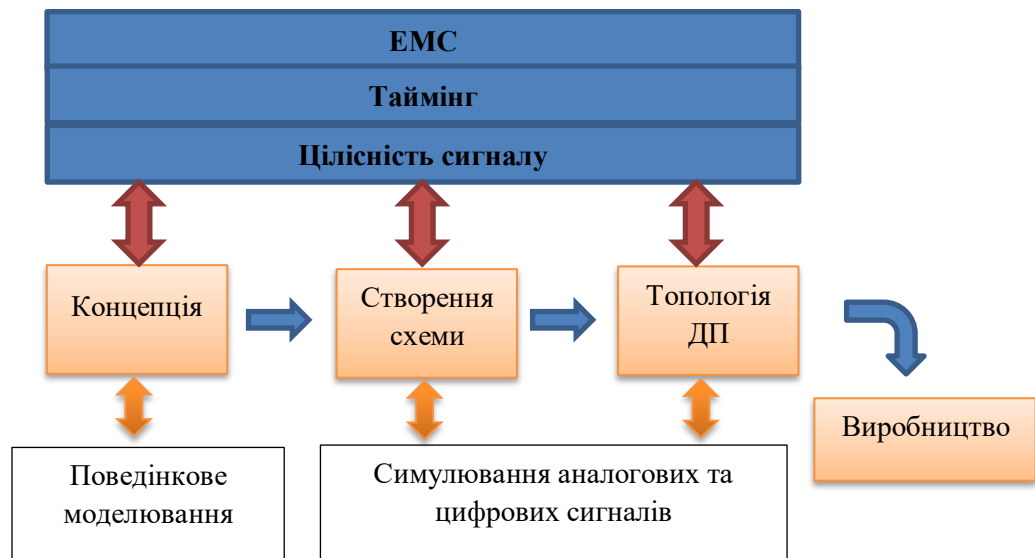


Рисунок 1.3 – Задачі параметричної верифікації під час проектування ДП та друкованих вузлів

Таким чином, актуальними задачами аналізу та верифікації, які на даний момент намагаються реалізувати з використанням комп'ютерних технологій, є:

- аналіз електромагнітної сумісності (рівень випромінювання від електронного модуля, кондуктивні завади по шинах живлення, сприйнятливність до випромінюваних завад від зовнішніх джерел);

- таймінг (визначення затримок поширення цифрового сигналу в лініях передач, визначення завад відбиття та узгодження ліній передач, урахування різниці синхронних сигналів на виходах мікросхем, аналіз впливу ємності та індуктивності друкованих провідників на системну затримку);
- аналіз цілісності сигналу (визначення раціональної структури багатошарових ДП, аналіз ліній передач у вигляді диференціальних пар, аналіз перехресних завад, вплив втрат у лініях передачі ДП тощо).

1.5 Спрощена модель взаємодії MEMЗ з РЕЗ

Для забезпечення вимог ЕМС та стійкості РЕЗ до впливу MEMЗ крім виявлення джерел електромагнітних випромінювань та характеристик несприятливої ЕМО, створюваної ними в місці розташування РЕЗ, не менш важливим є визначення шляхів та каналів зв'язку, за якими відбувається вплив MEMЗ на функціонування РЕЗ. Іншими словами, необхідно визначити паразитні електромагнітні зв'язки джерела MEMЗ та РЕЗ. При цьому з усього різноманіття таких електромагнітних зв'язків необхідно вибрати головні, які надають переважно несприятливий вплив на функціонування РЕЗ та забезпечують основні шляхи проникнення MEMЗ.

Забезпечення нормальної роботи РЕЗ вимагає наявності у них великої кількості функціональних зв'язків, призначення яких – забезпечити енергетичне живлення РЕЗ, прийом та передачу інформації та команд, об'єднання окремих РЕЗ у багатофункціональні системи. Ці функціональні зв'язки, зазвичай, і є основними шляхами проникнення MEMЗ під час взаємодії з РЕЗ.

На рис. 1.4 наведено узагальнену структурну схему такої взаємодії MEMЗ та РЕЗ, в якій можна виділити два види впливу – пряме та непряме.

Прямий вплив характеризується безпосереднім впливом електромагнітних полів джерел завад на РЕЗ або їх елементи, що призводить до порушення чи погіршення якості роботи цих засобів.

Результат непрямого впливу на РЕЗ супроводжується тими самими наслідками, як і прямий вплив. Але це вплив може здійснюватися тільки через складові елементи РЕЗ, коли вони, виступаючи рецепторами електромагнітної енергії, трансформують її і потім вже самі по собі є для елементів РЕЗ джерелами МЕМЗ, створюючи цим внутрішню несприятливу ЕМО.

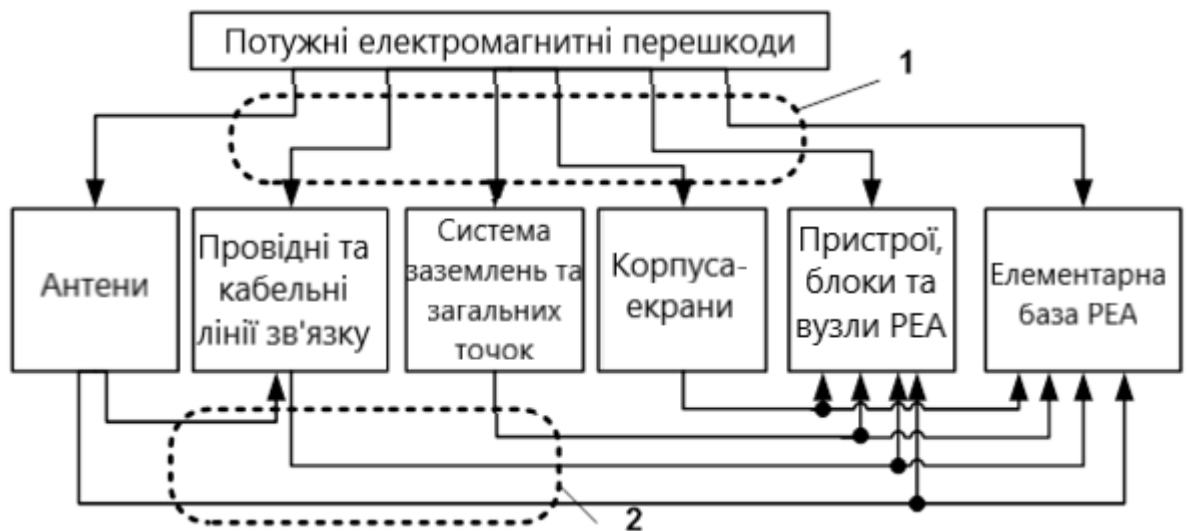


Рисунок 1.4 – Узагальнена схема впливу МЕМЗ на РЕЗ

Одним з найбільш очевидних шляхів проникнення МЕМЗ у системи РЕЗ є провідні, кабельні та міжблочні лінії зв'язку РЕЗ, всілякі провідники, дроти мережі, а також передавальні та приймальні антени. У провідниках, що проходять через області з несприятливою ЕМО, індуктуються напруги та струми (наводки), які згодом передаються схемою. Головне питання забезпечення стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ полягає в тому, щоб захистити провідники від несприятливого впливу або забезпечити відповідні розв'язки, завдяки яким наводки будуть відведені з провідника, перш ніж вони потраплять у чутливі до завад схеми. Слід зазначити, що антени РЕЗ з огляду на їх функціональне призначення – рецепторів і випромінювачів електромагнітної енергії, не можуть бути самі захищені від несприятливого впливу МЕМЗ і вимагають лише спеціальних схем захисту.

Чутлива до електромагнітного впливу елементна база РЕЗ може також піддаватися впливу МЕМЗ безпосередньо через корпуси – екрани цих засобів і особливо через різні електричні неоднорідності в них (наприклад, отвори, щілини, стики). Тому при здійсненні заходів щодо підвищення стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ необхідно розглядати питання екранування в тісному зв'язку з впливом на захисні властивості корпусів – екранів РЕЗ, електричних неоднорідностей та створення ними в екранованому просторі небезпечних, для чутливих до завад елементів РЕЗ, зон з підвищеним рівнем електромагнітних полів.

Як правило, вплив МЕМЗ на РЕЗ раніше перерахованими шляхами здійснюється комплексно, зрештою підсумовуючись або повторюючись на окремих елементах і призводячи до погіршення або порушення їх функціонування.

1.6 Висновки до розділу

У розділі проведено аналіз існуючих методів підвищення електромагнітної стійкості та сумісності РЕЗ, який показав, що найбільш раціональним методом підвищення стійкості електронної системи до впливу ЕМВ є підвищення стійкості до ЕМВ найслабших елементів системи. У тих випадках, коли вибором найбільш стійких до впливу ЕМВ елементів або схемним рішенням не вдається підвищити стійкість системи до бажаного рівня, слід вдатися до спеціальних засобів захисту від впливу ЕМВ.

2 МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

2.1 Методи підвищення стійкості електронних систем до впливу ЕМВ

Основними методами підвищення стійкості електронних схем до впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) є:

- вибір найбільш стійких до впливу ЕМВ комплектуючих елементів системи;
- раціональне просторове розміщення вузлів та схем системи;
- створення стійких до впливу ЕМВ електронних схем (схемні рішення);
- вжиття заходів спеціального захисту.

Не обов'язково та економічно не виправдано збільшувати стійкість системи за рахунок доведення параметрів, що визначають стійкість її елементів, до максимальних значень.

Найбільш раціональним методом підвищення стійкості електронної системи до впливу ЕМВ є підвищення стійкості до ЕМВ найбільш слабких елементів системи.

У тих випадках, коли вибором найбільш стійких до впливу ЕМВ елементів або схемним рішенням не вдається підвищити стійкість системи до бажаного рівня, слід вдаватися до спеціальних засобів захисту від впливу ЕМВ.

До таких засобів слід віднести застосування у схемах:

- фільтрів, трансформаторів, дроселів;
- розрядників, обмежувачів, роз'єднувачів;
- заземлень та екранів.

Фільтри широко використовували для захисту від радіозавад, створених стороннім електромагнітним випромінюванням передавачів. Складність при використанні фільтрів у системах захисту від ЕМВ – дуже широка смуга частот, що відповідає сигналам різної форми, наведеним ЕМВ. Необхідно

враховувати, що при застосуванні фільтра енергія знижується незначно і тільки на порядок зменшується амплітуда піку, тому їх слід застосовувати у поєднанні з іншими захисними приладами, наприклад, діодними обмежувачами або розрядниками. Інша складність полягає в тому, що більшість готових фільтрів мають типові робочі напруги 400 ... 600 В. Напруги ж наводки, створені ЕМВ, значно перевищують зазначені значення.

Біфілярні дроселі та ізолюючі трансформатори можуть бути використані для придушення наводки ЕМВ від зміни індукції магнітного поля у часі. У цьому випадку послідовно включена в колі наводки індуктивність пригнічує її сигнал, але в той же час пропускає постійні і високочастотні сигнали. Як біфілярний дросель, так і ізолюючий трансформатор можуть бути піддані дії дуже високих імпульсних напруг наводки. Пороги їх ушкоджень для перехідних процесів, зумовлених ЕМВ, можна порівняти зі значеннями перехідних впливів при випробуваннях, проведених з метою захисту від грозових розрядів.

Іскрові розрядники (або як їх називають «жорсткі обмежувачі») можуть бути використані для захисту електронних схем при перевантаженні за напругою та струмом. Проте ні іскрові розрядники, ні електромеханічні прилади (реле) не придатні для захисту чутливих напівпровідникових приладів, оскільки для них неприйнятні початкові викиди, що пропускаються цими захисними приладами. Це пояснюється тим, що напруга навантаження, що виникає від дії поля ЕМВ, може пошкодити систему протягом декількох наносекунд, що менше часу спрацьовування більшості захисних приладів.

Інший клас захисних приладів – варистори, опір яких залежить від напруги. Вони мають менший час спрацьовування, але менш стійкі до амплітуди наводки. З метою використання переваг фільтрів та різних типів розрядників і в той же час для уникнення недоліків часто створюють гібридні схеми захисту, тобто комбінацію з тих та інших.

Роз'єднувачі – плавкі запобіжники, реле, переривники або схеми швидкісного захисту відносяться до стійких пристроїв захисту. Вони

призначені для відключення менш стійких схем від джерел потужності на початку перехідного процесу, перш ніж відбудуться катастрофічні ушкодження.

Складно сформулювати загальні принципи та методи забезпечення електромагнітної сумісності через використання різних схемотехнічних та конструктивно-технологічних рішень. Так, наприклад, розглядаючи імпульсні джерела живлення можна виділити ряд заходів щодо ослаблення та придушення електромагнітних аномалій та завад (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Загальні методи забезпечення ЕМС імпульсних джерел живлення

Види електромагнітних впливів та проявів	Заходи щодо ослаблення та придушення електромагнітних аномалій та завад
1	2
1. Електромагнітні впливи з боку мережі електроживлення (входу)	
1.1. Провали напруги	
а) Повільні зниження напруги	а) застосування схеми ІВЕ із універсальним входом (типовий діапазон напруги для АС/DC перетворювача з універсальним входом: ~ 85(90)... ~ 265 В 47–63 Гц); б) застосування схеми ІВЕ з коректором коефіцієнта потужності (ККП/PFC)
б) Швидкі зниження напруги	Оптимальне значення величини ємності конденсатора мережного випрямляча або вихідного конденсатора ККП. Стандартний час утримання вихідної напруги при зникненні напруги – 20 мс (1 період напруги)
1.2. Кидки напруги (перенапруги)	Те ж саме Раціональний вибір параметрів імпульсного управління (ШІМ, ЧІМ), включаючи введення сигналу, що управляє, за зміною вхідної напруги
1.3. Вищі гармонічні складові вхідного струму	Застосування схем ІВЕ з ККП/PFC: а) пасивний ККП (НЧ+дросель) – для малопотужних АС/DC+перетворювачів; б) активний ККП – для АС/DC+перетворювачів підвищеної та великої потужності

Продовження табл. 2.1

1	2
1.4. Кондуктивні завади	
а) Імпульсні завади	Застосування варисторів на вході мережевого завадодавлюючого фільтра (ЗПФ)
б) Низькочастотні завади	Застосування коректора потужності (ККП)
в) Високочастотні завади та радіозавади	Застосування високоефективного мережевого ППФ та раціональний вибір його компонентів (особлива увага приданню несиметричних завад)
1.5. Завади випромінювання	а) екранований корпус (кожух); б) правильне заземлення; в) мінімізація площі контурів із підвищеним індуктивним опором.
2. Власні завади ІВЕ (внутрішньблокові завади)	
2.1. Кондуктивні завади	а) застосування в ККП та перетворювачі напруги (інвертор) високоякісних компонентів: – швидкодіючих транзисторів (MOSFET та IGBT); – швидкодіючих рекуперативних діодів: fast (ultrafast) FRED та діодів Шоттки з карбїду кремнію; – обмежувачів швидкості наростання напруги; – RC+ та RCVD+ кіл (демпферів, снабберів – snabbers); – VDRC+фіксаторів рівня напруги; – уніполярних TVS+діодів та потужних стабілітронів; б) оптимальне компонування вузлів та компонентів (мінімізація взаємного впливу)
2.2. Завади випромінювання	а) оптимізація площі та поперечного перерізу силових контурів з великими струмами; б) оптимізація конструкції та топології намотування високочастотних силових трансформаторів перетворювачів ІВЕ: – зменшення індуктивності розсіювання трансформатора; – мінімізація паразитної ємності між первинною та вторинною силовою обмоткою трансформатора (застосування спеціальних екранних обмоток); в) екранування силових індуктивних компонентів (трансформаторів, дроселів), особливо із зазором

Продовження табл. 2.1

1	2
3. Кондуктивні завади на виході	
3.1 Імпульсні завади	<p>а) використання квазірезонансного методу перетворення;</p> <p>б) використання у вихідному ВЧ+випрямлячі: – діодів Шоттки або надшвидкодіючих діодів (ultrafast FRED); – обмежувачів швидкості наростання напруги – RC+кіл; – (демпферів) для шунтування силових діодів;</p> <p>в) використання ВЧ+дроселів із малою паразитною ємністю;</p> <p>г) шунтування електролітичних конденсаторів – керамічними конденсаторами;</p> <p>д) використання на виході прохідних конденсаторів;</p> <p>е) оптимальне компонування вузлів та компонентів ІВЕ (мінімізація взаємного впливу);</p> <p>ж) раціональний електромонтаж (розведення друкованої плати): – оптимізація та рознесення контурів (силових та управління); – оптимальне розведення «земель»</p>
3.2. Низькочастотні завади	Вибір підвищеної частоти перетворення та оптимального закону та регулювання (ШІМ або ЧІМ)
3.3. Високочастотні завади та радіозавади	
а) Завади на частоті перетворення	<p>а) застосування вискоефективного ППФ (дволанкового);</p> <p>б) раціональний вибір компонентів ППФ: – ВЧ + дроселів з величиною індуктивності, що забезпечує його нерозривний струм; – спеціальних конденсаторів з низьким імпедансом на високих частотах (з малим ECR), у тому числі трьох+ та чотирививодних</p>
б) Завади на суміжних частотах	<p>Те саме</p> <p>При різних частотах перетворення активного ККП та перетворювача</p>

2.2 Методи та способи оцінки стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ

Реалізація вимог щодо забезпечення стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ вимагає: підготовки даних про ЕМЗ; уточнення впливу МЕМЗ за основними

шляхами їх проникнення; перерахунку цих даних у струми та напруги в критичних точках апаратури; розроблення критеріїв оцінки стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ; порівняння отриманих характеристик завод у колах РЕЗ із допустимими значеннями завод та проведення оцінки погіршення функціонування цих засобів відповідно до розроблених критеріїв. Іншими словами, проведення робіт із забезпечення вимог стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ пов'язане з підготовкою та аналізом великого обсягу даних як про характеристики МЕМЗ у місці розташування РЕЗ, так і про характеристики самих РЕЗ, їх схем та елементної бази.

У багатьох випадках через невизначеність відомостей про реальну ЕМЗ необхідно прийняти усереднені, найгірші або максимально очікувані характеристики завод і за наявними даними розрахувати її часові, частотні, енергетичні та ймовірнісні характеристики. Отримана при цьому інформація є вихідною для виконання всіх наступних розрахунків та моделювання роботи РЕЗ у заданій заводній ситуації.

При цьому поряд з вибором усереднених значень амплітудних характеристик МЕМЗ, які можуть впливати на РЕЗ, важливим є визначення та правильний вибір їх часових параметрів та форми сигналу, що впливає. Якщо джерело МЕМЗ відоме заздалегідь, то форма випромінюваної ним завади вибирається відповідно до її джерела.

Прогнозування стійкості РЕЗ передбачає перерахунок характеристик МЕМЗ у вільному просторі в практично важливі струми і напруги, що виникають в критичних точках РЕЗ (вхід приймальних трактів, вхід і вихід пристроїв обробки інформації, вихід пристроїв формування вихідних сигналів). У деяких випадках (наприклад, при впливі на РЕЗ слабких радіозавод у ВЧ діапазоні хвиль) можна обмежитися перерахуванням характеристик зовнішньої МЕМЗ тільки до входів приймальних трактів РЕЗ.

При оцінці характеристик завод у колах РЕЗ необхідно враховувати такі фактори: будь-яке коло, на яке впливає завада, має обмежену смугу пропускання; форма завади на виході даного кола визначається перехідними

характеристиками самого кола, якщо спектральна щільність завади, що впливає, постійна в межах смуги її пропускання.

Важливе місце у визначенні та уточненні розрахункових характеристик завод у колах РЕЗ повинні займати лабораторні експерименти з макетними та дослідними зразками електронної апаратури. При цьому в процесі попередньої експериментальної оцінки стійкості РЕЗ до впливу МЕМЗ можна обмежитися інжекцією струму або прикладанням напруги відповідної форми від генераторів сигналів до критичних точок апаратури (входи чутливих до завод схем), що не вимагає створення потужних електромагнітних полів у великих обсягах.

2.3 Ефективність екранування

Ефективність екранування визначається за формулою

$$S = 20 \lg \frac{E}{E_{\text{э}}}, \text{дБ}, \quad (2.1)$$

де E – електрична (або магнітна H) складова поля до установки екрана;

E_E – електрична (або магнітна H_E) складова поля після встановлення екрана.

Очевидно, що ефективність екранування та коефіцієнт екранування пов'язані співвідношенням

$$S = 20 \lg \frac{1}{K} = -20 \lg K, \text{дБ}.$$

Ефективність екранування є основним показником якості екрану, що характеризує його здатність знижувати рівень електромагнітної енергії – як тієї, що впливає на рецептор, так і вихідної від випромінюючого джерела. Вираз (2.1) визначає втрати, тому значення S завжди позитивно.

У загальному випадку електромагнітного екранування ступінь ослаблення, що забезпечується екраном, залежить від трьох механізмів (рис. 2.1).

Перший – це відбиття електромагнітної хвилі від бар'єру, що екранує. Другий – поглинання хвилі в міру її проходження через металевий бар'єр (екран). Третій – багаторазові відбиття електромагнітної хвилі всередині екрана від меж розділу середовищ «метал-повітря» і «повітря-метал».



Рисунок 2.1 – Подання проходження плоскої електромагнітної хвилі через екран

Загалом ефективність екранування визначається, як було сказано вище, трьома складовими:

$$S = R + A + B, \text{ дБ},$$

де R – складова, що визначає відбиття від межі розділу при вході хвилі в екран;

A – визначає ефективність екранування з допомогою поглинання електромагнітної хвилі в товщі екрана;

B – характеризує втрати з допомогою багаторазових відбиттів у товщі екрана.

Низка важливих питань проектування систем екранування базується на знаннях структури електромагнітного поля. Електродинамічний розгляд даної задачі дає її опис у всій повноті. Але для багатьох практичних випадків рішення досить складні або взагалі не можуть бути одержані. Певні обґрунтовані спрощення із цілком прийнятним результатом для інженерної практики суттєво полегшують вирішення поставленої задачі. Подібні спрощення вводяться під час створення систем екранування. Для їхнього обґрунтування необхідно розглянути елементи теорії поширення електромагнітних хвиль (рис. 2.2).

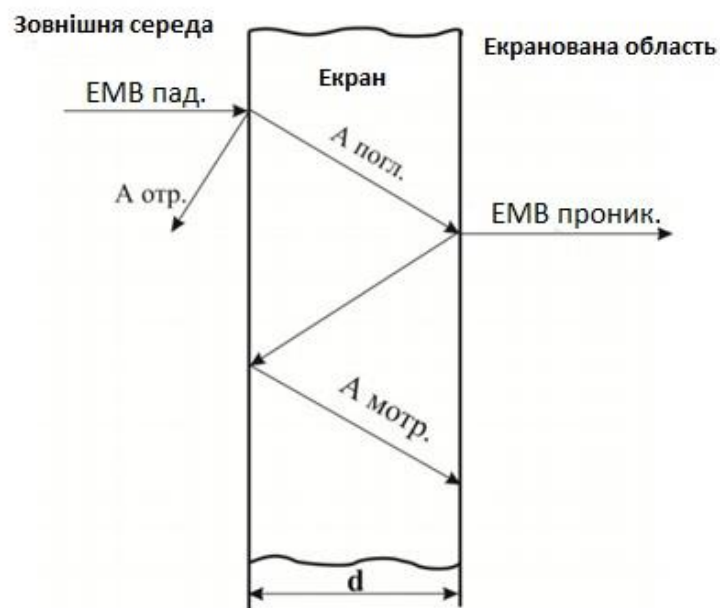


Рисунок 2.2 – Екранування електромагнітного поля металевим екраном

Глибина проникнення ЕМВ (δ) визначається як величина, зворотна коефіцієнту згасання і залежить від частоти: чим більша частота, тим менша глибина проникнення. У НВЧ діапазоні (3-30 ГГц) глибина проникнення в

металах має малу величину і тим меншу чим більше їх провідність і магнітна проникність.

Питома провідність (питома електропровідність) – величина обернена питомого опору речовини. Провідність характеризує здатність провідника проводити електричний струм. Одиниця вимірювання провідності є величиною, зворотною Ому ($1/\text{ом}$), і називається сименс (сим).

Магнітна провідність – фізична величина, що характеризує магнітні властивості речовини, вона визначає зв'язок між магнітною індукцією та магнітним полем речовини. За значенням магнітної проникності речовини поділяються на три групи: діамагнітні, парамагнітні та феромагнітні.

Наведемо значення питомого електричного опору (табл. 2.2) та відносної магнітної проникності (табл. 2.3) для певної групи речовин.

Таблиця 2.2 – Значення питомого електричного опору

Найменування матеріалу	Питомий електричний опір $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$	Найменування матеріалу	Питомий електричний опір $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$
Алюміній	0,028	Нікель	0,087
Вольфрам	0,055	Олово	0,12
Залізо	0,1	Платина	0,107
Золото	0,023	Свинець	0,21
Латунь	0,075	Срібло	0,016
Бронза	0,095	Сталь	0,1-0,14
Мідь	0,017	Цинк	0,061

Таблиця 2.3 – Значення відносної магнітної проникності

Парамагнітні	μ	Діамагнітні	μ	Феромагнітні	μ
Повітря	1,0000003	Вісмут	0,999825	Армко-залізо	7000
Олово	1,000001	Графіт	0,999895	Пермаллою	75000
Алюміній	1,000023	Сурма	0,999937	Ст.Е1ААБ	1540
Платина	1,000364	Срібло	0,999981	Нікель	1120
Марганець	1,0037	Мідь	0,999991	Кобальт	174
Паладій	1,00069	Ртуть	0,999975	Чавун	620
		Цинк	0,999981	Сплав NiFe	250000

Значення відносної магнітної проникності діамагнітних та парамагнітних матеріалів дуже мало відрізняється від одиниці, тому для практичних розрахунків їх магнітну проникність приймають рівною одиниці.

Глибина проникнення ЕМЗ визначимо за формулою

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}},$$

де μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу екрану;

f – частота електромагнітного поля;

σ – питома провідність матеріалу екрану.

Таким чином, електромагнітна хвиля при взаємодії з екраном відбивається від його поверхні, частково проникає в стінку екрану і зазнає поглинання в матеріалі екрану і, зрештою, частково проникає в область, що екранується. В результаті загальна ефективність екранування (величина втрат енергії електромагнітної хвилі) визначається сумою втрат за рахунок поглинання енергії в товщі матеріалу – $A_{\text{ногл.}}$, відбиття енергії від межі розділу зовнішнє середовище-метал і метал-екранована область – $A_{\text{відб.}}$ і багаторазових внутрішніх відбиттів у стінах екрана – $A_{\text{б відб.}}$.

Це можна уявити в наступному вигляді

$$A[\text{дБ}] = A_{\text{ногл.}} + A_{\text{відб.}} + A_{\text{б відб.}}$$

Величину втрат на поглинання енергії ЕМЗ екраном завтовшки d можна визначити за формулою

$$A_{\text{ногл.}} = 8,68d \sqrt{\frac{f \mu \sigma}{2}} = 8,68 \frac{d}{\delta}.$$

Таким чином, втрати на поглинання ростуть пропорційно товщині екрану, магнітної проникності, питомої провідності матеріалу екрана і частоті електромагнітного поля.

Втрати на відбиття на межі розділу двох середовищ пов'язані з різними значеннями повних характеристичних опорів цих середовищ (характеристичний опір середовища – відношення напруженості електричного поля до напруженості магнітного поля електромагнітної хвилі у цьому середовищі). При проходженні хвилі через екран вона зустрічає на своєму шляху дві межі розділу: повітря – метал і метал – повітря (це справедливо для одношарового екрану, для багатшарового екрану поєднання меж розділу та їх кількість у кожному даному випадку буде різна).

Хоча електричне і магнітне поля відбиваються від кожної межі по-різному, сумарний ефект після проходження обох меж однаковий для обох складових поля. При цьому найбільше відбиття при вході хвилі в екран (на першій межі розділу) зазнає електрична складова поля, а при виході з екрану (на другій межі розділу) магнітна складова поля.

Для металевих екранів втрати на відбиття визначаються виразом

$$A_{\text{відб.}} = 20 \lg \left(94,25 \sqrt{\frac{\sigma}{f\mu}} \right)$$

звідки випливає, що втрати на відбиття великі для екрану, виготовленого з матеріалу з високою провідністю та малою магнітною проникністю.

Втрати на багаторазові відбиття у стінках екрану пов'язані з хвильовими процесами в товщі екрану й переважно визначаються відбиттями від меж. Для електричних полів майже вся енергія хвилі, що подає, відбивається від першої межі (повітря-метал) і тільки невелика її частина проникає в екран. Тому багаторазовими відбиттями всередині екрану для електричних полів можна знехтувати. Для магнітних полів більша частина падаючої хвилі проходить в екран, в основному відбиваючись тільки на другій межі металевого шару, тим самим створюючи передумови до багаторазових відбиттів між стінками екрану.

Коригуючий коефіцієнт $A_{\delta \text{ відб.}}$ – багаторазового відбиття для магнітних полів в екрані з товщиною стінки – d при глибині проникнення – дорівнює

$$A_{\delta \text{ відб.}} = 20 \lg \left(1 - \exp \left(- \frac{2d}{\sigma} \right) \right).$$

Величина $A_{\delta \text{ відб.}}$ має негативне значення, тобто багаторазові відбиття в товщі екрану погіршують ефективність екранування.

Із зменшенням ефективності екранування можна не зважати на випадки, коли на даній частоті виконується умова $e > \delta$, але їм не можна нехтувати при застосуванні тонких екранів, коли їх товщина менша за глибину проникнення, тобто $e < \delta$.

Електромагнітні хвилі, що розповсюджуються, мають дві компоненти у вигляді вектора E напруженості електричного поля (В/м) і вектора H напруженості магнітного поля (А/м).

Дані вектори ортогональні і знаходяться в одній площині, нормаль якої визначає напрям поширення електромагнітної хвилі (рис. 2.3).

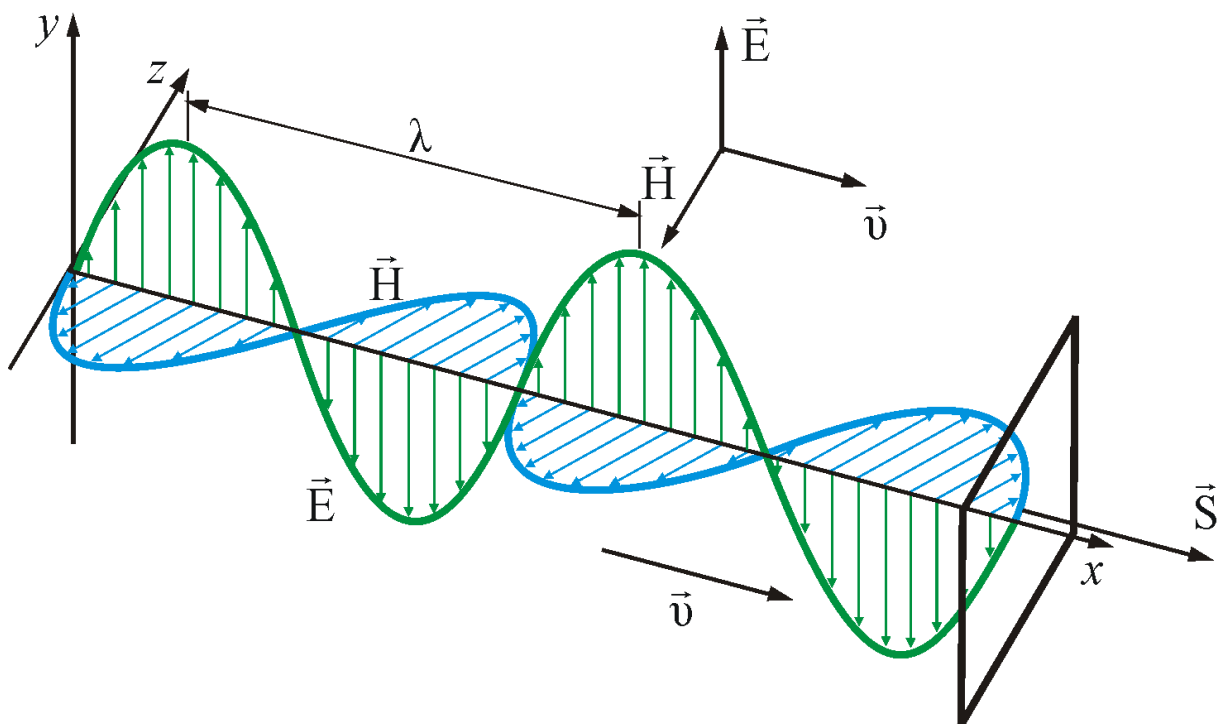


Рисунок 2.3 – Структура електромагнітної хвилі

Параметри електромагнітного поля характеризуються властивостями джерела випромінювання, середовищем навколо джерела і шляху поширення хвилі, а також відстанню між джерелом і точкою спостереження хвилі. Співвідношення між напругами E електричного поля та H магнітного поля визначає хвильовий опір Z середовища поширення:

$$Z = E / H, \text{ Ом.}$$

У безпосередній близькості джерела електромагнітне поле характеризується внутрішніми властивостями джерела. Джерела з високим хвильовим опором можуть бути представлені у вигляді електричного диполя (антена-штир). В околиці цього диполя формуються відносно інтенсивне електричне поле і слабке магнітне поле, чому відповідає досить високий (приблизно 3000 Ом) хвильовий опір середовища безпосередньо біля диполя.

Джерела завад, модель яких представлена у вигляді струмової петлі (магнітного диполя), створюють інтенсивне магнітне поле та слабке електричне у безпосередній близькості від джерела.

Високий і низький хвильовий опір середовища характерний лише в безпосередній близькості від джерела завад. У міру віддалення від джерела хвильовий опір Z середовища наближається до хвильового опору вільного простору 377 Ом, що відповідає режиму поширення плоскої електромагнітної хвилі. Прийнято вважати, що при відстані від джерела, що дорівнює $\lambda/2 \pi$, де λ - довжина хвилі синусоїдального коливання, плоска електромагнітна хвиля повністю сформована і хвильовий опір для неї становить 377 Ом. Наявність такої межі дозволяє розділити всю область поширення електромагнітних хвиль на дві зони:

- ближню, що охоплює область від джерела до межі, розташованої на відстані $\lambda/2 \pi$;
- дальню, що тягнеться від межі $\lambda/2 \pi$ до нескінченності.

Очевидно, що ніякого різкого переходу між зонами бути не може. Тому має місце деяка перехідна зона формування плоскої електромагнітної хвилі.

У ближній зоні переважно діє механізм індукції з досить чітким поділом на магнітну та електричну складові, що потребує окремого розгляду електричного та магнітного екранування. За наявності індукції джерело та рецептор пов'язані силовими лініями, і задача екранування полягає у перехопленні цих ліній та замиканні на заземлені елементи конструкції (для електричного поля) або у напрямках їх у бік від рецепторів (магнітне поле).

Інтенсивності основної компоненти у ближній зоні зменшується обернено пропорційно кубу відстані від джерела, а інші компоненти – обернено пропорційно квадрату відстані.

Перехідна зона – зона формування плоскої електромагнітної хвилі.

У дальній зоні поширюється пласка електромагнітна хвиля (Т-хвиля). Електромагнітне поле від джерела поширюється у просторі з постійним хвильовим опором. Тому в дальній зоні поле абсолютно однакове за своєю структурою (співвідношення між E і H) для будь-якого джерела.

Інтенсивності електричної та магнітної компонент поля в дальній зоні зменшується обернено пропорційно віддаленню від джерела.

На жаль, тип джерела відомий лише у окремих випадках (наприклад, трансформатор як джерело магнітного поля). Тому екранування у ближній зоні вимагає апріорних знань властивостей джерела. Очевидно, що для дальньої зони тип джерела не має значення, оскільки в будь-якому випадку поле, що впливає, буде плоскою електромагнітною хвилею.

2.4 Різновиди екрануючих матеріалів

Екрануючі матеріали дуже різноманітні і включають метали, сплави, пластичні маси з наповнювачами, шаруваті, ткани і композиційні матеріали. У всіх випадках базовою вимогою є висока провідність, а екранування магнітних полів – висока магнітна проникність. Розробка нових матеріалів зводиться до

пошуку технічних рішень, які дозволяють забезпечити їх високі електричні показники та хорошу технологічність. У ряді випадків істотну роль грає маса екрану, що так само привносить ряд специфічних вимог при виборі матеріалів, що екранують. Усе це ускладнює їхню класифікацію.

Таблиця 2.2 – Класифікація екрануючих матеріалів

Призначення	Матеріал	Приклади виробів
Виготовлення металевих корпусів та екрануючих пластин	Металеві листи зі сталі, мідних та алюмінієвих сплавів	Корпуси, перегородки, локальні екрани
	Металеві листи з отворами, металеві сітки	Повітряні панелі, оглядові вікна
Для надання електропровідних властивостей пластмасовим корпусам	Матеріали з обробленою електропровідною поверхнею	Металеві фольгові стрічки, шаруваті матеріали із металевою фольгою
Підвищення цілісності екранування	Мідь та мідні сплави, що володіють пружинними властивостями	Пружинні провідні ущільнюючі прокладки
	Провідні гуми Провідні органічні високомолекулярні сполуки	Прокладки широкої номенклатури, що проводять, як з еластомерів, так і в комбінації з металевими елементами
Виконання оптично прозорих апертур	Прозорий матеріал: скло або пластмаса	Екрануючі оглядові вікна для приладів та шаф та екрануючі вікна для приміщень та будівель

Конструкції електромагнітних екранів для друкованих плат представлені рис. 2.4.

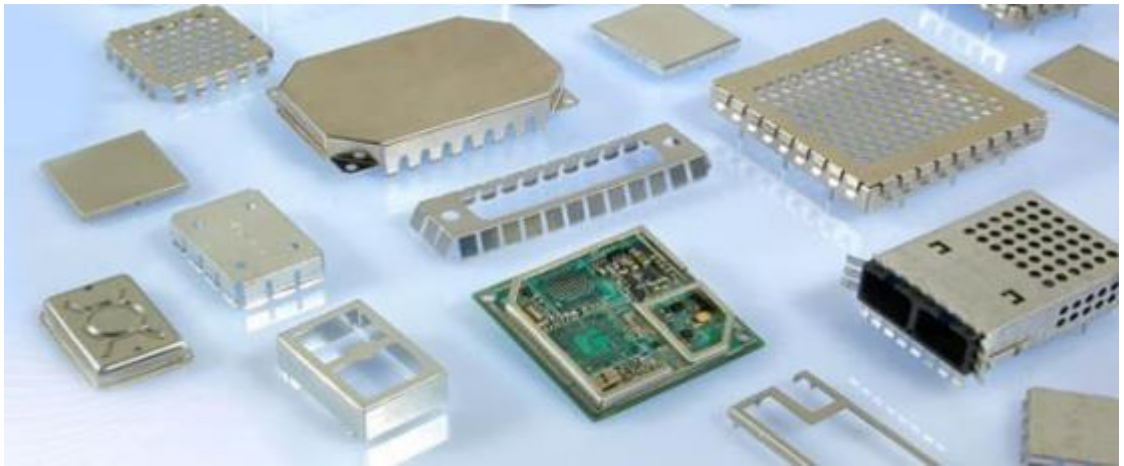


Рисунок 2.4 – Конструкції електромагнітних екранів для ДП [5]

2.5 Методи забезпечення ЕМС

2.5.1 Екранування низькочастотних магнітних полів

Один із найскладніших випадків екранування – магнітне. Це пояснюється рядом факторів (наближеністю математичних моделей ефекту магнітного екранування, різноманітністю матеріалів і їх параметрів, невизначеністю напрямку магнітного поля), які слід враховувати при конструюванні екранів. Крім того, значна маса і нетехнологічність магнітних екранів з прийнятною ефективністю екранування є додатковими обмеженнями.

Визначення місця розташування джерела магнітного поля, його інтенсивності та поляризації, що важливо для обґрунтованого проектування магнітного екрану, у практичних випадках становить значні труднощі. З достатньою очевидністю визначаються магнітні поля від різних низькочастотних джерел з великими струмами, зокрема від трансформаторів, дроселів, проводів та кабелів систем електроживлення. Велику практичну ціну мають задачі екранування постійного геомагнітного поля. У ближній зоні їхнє рішення ґрунтується на квазістатичному наближенні.

Ефективність магнітного екранування визначається магнітною проникністю та іншими магнітними параметрами металу, формою екрану,

числом його шарів. Застосовувані підходи для теоретичної оцінки ефективності магністатичного екранування можуть суттєво відрізнятися від реальних ситуацій, оскільки екрани містять отвори, щілини та місця стиків окремих фрагментів їх конструкцій. Крім цього, наявні обмеження масо-габаритних параметрів в більшості випадків не дозволяють реалізувати вимоги по товщині екрану, які випливають з теоретичних розрахунків. Тому доцільно в інженерній практиці проводити наближений теоретичний аналіз для визначення напрямів подальшого проектування та впливу параметрів екрану на його ефективність. Кінцеве значення ефективності екранування підтверджується експериментальними даними.

Аналіз у квазістатичному наближенні роботи магнітного екрану може ґрунтуватися на двох різних механізмах його роботи:

– шунтуюча дія матеріалу з високою магнітною проникністю. Такі матеріали «притягують» силові лінії магнітного поля та шунтують магнітний потік, розріджуючи область біля екрану від силових ліній. Цей механізм особливо ефективно проявляється на низьких частотах та при постійному полі. Тоді ступінь ослаблення магнітного поля визначається магнітною проникністю матеріалу екрану, його геометрією та товщиною стінки. У будь-якому випадку, чим вища магнітна проникність, тим ефективніший екран;

– компенсація зовнішнього магнітного поля вихрових струмів екрану. Наведені зовнішнім магнітним полем, що змінюється в часі, вихрові струми в стінці екрану створюють пов'язані з ними магнітні поля, напрямом яких протилежно напрямку збудливого поля. При цьому відбувається деяка компенсація зовнішнього поля, що визначає ефективність його ослаблення. Такий механізм типовий змінного магнітного поля. В даному випадку істотну роль відіграє провідність матеріалу, яка повинна бути мінімальною за можливо більшої магнітної проникності. Тут також важливими є геометрія екрану і товщина його стінок. Слід пам'ятати, що у частотах близько 100 кГц магнітна проникність більшості магнітних матеріалів різко знижується.

Моделі на основі дії шунту екрану доцільно застосовувати в ближній зоні при відносно низьких частотах, а моделі на основі компенсації – при частотах в десятки кілогерц.

Геометрія екрана є серйозним чинником для аналізу його ефективності. Реальні конструкції екрануючих корпусів довільної форми за наявності безлічі апертур практично не піддаються точному розрахунку. Для інженерних оцінок використовують спрощені геометричні форми та, насамперед, нескінченно довгий циліндр та сферу, які забезпечують найкращі показники екранування. Тому слід прагнути до такої конфігурації екранів, а за неможливості їх реалізації уникати зміни напрямів стінок екрана під прямим кутом і забезпечувати максимально можливий радіус сполучення.

2.5.2 Шунтуюча дія магнітного екрану

Якщо матеріал з магнітною проникністю μ розташувати в повітрі, то на межі розділу середовищ для вектора H напруженості магнітного поля та магнітної індукції B повинні виконуватися умови безперервності:

- тангенціальної компоненти магнітного поля H ;
- нормальної компоненти магнітної індукції B .

Оскільки в повітрі $B = \mu_0 H$, а в деякому матеріалі $B = \mu H$, магнітне поле та магнітна індукція повинні змінювати напрямок на межі поділу середовищ. Зміна напрямку магнітного потоку на межі двох середовищ з різними магнітними проникностями визначається виразом:

$$\operatorname{tga}_1 / \operatorname{tga}_2 = \mu_{r1} / \mu_{r2},$$

де a_1 та a_2 – кути заломлення.

Якщо магнітна проникність одного середовища нескінченно велика, то кут a_1 прагне до 90 градусів і потік виходить із середовища з μ_{r1} (з нескінченно великою магнітною проникністю) під прямим кутом. Хоча середовищ із нескінченно великою проникністю немає, проте практично вважають, що

магнітні силові лінії нормальні (перпендикулярні) до поверхні феромагнітних тіл.

Загалом ефективність магнітостатичних екранів невелика. Вона залежить від μ екрану (що більше, тим краще) і товщини його стінки (що більше до певної межі, тим краще). Наприклад, екран із матеріалу «Армко» (спеціальний сплав з $\mu = 3000$) при радіусі 40 см і товщині 1 см забезпечує ефективність екранування приблизно 37,5 дБ. Такий екран складний і значною мірою ефективність магнітного екранування визначається наявністю апертур та інших факторів.

Для циліндричного та сферичного уявлення геометрії екрану можливі дві ситуації розташування джерела, рецептора та екрана між ними. У першому випадку ефективність екранування розраховується для області всередині екрана при дії однорідного магнітного поля від віддаленого джерела поза екраном. У другому випадку розглядається деяке джерело поля у вигляді диполя, розташоване в центрі екранованої області, та ефективність екранування оцінюється по відношенню до зовнішньої області (рис. 2.5).

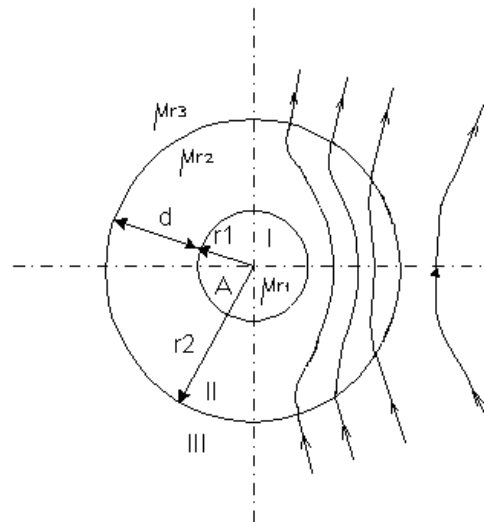


Рисунок 2.5 – Шунтування зовнішнього магнітного поля

Поняття «диполь» має різну представлення для циліндричного та сферичного екранів. У протяжному циліндрі дипольне джерело має вигляд двох протяжних провідників, коаксіальних з циліндром, які несуть струми

протилежних напрямків. Для сферичного екрану дипольне джерело утворює кругову петлю струму, центр якого розташований в центрі середовища.

Таким чином, при аналізі магнітного екранування на основі моделі шунтування можна виділити чотири варіанти:

- циліндричний екран у однорідному полі;
- сферичний екран у однорідному полі;
- циліндричний екран із лінійним диполем;
- сферичний екран із струмовою петлею.

Для 1 і 2 варіантів магнітне поле всередині екранованої області буде однорідним для всієї області при однорідному впливаючому полі. Для варіантів 3 та 4 інтенсивність поля в зоні 2 зменшується за деяким законом залежно від відстані до екрану.

Крім того, конфігурації з однорідним полем і диполями задовольняють умові взаємності: екран забезпечує таку ж ефективність екранування від однорідного зовнішнього поля, як і при внутрішньому дипольному джерелі.

Робота екранів із провідних матеріалів може здійснюватися у трьох різних режимах:

- режим шунтування (при малій провідності та при постійному або низькочастотному полі);
- перехідний режим, при якому провідність починає грати певну роль, але товщина скін-шару на відповідних частотах виявляється більшою за товщину стінки екрану; за ефективністю наближається до режиму шунтування;
- комбінований режим, коли параметри провідності та проникності такі, що товщина скін-шару на робочих частотах стає істотно меншою за товщину стінки екрану; при цьому ефективність екранування різко підвищується.

У практичних випадках розгляд механізмів магнітного екранування може використовуватися для вибору матеріалів та форми екрану, хоча ідеалізовані циліндричні та сферичні форми не в змозі охопити всю різноманітність реальних конструкцій. Як правило, матеріали з високою

магнітною проникністю мають невисоку провідність, а матеріали з високою провідністю – не магнітні. Крім цього, реалізація комбінованого режиму може вимагати застосування спеціальних багат шарових матеріалів, що мають високу провідність і проникність, які забезпечать більшу ефективність екранування, ніж одношарові.

При виборі магнітних матеріалів слід на увазі, що їх провідність постійна в дуже широкому діапазоні частот і не залежить від щільності магнітного потоку, а магнітна проникність є її лінійною функцією всередині матеріалу і частоти. При високій щільності магнітного потоку більшість феромагнітних матеріалів переходять у режим насичення, та їх магнітна проникність стає відносно малою.

2.6 Багат шарове екранування

Однак у реальних умовах при екрануванні неминучі більш менш значні отвори і щілини, які утворюють додатковий канал для проникнення поля. Внаслідок цього ефективність екрана зменшується [6].

Компанія ЗАТ ТЕСТПРИЛАД розробила технологію формування екранів, що забезпечують захист блоків та компонентів радіоелектронної апаратури від впливу електромагнітного імпульсу. Дана технологія дозволяє формувати захисні екрани на корпусах будь-якої форми без дефектів екранування (однорідність товщини покриття, відсутність щілин та отворів).

Багат шарові плівкові екрани для захисту РЕЗ від ЕМВ розроблені на основі перехідних металів (Fe, Ni, Co) та їх сплавів. З яких формуються багат шарові електромагнітні структури.

У багат шарових структурах, які складаються з металів з різними характеристиками (хвильовими опорами $z_0 = \sqrt{\frac{\mu\omega}{\sigma}}$), ефективність екранування вище, ніж у однорідних металах еквівалентної товщини. Екрануючий ефект зумовлений процесами поглинання енергії в об'ємі та

відбитті енергії на межах поділу середовищ. У багатошарових структурах роль ефекту відбиття зростає зі збільшенням кількості шарів та відмінності характеристик опору середовищ.

Ефективність екранування двошарового екрану E_{12}

$$\mathcal{E}_{12} = \mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2 \cdot (1 - \Gamma_1 \Gamma_2),$$

де E_1, E_2 – ефективність екранування 1-го та 2-го шарів;

Γ_1, Γ_2 – коефіцієнти відбиття 1-го та 2-го шарів.

Коефіцієнт відбиття

$$\Gamma = \frac{(z_{01} - z_{02})}{(z_{01} + z_{02})}.$$

Для тришарової структури

$$\mathcal{E}_{123} = \mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2 \cdot \mathcal{E}_3 \cdot \left[(1 - \Gamma_1 \Gamma_2)(1 - \Gamma_2 \Gamma_3) - \frac{\Gamma_1 \Gamma_3}{\mathcal{E}_2^2} \right].$$

Типи багатошарових структур:

– симетричні структури – являють собою чергування шарів з різними електромагнітними характеристиками (рис. 2.6);

– градієнтні структури – шари розташовуються зі збільшенням електричних і магнітних втрат у міру віддалення від межі розділ екран-вільний простір. Параметри шару, зверненого до джерела електромагнітного випромінювання повинні забезпечити необхідні відбивні або поглинаючі характеристики, а загальна ефективність екранування визначається внутрішніми шарами (рис. 2.7).

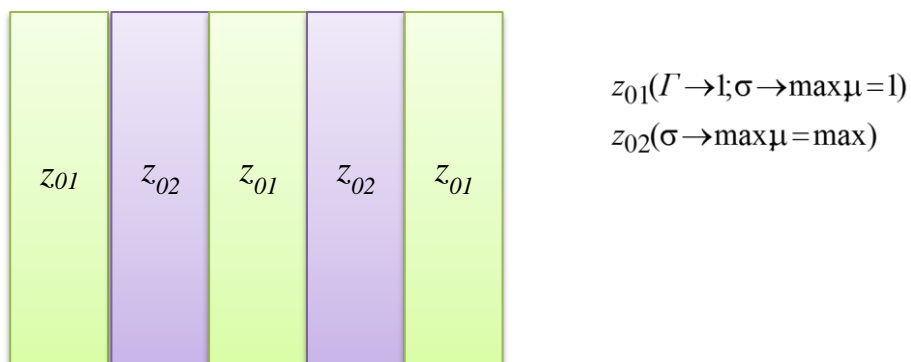


Рисунок 2.6 – Багатошаровий плівковий екран із симетричною структурою

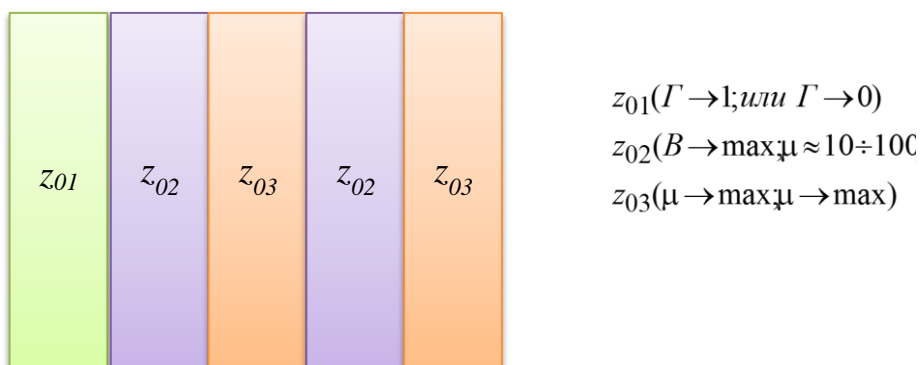
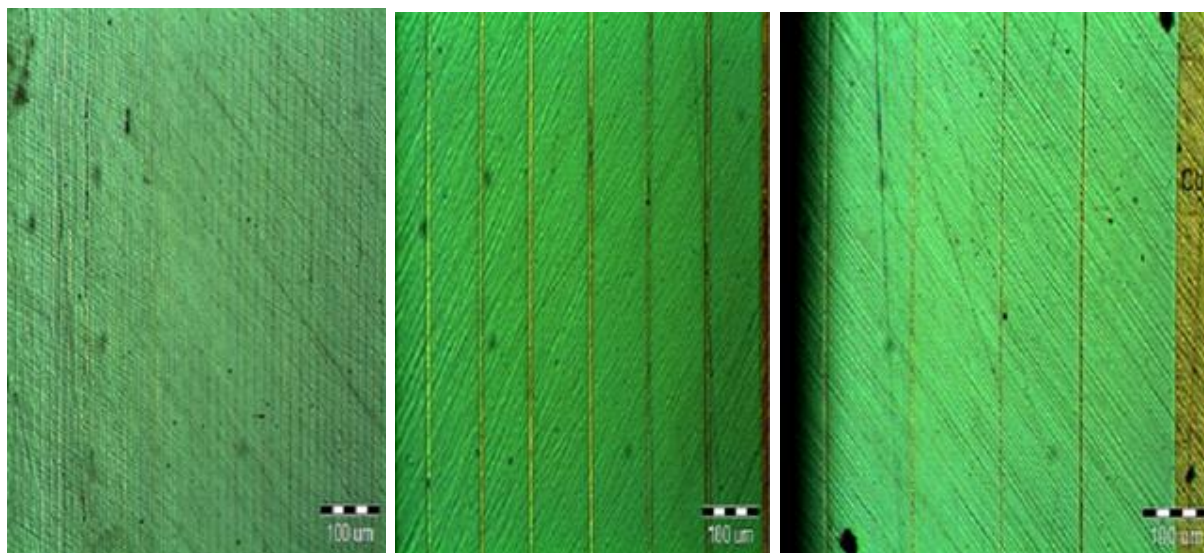


Рисунок 2.7 – Багатошаровий плівковий екран із градієнтною структурою

Оптичні зображення шліфів зразків МПЕ (рис. 2.8): зразок №1 (рис. 2.8, а) – 50 шарів *NiFe* + 50 шарів *Cu*, зразок №2 (рис. 2.8, б) – 8 шарів *NiFe* + 8 шарів *Cu*, зразок №3 (рис. 2.8, в) – 5 шарів *NiFe* + 5 шарів *Cu*.



а)

б)

в)

Рисунок 2.8 – Оптичні зображення шліфів зразків МПЕ

Результати вимірної ефективності екранування постійного магнітного поля багатошаровим екраном системи $NiFe / Cu$ залежно від кількості та товщини окремих шарів та частоти ЕМЗ представлені на рис. 2.9 та 2.10.

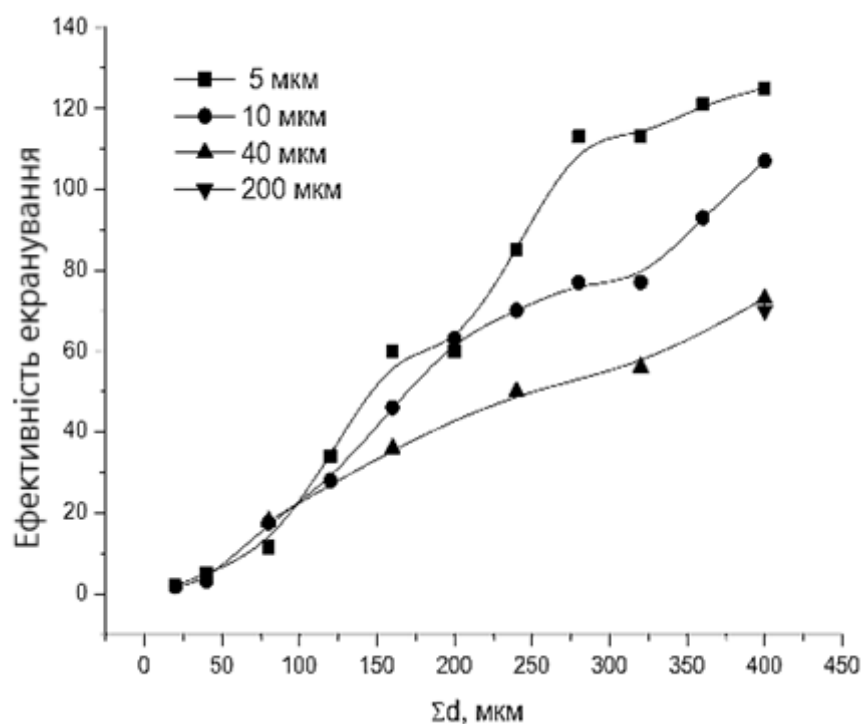


Рисунок 2.9 – Вимірня ефективність екранування МПЕ з різною товщиною та кількістю шарів для частоти ЕМЗ 50 Гц [6]

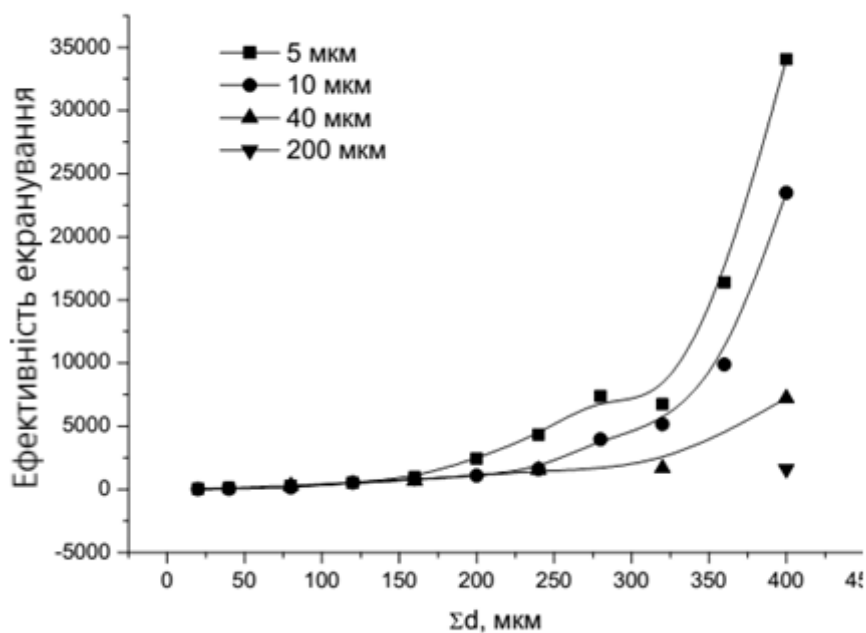


Рисунок 2.10 – Вимірня ефективність екранування МПЕ з різною товщиною та кількістю шарів для частоти ЕМЗ 5000 Гц [6]

Як бачимо, зі збільшенням частоти ЕМЗ ефективність екранування зростає для всього діапазону товщин магнітного шару багат шарових екранів. При цьому необхідно відзначити, що зі збільшенням шарів багат шарової структури магнітного екрану також спостерігається зростання ефективності екранування, проте товщина даного типу екрана значно нижче існуючих одношарових рішень.

2.7 Висновки до розділу

У розділі проведено теоретичне обґрунтування методу магнітного багат шарового екранування як пріоритетного методу вирішення задачі підвищення магнітної стійкості та сумісності радіоелектронних засобів.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАГАТОШАРОВОГО МАГНІТНОГО ЕКРАНУ

3.1 Модель одношарового магнітного екрану

Якщо екран розглядати як феромагнітний циліндр з постійною проникністю стінки (матеріалу) μ , радіусом внутрішньої поверхні r_e і радіусом зовнішньої поверхні r_i , що знаходиться в однорідному постійному магнітному полі напруженістю H_0 , спрямованому перпендикулярно до поздовжньої осі циліндра, то цю задачу можна звести до двовимірної з поточними полярними координатами r та φ (рис. 3.1).

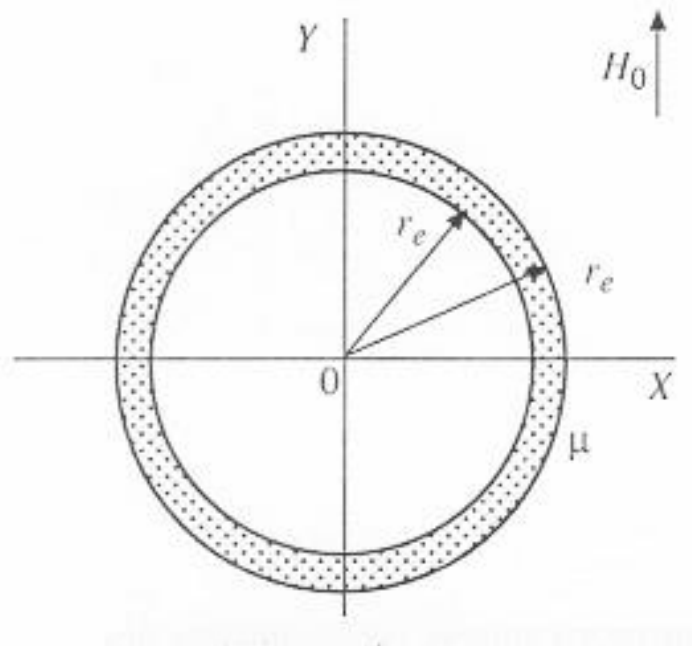


Рисунок 3.1 – Ескіз перерізу одношарового магнітного циліндричного екрану

Скалярний магнітний потенціал однорідного зовнішнього поля запишеться у виді (за умови відсутності екрана)

$$U_0 = -H_0 \cdot x = -H_0 \cdot r \cdot \cos \varphi.$$

За наявності екрана таку ж величину повинен мати потенціал результуючого поля. Отже, в вираз потенціалу для результуючого поля повинен входити член, спадаючий при збільшенні поточної координати r .

Відношення напруженості зовнішнього поля до напруженості поля в порожнині, захищеній екраном, називається коефіцієнтом екранування

$$K = \frac{H_0}{H_i} = 1 + 0,25(\sqrt{\mu} - \sqrt{1/\mu})^2 \left(1 - \frac{r_i^2}{r_e^2}\right).$$

Оскільки в більшості випадків $\mu \geq 1$, то можна спростити вираз

$$K = 1 + 0,25\mu \left(1 - \frac{r_i^2}{r_e^2}\right). \quad (3.1)$$

Якщо товщина стінки екрану t мала порівняно з середнім радіусом кривизни екрану r то вираз (3.1) можна записати

$$K = 1 + 0,25\mu \left(1 - \frac{t}{r}\right). \quad (3.2)$$

Вочевидь, що ці формули до розрахунку максимальної величини коефіцієнта екранування, т.к. розглядається ідеалізована модель екрану та введені припущення на сталість магнітного поля.

Якщо розглядати сферичний екран, то розгляд проводимо у сферичній системі координат та коефіцієнт екранування в цьому випадку запишеться

$$K = \frac{H_0}{H_i} = 1 + \frac{2}{9}(\sqrt{\mu} - \sqrt{1/\mu})^2 \left(1 - \frac{r_i^3}{r_e^3}\right), \quad (3.3)$$

або при $\mu \geq 1$, вираз (3.3) можна спростити

$$K = 1 + \frac{2}{9} \mu \left(1 - \frac{r_i^3}{r_e^3} \right). \quad (3.4)$$

Якщо товщина стінки екрану t мала порівняно з середнім радіусом кривизни екрану R , то вираз можна записати

$$K = 1 + 2t \cdot \frac{\mu}{3R}. \quad (3.5)$$

3.2 Модель багат шарового магнітного екрану

Розглянемо моделі багат шарових сферичних екранів. Якщо об'єкт розташувати в екрані, що складається з декількох феромагнітних шарів, розділених немагнітними проміжками, екранування об'єкта покращується.

Задача обчислення коефіцієнта екранування багат шарової структури ускладнюється зі збільшенням кількості шарів, внаслідок додавання нових граничних умов.

Схематично багат шаровий екран можна подати у вигляді рис. 3.2, де μ_0 – магнітна проникність немагнітного матеріалу (приблизно дорівнює 1), μ_M – магнітна проникність M -го шару, t_M – товщина M -го шару.

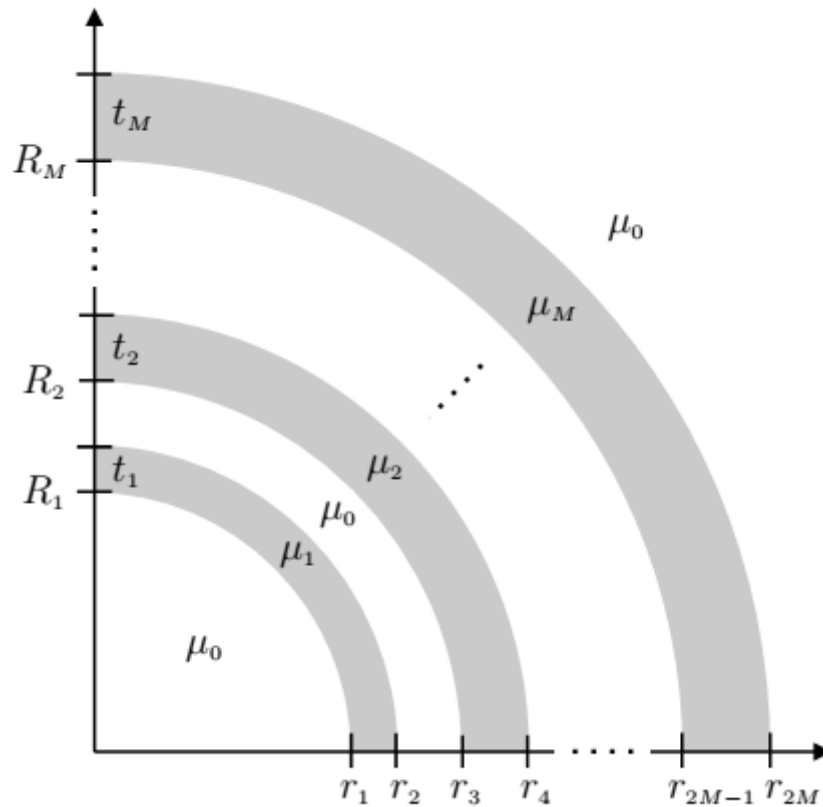


Рисунок 3.2 – Схематичний ескіз перерізу багатошарового електромагнітного екрану

Як матеріал немагнітного шару краще використовувати мідь (Cu) або благородні метали золото, срібло (Ag, Au).

Для подальшого теоретичного обґрунтування введемо додатковий коефіцієнт

$$\nu_{ij} = 1 - \left(\frac{R_i}{R_j} \right)^3,$$

де R_i і R_j – чергові радіуси оболонок екрану починаючи з внутрішнього – нульового.

Для одношарового сферичного екрану вираз розрахунку коефіцієнта екранування запишеться як

$$K_1 = 1 + \frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2 v_{01}.$$

Вираз для двошарового екрану

$$K_2 = 1 + \frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2(v_{01} + v_{23} - v_{01}v_{23} + v_{01}v_{12}v_{23}) + \left[\frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2 \right]^2 v_{01}v_{12}v_{23},$$

для тришарового

$$\begin{aligned} K_3 = & 1 + \frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2(v_{01} + v_{23} + v_{45} - v_{01}v_{23} - v_{23}v_{45} - v_{45}v_{01} + \\ & + v_{01}v_{12}v_{23} + v_{23}v_{34}v_{45} + v_{01}v_{14}v_{45}) + \left[\frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2 \right]^2 \times \\ & \times (v_{01}v_{12}v_{23} + v_{23}v_{34}v_{45} + v_{01}v_{14}v_{45} - v_{01}v_{23}v_{45} + v_{01}v_{12}v_{23}v_{34}v_{45}) + \\ & + \left[\frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2 \right]^3 v_{01}v_{12}v_{23}v_{34}v_{45}. \end{aligned}$$

У загальному вигляді для розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового екрану з n -шарами можна записати вираз

$$K_{\text{обш}} = 1 + \sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n K_i \cdot K_j \cdot \left(1 - \left(\frac{R_i}{R_j} \right)^2 \right) + K_n \prod_{i=1}^{n-1} K_i \cdot \left(1 - \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^2 \right), \quad (3.7)$$

де K_i – коефіцієнт екранування i -го екрана (2);

R_i і R_j – відповідно радіус i -го та j -го шарів;

n – кількість шарів екрана.

$$K_i = \frac{\mu_i \cdot t_i}{R_i}. \quad (3.8)$$

Недоліком даної моделі є те, що вона не враховує частотну залежність коефіцієнта екранування, що пов'язано з складністю математичної викладки виразу з додаванням нових обмежень. Ця залежність встановлена експериментально [6] і результати представлено на рис. 2.8, 2.9.

Проведемо комп'ютерне моделювання даної моделі з різними вхідними даними та порівняємо результати з опублікованими результатами експериментальних досліджень відповідних структур багат шарових магнітних екранів [6-7].

3.3 Вибір числа шарів багат шарового сферичного екрану

Критерій доцільності переходу від одно шарового екранування до багат шарового заснований на виразі

$$t \geq \frac{3R}{2\mu}$$

Суть у цьому, що застосування одно шарового екрану як порожнистої сфери стає нерентабельним, якщо не виконується вираз.

Критерій вибору числа шарів багат шарового екрану полягає у встановленні виграшу у коефіцієнті екранування при переході від використання n шарів до використання $(n + 1)$ шарів

$$\frac{K_{n+1}}{K_n} = 2\mu \cdot d^2 \frac{n^{2n-1}}{(n+1)^{2n+1}},$$

де d – сумарна товщина стінок;

n – кількість шарів.

Цей критерій можна записати в іншому вигляді

$$(n+1)^{2n+1} = 2\mu \cdot d^2 \cdot n^{2n-1}.$$

Тоді

$$d = \sqrt{\frac{(n+1)^{2n+1}}{2\mu \cdot n^{2n-1}}}.$$

Користуючись цим виразом неважко вибрати оптимальну кількість шарів екрану, виходячи з поставленої конкретної задачі.

3.4 Висновки до розділу

У розділі розроблено модель багатошарового сферичного екрану. З моделі випливає, якщо об'єкт розташувати в екрані, що складається з декількох феромагнітних шарів, розділених немагнітними проміжками, екранування об'єкта покращується.

4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Реалізація моделі для комп'ютерного моделювання

Розроблену модель багат шарового магнітного екрану (3.7) реалізуємо у програмному кодї. Для простоти обчислень та візуалізації результатів програмна реалізація виконана у програмному пакеті для математичного моделювання MatLab . Фрагменти програмного коду та схематичне пояснення реалізації елементів моделі наведено на рис. 4.1.

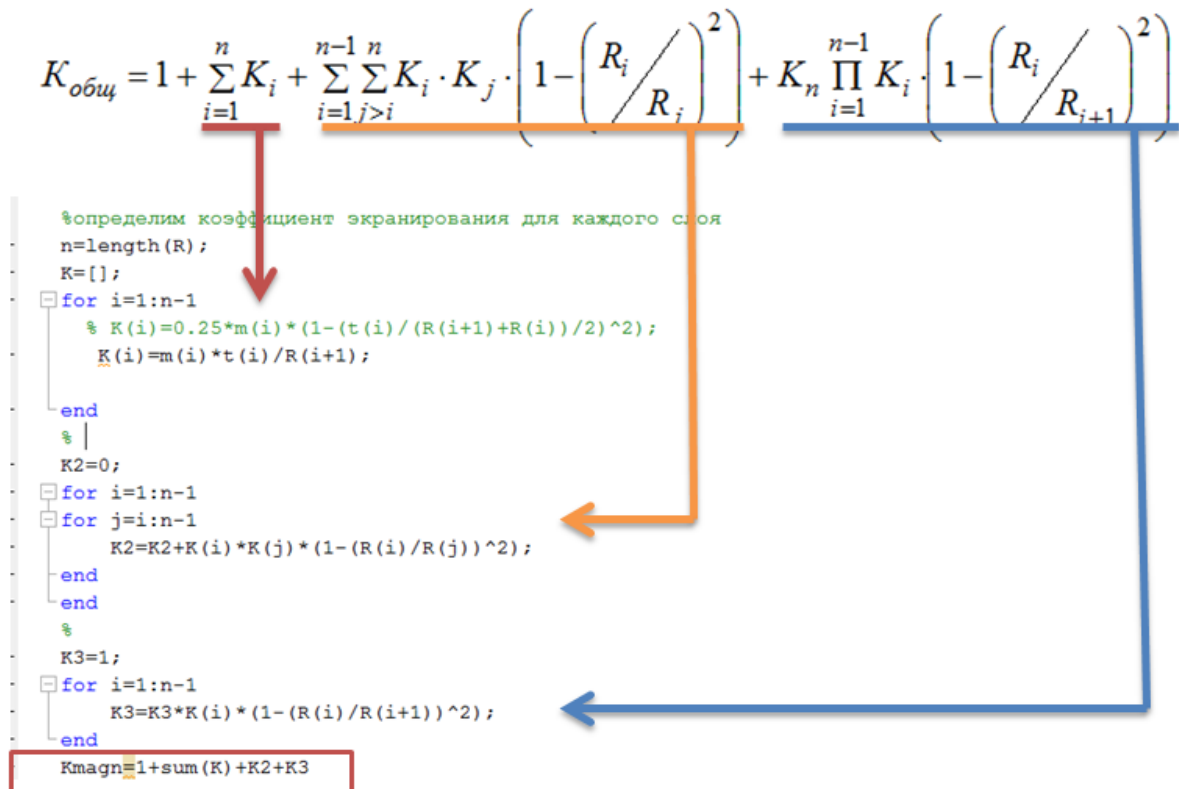


Рисунок 4.1 – Фрагмент комп'ютерної реалізації моделі

Вхідною інформацією для цієї моделі є:

- вектор значення товщин шарів (t);
- вектор значень показників магнітної проникності шарів (m);
- значення внутрішнього радіусу екрана (R).

4.2 Експериментальне обґрунтування реалізованої моделі

Для забезпечення високої ефективності екранування електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот слід застосовувати багатошаровий плівковий екран (БПЕ). Найбільш перспективним із практичної точки зору способом формування БПЕ є метод електролітичного осадження. Він забезпечує високу технологічність процесу формування та жорстку фіксацію БПЕ щодо корпусу деталі, дозволяє варіювати в широких діапазонах кількість та товщину окремих шарів.

Використовуючи дані натурального експерименту [8], перевіримо адекватність побудованої математичної моделі для розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового магнітного екрану. Для цього проведемо чисельне моделювання представлених у [8] варіантів структур екранів та порівняємо з експериментально вимірним коефіцієнтом екранування. Результати порівняльного аналізу представлені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Багатошаровий електромагнітний екран для захисту фотоелектронних помножувачів та спосіб його нанесення

Властивості	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ρ , мкОмсм	8,0	7,5	6,8	6,5	6,4	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	7,2	7,2	6,8
μ , $\times 10^5$	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	1,8	2,4	3,0	3,0	2,8	2,8	2,5	2,5	3,0
$d_{\text{немагн}}$, мкм	0,8	1,0	20,0	25,0	30,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	4,0	4,0	20,0
$\Sigma d_{\text{магн}}$, мкм	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	120,0	150,0	300,0	350,0	200,0	200,0	200,0	240,0	250,0
$\Sigma d_{\text{екрану}}$, мкм	207,2	209,0	80,0	425,0	470,0	300,0	330,0	480,0	530,0	220,0	220,0	396,0	476,0	430,0
$N_{\text{магн}}/N_{\text{немагн}}$	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	1/1	2/1	50/49	60/59	10/9
$K_{\text{заг експ}}$	16	20	70	72	73	12	25	100	100	12	22	65	74	100
$K_{\text{заг розрах}}$	18,1	21,05	70,25	72,1	73,39	11,87	24,9	101,5	102,1	12,05	22,14	64,134	77,1	101,3

З табл. 4.1 видно, що результати запропонованої моделі для розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового магнітного екрана близькі до експериментальних даних.

4.3 Комп'ютерне моделювання різних варіантів виконання багатошарових магнітних екранів

Проведемо комп'ютерне моделювання під час варіювання різних параметрів багатошарових магнітних екранів. Розглянемо приклад багатошарової структури з NiFe/Cu. Прийmemo в якості параметра, що варіюється, товщину магнітного шару ($d_{\text{манг.}}$) і кількість шарів, при цьому товщина немагнітного шару ($d_{\text{немагн.}}$) постійна (табл. 4.2, рис. 4.3).

Таблиця 4.2 – Розрахункові дані при $d_{\text{немагн.}} = 20$ мкм

№	Параметри екрану	10	20	30	60	№ графіка
1	$d_{\text{манг.}} = 5$ мкм	16	32	48	100,13	поз. 1
2	$d_{\text{манг.}} = 10$ мкм	63,9	129,8	201	480,45	поз. 2
3	$d_{\text{манг.}} = 50$ мкм	164	369,4	659,5	2456,4	поз. 3
4	$d_{\text{манг.}} = 150$ мкм	617,9	2158,5	5532,8	35532	поз. 4

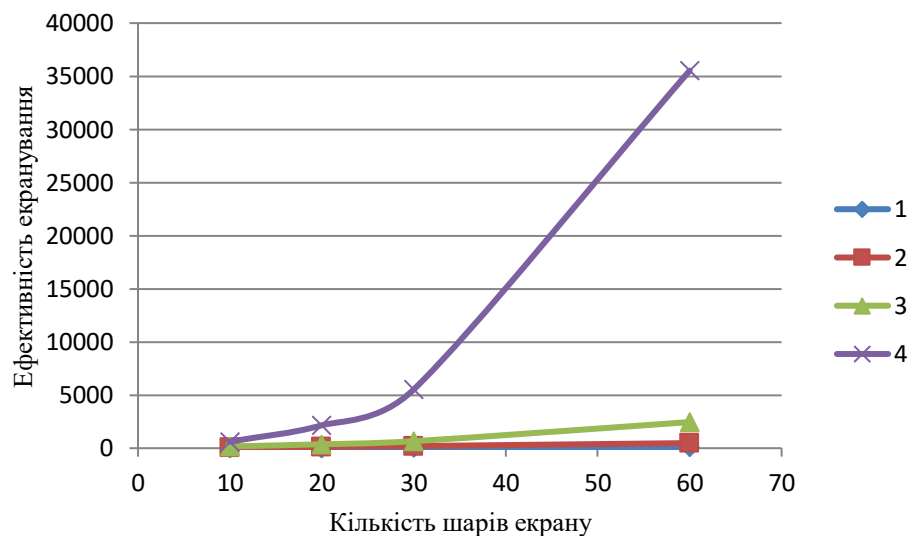


Рисунок 4.2 – Залежність ефективності екранування при зміні товщини магнітного шару та кількості шарів

Бачимо, що зі збільшенням товщини шару значна різниця в коефіцієнті екранування спостерігається при збільшенні кількості шарів. Зауважимо, що

при товщині екрана 8,5 мм коефіцієнт екранування дорівнює 35532 одиниці, в перерахунку на дБ – 91 дБ.

Проведемо моделювання ситуації, коли товщина магнітного шару стала. Результати моделювання наведено в табл. 4.3 та на рис. 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункові дані при $d_{\text{магн.}} = 5 \text{ мкм}$

№	Параметри екрану	10	20	30	60	№ графіка
1	$d_{\text{немагн.}} = 20 \text{ мкм}$	16	32	48	100,13	поз. 1
2	$d_{\text{немагн.}} = 50 \text{ мкм}$	16,67	32,67	49,32	106,54	поз. 2
3	$d_{\text{немагн.}} = 100 \text{ мкм}$	17,08	36,06	60,81	196,27	поз. 3
4	$d_{\text{немагн.}} = 1000 \text{ мкм}$	17,52	39,67	72,75	283,24	поз. 4

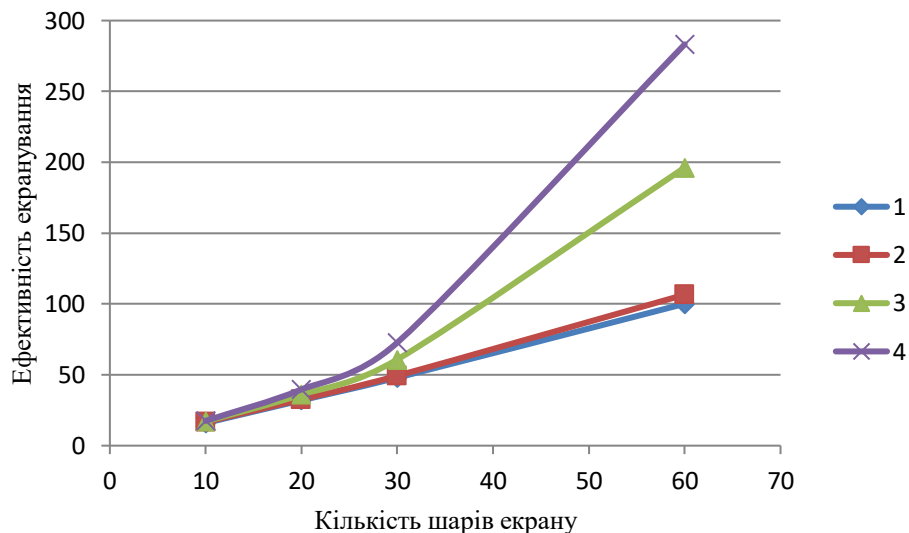


Рисунок 4.3 – Залежність ефективності екранування при зміні товщини немагнітного шару та кількості шарів

Бачимо, що товщина немагнітного шару трохи впливає на показник ефективності екранування, що логічно, виходячи з властивостей немагнітного матеріалу.

У проведеному моделюванні розглядалися симетричні структури багатошарових екранів, з використанням моделі (3.7) та розробленого програмного забезпечення.

4.4 Дослідження градієнтної структури

Проведемо чисельне моделювання багат шарової структури магнітного екрану з градієнтним розташуванням магнітних шарів. Вектор показників магнітної провідності буде мати наступний вид:

– шари розташовуються від максимальної провідності до мінімальної по мірі віддалення від центру екрана (1 варіант)

$$m_1 = [250000 \ 0.999991 \ 75000 \ 0.999991 \ 7000 \ 0.999991 \ 1540 \ 0.999991 \ 1120 \ 0.999991 \ 174];$$

– збільшення показника провідності по мірі віддалення від центру екрана (2 варіант)

$$m_2 = [174 \ 0.999991 \ 1120 \ 0.999991 \ 1540 \ 0.999991 \ 7000 \ 0.999991 \ 75000 \ 0.999991 \ 250000].$$

Результати розрахунків представлені в табл. 4.4 та на рис. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати моделювання

№	Товщина 1 магнітного шару, мкм	Коефіцієнт екранування для 1-го варіанта градієнтної структури	Коефіцієнт екранування для 2-го варіанта градієнтної структури
1	50	42,9	50,4
2	100	85,53	87
3	150	123,3	132
4	250	222,9	230
5	500	519	552

Встановлено, що при малій кількості шарів послідовність градієнтного розташування шарів не значно впливає на результат обчислення коефіцієнта екранування. Слід зазначити, що створення градієнтної структури ускладнює

технологію виготовлення, а за параметрами ефективності екранування значно поступається симетричним структурам.

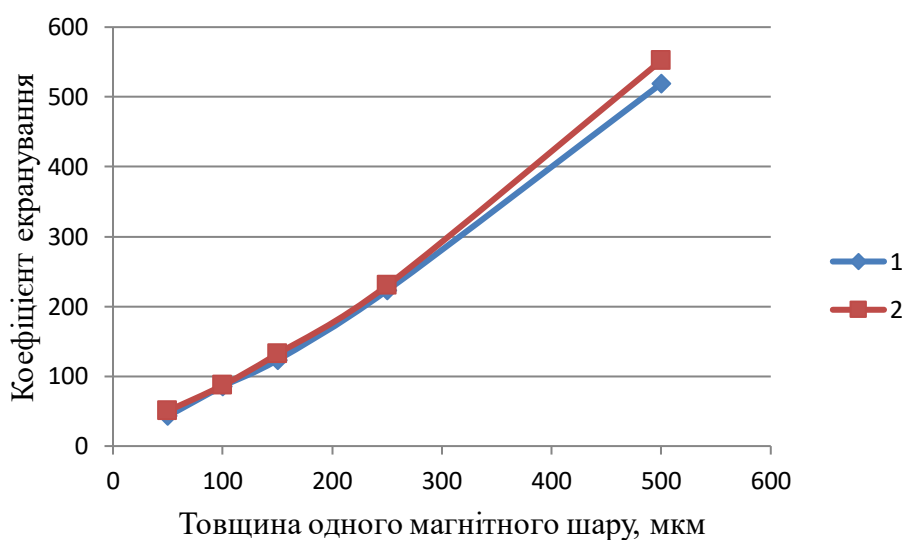


Рисунок 4.4 – Діаграма впливу товщини магнітного шару градієнтної структури БПЕ

4.5 Дослідження властивостей матеріалів для створення багат шарових екранів

Розглянемо різні варіанти застосовуваних матеріалів (табл. 2.3):

- сплав NiFe – 1 варіант;
- метал Армко – 2 варіант;
- метал Сталь – 3 варіант;
- метал Нікель – 4 варіант.

Розглянемо структуру з 30 магнітних та 30 немагнітних шарів товщиною магнітного шару 10 мкм, немагнітного – 5 мкм.

Розрахункові коефіцієнти екранування представлені на рис. 4.5.

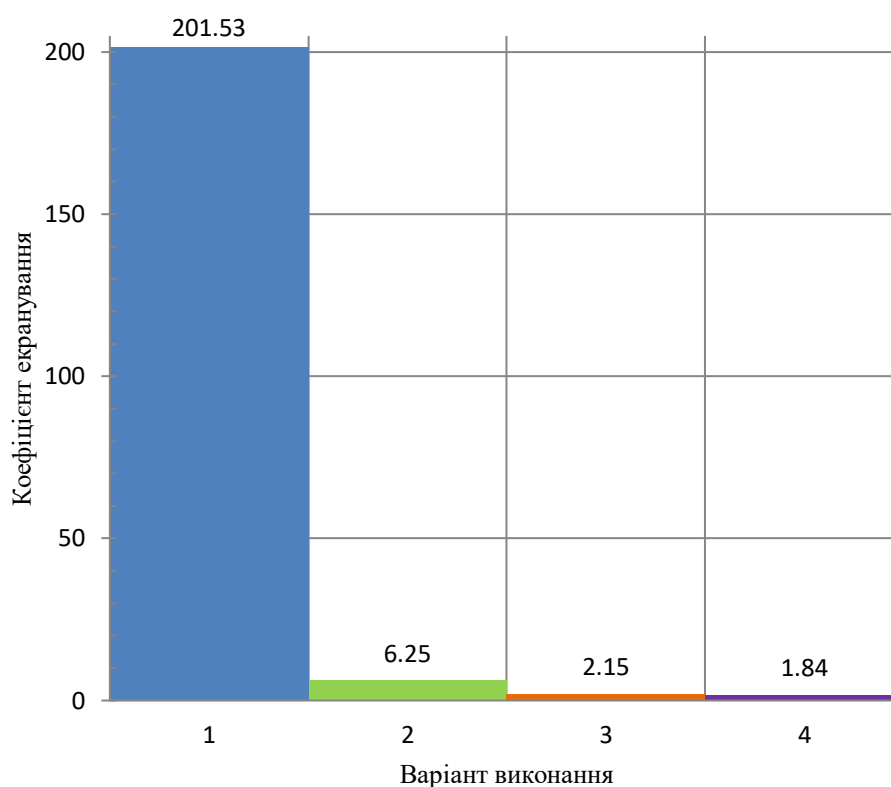


Рисунок 4.5 – Коефіцієнти екранування при використанні різних матеріалів

Як бачимо кращі властивості має сплав NiFe, який за відносно тонкого шару забезпечує коефіцієнт екранування на високому рівні.

4.6 Висновки до розділу

Застосування багатошарових екранів при виготовленні виробів радіоелектронної промисловості підвищує технологічність, мінімізує габаритні та вагові характеристики при високих захисних властивостях, що забезпечується за рахунок послідовно нанесених магнітних та немагнітних шарів.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Промислова безпека у приміщенні

Робоче приміщення працює 12 годин на добу та з урахуванням вихідних 26 днів на місяць. За рік тривалість використання електроустаткування становить 3744 години.

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирипровідної системи провідників змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220/380 В, частотою 50 Гц.

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом згідно з ПУЕ-2011 приміщення відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Умов, які створюють підвищену та особливу небезпеку (підвищена вологість, струмопровідний пил, струмопровідна підлога, можливість одночасного дотику до заземлених металоконструкцій будівлі та металевих поверхонь електроприладів, хімічно активні речовини) відсутні.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести низку організаційних та технічних заходів. Згідно ДБН В.2.5-27-2006 для запобігання ураженню людини електричним струмом у приміщенні застосовується заземлення. Усі провідники повинні відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типу апаратури захисту, вимогам ПУЕ. Контроль ізоляції необхідно проводити з періодичністю не рідше 1 разу на рік на ділянках "фаза-фаза", "фаза-нуль", "фаза-нульовий захисний провідник". Величина опору має бути не менше 500 кОм на фазу.

У приміщенні встановлено пристрій захисного відключення, що відповідає НПАОП 40.1-1-32-01, який розташований на введенні

електромережі до приміщення, з метою захисту персоналу від ураження електричним струмом.

Посадові особи та фахівці, які організують та виконують роботи, пов'язані з експлуатацією, обслуговуванням, налагодженням та ремонтом комп'ютерів, проходять навчання та перевірку знань з охорони праці та питань пожежної безпеки.

Відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05 необхідно проводити:

- вступний інструктаж – проводиться інженером з охорони праці з усіма працівниками незалежно від освіти та стажу роботи. Даний інструктаж включає ознайомлення з режимом праці та відпочинку даного підприємства а також з правилами промислової та пожежної безпеки;

- первинний робочому місці – проводиться на початку виробничої діяльності керівником структурного підрозділи. Включає ознайомлення з небезпечними та шкідливими факторами, які можуть виникати на даному робочому місці, з індивідуальними засобами захисту, що застосовуються на робочому місці, з безпечними прийомами роботи;

- повторний – проводиться раз на півроку з усіма працівниками за програмою первинного інструктажу;

- позаплановий – проводиться при заміні та модернізації обладнання, при зміні технологічного процесу, при введенні в дію нових стандартів та правил з охорони праці. Включає ознайомлення з новим обладнанням і повторенням правил промислової безпеки, якщо стався нещасний випадок на виробництві;

- цільовий – проводиться у разі виконання разових робіт, які пов'язані з основним видом діяльності, при ліквідації аварій, надзвичайних ситуацій, катастроф.

5.2 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота в приміщенні, згідно з ДСН 3.3.6.042-99, відносяться до категорії робіт з енерговитрат організму «легка 1а» – це робота, яка

виконується сидячи, яка не вимагає систематичної фізичної напруги та переміщення тяжкості з енерговитратами організму до 120 ккал/год.

Для забезпечення норм мікрокліматичних параметрів та чистоти повітря застосовується кондиціювання повітря у теплий період та опалення у холодний період року.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 роботи у цьому приміщенні належить до III розряду високої точності, підкатегорія «В». Мінімальна освітленість для даних робіт у лабораторії має становити 200-500 лк.

Нормована шумова характеристика робочих місць згідно з ДСН 3.3.6.037-99, при постійному шумі є рівні звукових тисків в децибелах в октавних смугах. Еквівалентний рівень звукового тиску на робочому місці під час виконання робіт, пов'язаних з виробленням концепцій, розробкою нових програм, інших творчих робіт, а також під час навчання не повинен перевищувати 50 дБА.

Для забезпечення нормованих рівнів шуму у виробничих приміщеннях і на робочих місцях застосовуються шумопоглинаючі засоби, в якості яких повинні застосовуватися спеціальні перфоровані плити, панелі, які не згоряють або мінеральна вата з максимальним коефіцієнтом звукопоглинання в межах частот 31,5-8000 Гц або інші матеріали аналогічного призначення.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях

Надзвичайна ситуація – це обстановка на певній території, що склалася внаслідок аварії, небезпечного природного явища, катастрофи, стихійного чи іншого лиха, які можуть спричинити людські жертви, шкоду здоров'ю людей або навколишньому природному середовищу, значні матеріальні втрати та порушення умов життя людей.

Пожежа на робочому місці може виникнути в результаті попадання на дрібні деталі та дроти ПЕОМ струму, достатнього для їх перегріву та

виникнення електричної дуги, внаслідок чого можуть спалахнути горючі деталі, розташовані поруч.

Згідно з ДБН В.1.1.7-2002, будівля має II ступінь вогнестійкості, так як дане приміщення розташоване в цегляній будівлі, при роботі застосовуються тверді матеріали, що загоряються.

За пожежонебезпечністю приміщення, згідно з НАПБ Б.03.002-2007, відноситься до категорії В. Приміщення має пожежонебезпечні зони, отже належить до класу П-Па згідно з НПАОП 40.1-1.01.97.

Основним обладнанням, що застосовується в приміщенні, є ПК та периферія. Іскріння, яке може бути викликане замиканням, веде до перевантажень елементів, що перегріваються та згоряють. Кабелі для подачі живлення можуть бути найбільш пожежонебезпечними. Для зменшення небезпеки займання кабелі покривають вогнезахисними покриттями.

Захист проти пожежі досягається застосуванням первинних засобів пожежогасіння. Згідно з НАПБ Б.03.001-2004 у приміщенні лабораторії розміщується 1 вуглекислотний вогнегасник ВВК-2 (1 вогнегасник на 3 ПК), телефон, встановлений у легкодоступному місці, автоматична пожежна сигналізація з 2-ма пожежними димовими оптичними сповіщувачами згідно з ДБН В.2.5-56-2010 (1 на 86 м², але не менше 2-х на одне приміщення), яка реагує на появу диму, протипожежне покривало, ящик з піском об'ємом 0,3 м³.

Відповідно до ГОСТ 12.1.004-91 для запобігання пожежі передбачено:

- не поєднувати системи кондиціонування робочого та інших приміщень;
- застосовувати загальні чи місцеві протипожежні перепони;
- навчати обслуговуючий персонал лабораторії протипожежних правил.

Організаційні заходи включають проведення інструктажів з пожежної безпеки, призначення відповідального за пожежну безпеку, нагляд за засобами пожежогасіння, видання необхідних інструкцій, планів евакуації, наявність індивідуальних засобів захисту.

У приміщенні працює 2 особи та відстань до виходу не перевищує 25м, отже, у разі пожежі, час евакуації займе не більше 30 секунд, тому достатньо

використовувати один вихід – робочі двері, шириною висота 1,2 м и – 2,4 м. Рекомендується помістити план евакуації під час пожежі на стіні біля виходу з приміщення.

5.4 Висновки до розділу

У розділі розглянуто питання техніки безпеки, виробничої санітарії та пожежної профілактики, проведено аналіз умов праці у науково-дослідній лабораторії. Виявлено небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що діють на людину в даному приміщенні.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз існуючих методів підвищення електромагнітної стійкості та сумісності РЕЗ, який показав, що найбільш раціональним методом підвищення стійкості електронної системи до впливу ЕМВ є підвищення стійкості до ЕМВ найслабших елементів системи. У тих випадках, коли вибором найбільш стійких до впливу ЕМВ елементів або схемним рішенням не вдається підвищити стійкість системи до бажаного рівня, слід вдатися до спеціальних засобів захисту від впливу ЕМВ: фільтрів, трансформаторів, дроселів; розрядників, обмежувачів, роз'єднувачів; заземлення та екрани.

Розглянуто технологію екранування з використанням багат шарових плівкових структур. Ефективність екранування МПЕ по постійному магнітному полю напруженістю 1000 А/м становить 45-90 дБ, що в 3-5 разів вище, ніж у рівних за товщиною екранів з одношарових магнітом'яких матеріалів.

Застосування багат шарових екранів при виготовленні виробів радіоелектронної промисловості підвищує технологічність, мінімізує габаритні та вагові характеристики при високих захисних властивостях, що забезпечується за рахунок послідовно нанесених магнітних та немагнітних шарів (товщиною в межах 1-225 мкм) з сумарною товщиною магнітних шарів до 300-500 мкм.

Встановлено, що при низькому значенні кількості шарів складова ефекту екранування, що визначається послабленням електромагнітної хвилі за рахунок відбиття на межі розділу між шарами, знижується. На ефективність екранування багат шарових магнітних екранів значно впливає кількість шарів, товщина магнітного шару і матеріал магнітного шару. Товщина немагнітного шару незначно впливає на показник ефективності екранування, що логічно з властивостей немагнітного матеріалу.

Дослідження градієнтного розташування шарів багат шарових магнітних екранах показало, що послідовність градієнтного розташування шарів не значно впливає на результат екранування. Слід зазначити, що створення градієнтної структури ускладнює технологію виготовлення, а за параметрами ефективності екранування значно поступається симетричним структурам. Так симетрична структура NiFe/Cu з 30 шарів забезпечує коефіцієнт екранування 659,5 в той же час градієнтна структура всього 50,4.

У розділі «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» розглянуто питання техніки безпеки, виробничої санітарії та пожежної профілактики, проведено аналіз умов праці у виробничому приміщенні. Виявлено небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що діють на людину в даному приміщенні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
3. Сахаров М.С. Моделювання багатопарових магнітних екранів // Автоматизація та приладобудування, 2022. Випуск 2, с. 1-6.
4. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури / Іванов В. О., Ільницький Л. Я., Щербіна О. А. – К.: НАУ, 2014. – 312 с.
5. Glyva V., Tykhenko O., Khodakovskyy O. Методологія проектування неоднорідних електромагнітних екранів // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2019. – Т. 4 (56). – С. 122-125.
6. Tykhenko O. Загальні засади проектування електромагнітних екранів та екрануючих конструкцій // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 1 (59). – С. 116-119.
7. Analytical models for magnetic shield design [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://ftp.aip.org/epaps///rev_sci_instrum/E-RSINAK-83-014206/weldedMagneticShieldingSupplementary.pdf.

8. Багатошаровий електромагнітний екран для захисту фотоелектронних помножувачів і спосіб його нанесення [Електронний ресурс] / Режим доступа: <http://www.findpatent.ua/patent/247/2474890.html>.

9. Kasatkina N., Tykhenko O., Fursenko O. Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 2 (60). – С. 118-121.

10. Y.O. Onikienko, V.V. Pilinsky, P.V. Popovych, V.S. Lazebnyi, O.I. Smolenska, V.S. Baran. Modelling of Operation Modes and Electromagnetic Interferences of GaN-Transistor Converters "Електротехніка". № 3. 2020. PP. 37-42.

11. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в атестаційних роботах ОКР «магістр» / Упоряд.: Б.В. Дзюндзюк, В.А. Айвазов, Т.Є. Стиценко. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 54 с.