

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ та ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Захисні екрани від мікрохвильового випромінювання. Енергетичні та
радіотехнічні параметри»

Виконала: студентка 2 курсу магістратури,
групи НФ-63
Лудчак І.В.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма:
Прикладна фізика енергетичних систем
Керівник: проф. Кокодій М.Г.
Рецензент:

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітньо-професійна програма Прикладна фізика енергетичних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
(підпис)

“ ____ ” _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Лудчак Ірина Василівна

1. Тема роботи: «Захисні екрани від мікрохвильового випромінювання.
Енергетичні та радіотехнічні параметри»

керівник роботи: Кокодій Миколай Григорович, професор

Затверджено наказом по університету від 12 вересня 2023 року № 4201-5/2491

2. Строк подання студентом роботи 07.12.2023 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести огляд методів екранування електромагнітного випромінювання;
2. Дослідити поглинання і розсіювання електромагнітного випромінювання дуже тонкими провідниками;
3. Ознайомитися з конструкціями захисних екранів для мікрохвильового випромінювання з застосуванням дуже тонких провідників;

4. Дослідити залежність пропускання екраном від частоти;
5. Дослідити залежність розсіяння екраном від частоти;
6. Дослідити залежність пропускання екраном від кута падіння випромінювання.

7. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота з літературними та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання кваліфікаційної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

8. Дата видачі завдання 21 вересня 2023 року

Студентка

підпис

Ірина ЛУДЧАК

Керівник роботи

підпис

Миколай КОКОДІЙ

Перелік скорочень та абревіатур

ЕМВ – електромагнітне випромінювання.

ЕМІ – електромагнітна інтерференція.

ТРГ – терморозширений графіт.

ІГ – інтеркалірований графіт.

РЕФЕРАТ

Лудчак Ірина «Захисні екрани від мікрохвильового випромінювання. Енергетичні та радіотехнічні параметри». Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2023. - 41 с.

Робота складається з вступу, трьох розділів та висновків. Робота містить 16 рисунків, 21 використаних літературних джерел.

Ця кваліфікаційна робота присвячена дослідженню захисних екранів мікрохвильового діапазону на основі тонких провідникових волокон.

Виміряно пропускання, відображення та поглинання екранів на основі графітових волокон діаметром 12-15 мкм. У тонких провідних волокнах, діаметр яких набагато менше довжини хвилі, мікрохвильове випромінювання поглинається дуже сильно. Цей ефект використовується для створення захисних екранів у цьому діапазоні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: тонке волокно, пропускання, поглинання, захисний екран, відбиття, мікрохвильове випромінювання.

ABSTRACT

Ludchak Iryna "Protective screens against microwave radiation. Energy and radio technical parameters". Master's thesis in applied physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University, 2023. - 41 p.

The work consists of an introduction, three sections and conclusions. The work contains 16 drawings, 21 used literary sources.

This qualifying work is devoted to the research of protective shields of the microwave range based on thin conductive fibers.

The transmission, reflection and absorption of screens based on graphite fibers with a diameter of 12-15 microns were measured. In thin conductive fibers microwave radiation is absorbed very strongly because the diameter is much smaller than the wavelength. This effect is used to create shields in this range.

KEY WORDS: thin fiber, transmission, absorption, protective screen, reflection, microwave radiation.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕКРАНІВ	10
1.1 Метод захисту від ЕМВ за допомогою вуглецевих ниток.....	11
1.2 Метод захисту від ЕМВ за допомогою деревного вугілля.....	12
1.3 Захисні властивості композиційних облицювальних матеріалів.	15
1.4 Метод захисту від ЕМВ за допомогою макроплівки.....	17
РОЗДІЛ 2. ПОГЛИНАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ДУЖЕ ТОНКИХ ПРОВІДНИКАХ	20
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТ	26
3.1. Вимірювання коефіцієнта пропускання.....	29
3.2. Вимірювання коефіцієнта відбиття.....	31
3.3. Вимірювання залежності пропускання від кута падіння випромінювання.....	33
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

У сучасному світі, котрий населений технологічними інноваціями та високочастотними пристроями, вплив мікрохвильового випромінювання на здоров'я людини стає предметом серйозної обуреності та наукового дослідження. Мікрохвильове випромінювання, що виникає внаслідок використання електроніки та бездротових технологій, має потенційно шкідливий вплив на організм, і відповідно до цього виникає необхідність в розробці та впровадженні захисних екранів.

Дана робота призначена для вивчення та аналізу різних аспектів мікрохвильового випромінювання та розробки захисних екранів, які мають на меті захистити користувачів від його негативного впливу. У рамках цього дослідження будуть розглянуті технологічні аспекти створення таких екранів, їхня ефективність та можливості застосування в реальних умовах.

Крім того, ця робота також відзначить важливість і актуальність проблеми мікрохвильового випромінювання та розвитку нових заходів для захисту здоров'я та благополуччя суспільства в умовах стрімкого технологічного прогресу.

Далі у роботі будуть представлені результати експериментів та аналіз, які сприятимуть розумінню можливих шляхів покращення захисту від цього виду електромагнітного випромінювання та зменшенню його негативного впливу на людину.

Зважаючи на те, що сучасна суспільність все більше піддається впливу мікрохвильового випромінювання через використання мобільних телефонів, Wi-Fi мереж, мікрохвильових печей та інших електронних пристроїв, розробка та впровадження ефективних захисних екранів набуває надзвичайної важливості. Навіть незначний вплив мікрохвильового випромінювання на

біологічні тканини може мати серйозні наслідки для здоров'я, такі як загроза виникнення пухлин, руйнування ДНК та інші порушення.

Ми прагнемо зробити важливий внесок у розвиток нових технологій, спрямованих на збереження здоров'я та безпеку сучасного суспільства в умовах постійного росту використання електронної та бездротової технології.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідити енергетичні та радіотехнічні параметри захисних екранів від мікрохвильового випромінювання.

Об'єктом досліджень кваліфікаційної роботи – захисні екрани від мікрохвильового випромінювання.

Предмет досліджень кваліфікаційної роботи – енергетичні та радіотехнічні параметри захисних екранів від мікрохвильового випромінювання.

Актуальність теми. Дану тему про дослідження захисних екранів мікрохвильового випромінювання підтримав «Західний центр радіотехнічного спостереження» м. Мукачево від 22.09.2023р.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕКРАНІВ

Екранування електромагнітних полів є актуальною задачею захисту здоров'я людей, інформаційної безпеки та електромагнітної екології. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ) має змогу взаємодіяти з електронікою (комп'ютерами, телефонами і другою апаратурою), тому треба зробити екранування електроніки та джерел випромінювання.

Використовуються два головних механізми: відбиття та поглинання для захисту від електромагнітних перешкод.

Матеріал екрану, котрий призначений для відбиття випромінювання, повинен мати рухомі носії заряду (електрони або дірки), які в свою чергу взаємодіють із електромагнітними полями. Металеві екрани набули попити давно та активно застосовуються. Але такі металеві екрани мають вагомий недолік, котрий пов'язаний з їх високою електропровідністю, а саме з високим коефіцієнтом відбиття, обумовленим великою відмінністю хвильового опору вільного простору та екрану.

Другий існуючий механізм захисту від електромагнітного випромінювання - це поглинання. Екран повинен мати електричні або магнітні диполі для поглинання випромінювання. Саме такі диполі можуть бути представлені титанатом барію (BaTiO_3) або іншим матеріалом, котрий має високу діелектричну проникність. Магнітні диполі можуть бути представлені магнетитом (Fe_3O_4) або іншим матеріалом, який має велику магнітну проникність.

Одним із ефективних підходів до вирішення даної проблеми, а саме екранування є використання нових матеріалів.

1.1 Метод захисту від ЕМВ за допомогою вуглецевих ниток

У статті [1] описан метод захисту від ЕМВ, у основі якого є використання вуглецевих ниток субмікронного діаметра з металевим покриттям. Перевага цього методу над методом, в якому застосовуються металеві волокна мікронного діаметра, полягає не тільки в зменшенні діаметра ниток, а й в можливості використання гнучких рішень для конструкцій, що екранують.

Пропонується розв'язання проблеми обмежень у формі екранів та складності їх монтажу шляхом використання гнучкого графіту. При отриманні терморозширеного графіту (ТРГ), призначеного для створення графітових ущільнень, використовується крупнозернистий природний графіт, що був оброблений сірчаною кислотою, після чого його відмивають від залишків кислоти та сушать. Отриманий інтеркалюваний графіт (ІГ) піддають швидкому нагріванню при температурі від 900 до 1500 °С зі швидкістю 400–600 °С/с. Внаслідок термічного розширення ІГ спричиняється збільшення розмірів кристалітів графіту вздовж осі від 300 до 500 разів та утворення черв'ячоподібних частинок ТРГ.

Задля отримання графітових ущільнень, черв'ячоподібні частинки терморозширеного графіту утворюють методом прокатки. Отримані гнучкі графітові прокладки мають високу електропровідність, міцність, термостійкість. Гнучкі електромагнітні екрани знаходять широке застосування. Їх застосовують не тільки для придушення небажаних ЕМІ електронної техніки та в якості екологічного захисту живих організмів від шкідливого впливу ЕМІ, але й для створення одягу спеціального призначення, захисту пристроїв обробки інформації, у військовій справі при виробництві виробів електроніки для зниження помітності об'єктів та підвищення їх завади.

1.2 Метод захисту від ЕМВ за допомогою деревного вугілля

Розглянутий метод у статті [2] полягає в поглинанні випромінювання. Був запропонований природний сорбент - деревне вугілля як порошкоподібний наповнювач композиційного екрануючого покриття. Структура провідних тканин деревини при піролізі зберігається. Саме тому у деревному вугіллі, що утворюється, є значна кількість капілярів і пор, які мають велику сумарну поверхню. Це сприяє його великій поглинальній здатності.

Деревне вугілля має великий питомий електричний опір і високу теплостійкість. Збільшується електропровідність вугілля після його прожарювання. Тому можна отримувати продукти із встановленими електричними властивостями за рахунок прожарювання вугілля.

Також у статті розглянуто використання різних складів синтезованих композиційних екрануючих покриттів.

Використання наповнювачів, які здатні поглинати вологу, сприяє підвищенню ефективності поглинання електромагнітного випромінювання через можливість води взаємодіяти з цим видом випромінювання, а саме з електромагнітним випромінюванням. Додавання порошку діоксиду титану до складу захисних покриттів дозволяє знижувати електромагнітну енергію на рівні від 10 до 18 дБ і отримувати коефіцієнт відбиття в межах від -2 до -6 дБ в діапазоні 8 –12 ГГц.

Можемо регулювати коефіцієнт відбиття конструкцій з геометричними неоднорідностями від -9 до -21 дБ, в діапазоні від -4 до -7 дБ - для конструкцій з плоскою поверхнею в діапазоні. Це все можливо із-за застосування розчинних наповнювачів різних складів, наприклад з додаванням гліцерину або хлористого натрію та інші.

Для того, щоб мати змогу утримувати стабільну кількість молекул води, автори вибрали одним із компонентів розчину - хлористий кальцій CaCl_2 . Він представляє нетоксичну, добре розчинну гігроскопічну сіль лужноземельного

металу. Створення хімічних зв'язків між іонами розчиненої солі лужноземельного металу та молекулами води веде до утворення міцних сполук. Ці сполуки перешкоджають випаровуванню молекул води з поверхні та складу порошкоподібного наповнювача, що в результаті допомагає зберегти початковий рівень вологості у складі композиційного екрануючого покриття.

Для проведення експериментів було обрано дві групи зразків комбінованих конструкцій з плоскою та пірамідальною формою поверхні, для чого використовувався нетканий матеріал на основі целюлози.

На поверхні зразків двох груп наносився шар синтезованого композиційного покриття завтовшки 2 мм. Вимірювання екрануючих характеристик проводилися за допомогою вимірювача модуля коефіцієнтів передачі та відбиття SNA 0.01-18 у діапазоні 0.7 до 17.0 ГГц.

Досліджувалися екрануючі характеристики двох груп зразків із синтезованими композиційними покриттями на плоскій та пірамідальній поверхнях у діапазоні частот 0,7 до 18 ГГц.

На підставі отриманих залежностей ослаблення ЕМВ від частоти було встановлено, що зразки з покриттями на основі деревного вугілля, нанесеними на плоску поверхню в діапазоні 0.7 до 3.0 ГГц, характеризуються значеннями ослаблення в межах від 0.1 дБ до 1.5 дБ. Рис. 1.1.(а). При формуванні комбінованого покриття з використанням порошку TiO_2 спостерігається характерна зміна значень ослаблення в межах від 1 дБ до 4 дБ. При цьому коефіцієнт відбиття для груп зразків з наповнювачем на основі деревного вугілля коливається в межах -5 до 30 дБ в діапазоні частот 0.7 – 3 ГГц. Для групи зразків із комбінованим покриттям з використанням порошку TiO_2 спостерігається зміна значень коефіцієнта відбиття в середньому на 10 дБ, що відповідає значенням -3 до -15 дБ.

У режимі короткого замикання Рис.1.1.(в) спостерігається значне збільшення значень коефіцієнта відбиття незалежно від типу використовуваного наповнювача на плоских поверхнях всіх груп зразків і з

використанням порошку TiO_2 знаходяться в межах -0.1 до -4 дБ у діапазоні частот 0.7 до 30 ГГц.

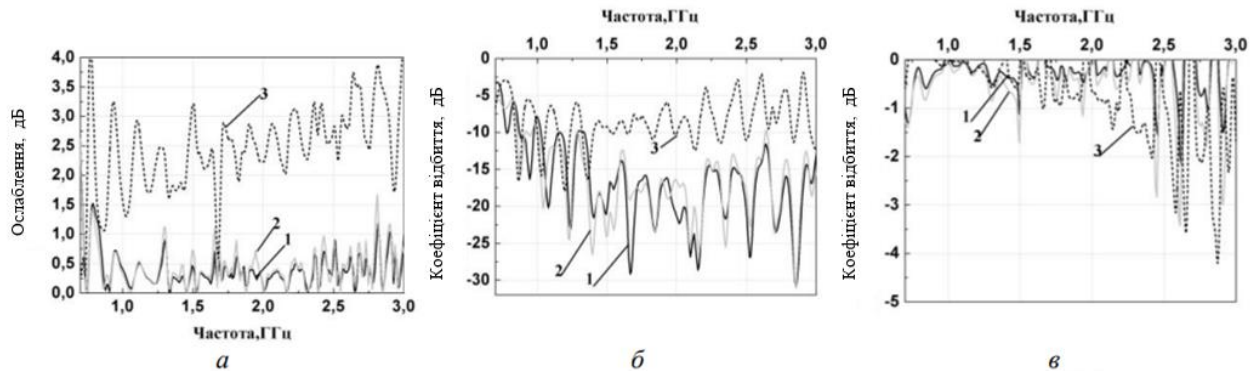


Рис. 1.1. Частотна залежність характеристик у діапазоні 0.7 до 3 ГГц зразків із синтезованими композиційними покриттями на плоскій поверхні:
a – ослаблення; *б* - коефіцієнт відбиття в режимі узгодженого навантаження; *в* - коефіцієнт відбиття в режимі короткого замикання

Зі зростанням частоти спостерігається збільшення значень величини ослаблення ЕМІ на $2,0$ до $4,0$ дБ всім груп зразків з плоскою поверхнею.

Для зменшення відбиття від поверхні зразка, зверненої до джерела ЕМВ, пропонується надати поверхні форму, яка збільшує його активну поверхню. На рис. 1.2. показано підвищення загальної ефективності екранування за рахунок додаткового розсіювання електромагнітних хвиль, що падають, і перевідображення їх між гранями пірамід.

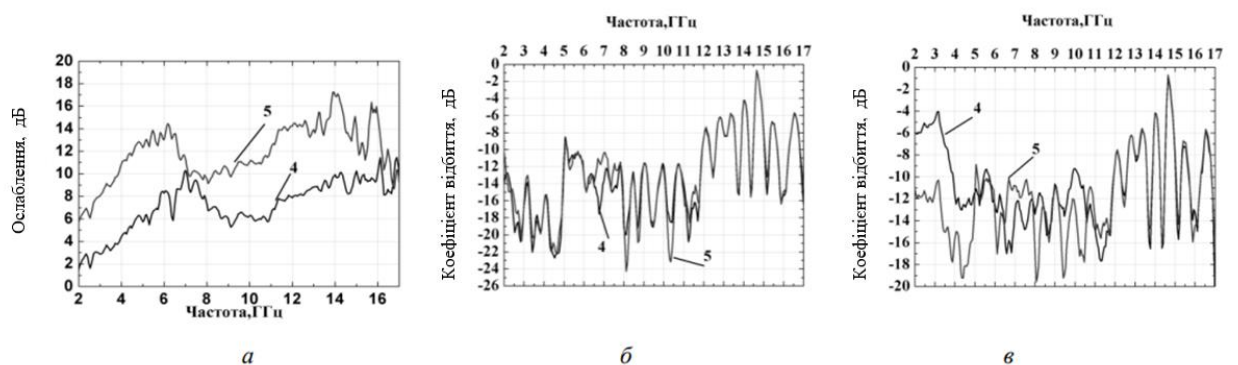


Рис. 1.2. Частотна залежність екрануючих характеристик у діапазоні 2 до 17 ГГц зразками із синтезованими композиційними покриттями на пірамідальній поверхні:
a – ослаблення; *б* - коефіцієнт відбиття в режимі узгодженого навантаження; *в* - коефіцієнт відбиття в режимі короткого замикання

В результаті проведених досліджень показано можливість нанесення композиційного покриття на поверхню конструкції з пірамідальними неоднорідностями, що призводить до збільшення ефективності екранування ЕМВ в середньому на 10 – 12 дБ у всьому діапазоні частот. Отримані результати дозволяють рекомендувати розроблену методику створення зразків для формування оздоблювальних панелей для електромагнітного екранування НВЧ-джерел та забезпечення екологічного захисту обслуговуючого персоналу, користувачів компютерів та медичних і промислових установок.

Необхідно відмітити велику ізрізаність і неоднорідність частотних характеристик, показаних на рисунках.

1.3 Захисні властивості композиційних облицювальних матеріалів.

У роботі [3] представлено результати теоретичних досліджень, які стосуються захисних властивостей композиційних облицювальних матеріалів. Ці дослідження проведені на основі діелектричної матриці, яка містить немагнітний електропровідний наповнювач. Особливий акцент був зроблений на широкому діапазоні частот падаючого електромагнітного випромінювання. У результаті цих досліджень вдалося встановити теоретичні залежності, які адекватно описують процеси розсіювання електромагнітних хвиль в тілі такого композиту.

Розроблена методика розрахунків для визначення параметрів відбиття (R) та пропускання (T) плоскої електромагнітної хвилі, що припадає на плоский шар речовини, розташований між вакуумом та будь-яким іншим середовищем. Одержавши значення відбиття та пропускання, можна оцінити поглинання електромагнітних хвиль матеріалом за допомогою формули: $A = 1 - R - T$. Таким чином, з відомими реальною та уявною частинами діелектричної проникності зразків з різним вмістом провідної добавки, можна розрахувати залежності T, R та A від об'ємного вмісту провідної компоненти та частоти падаючої електромагнітної хвилі.

Процедура експерименту включала використання аморфізованих дисперсних гідросилікатів кальцію у якості діелектричної матриці при формуванні зразків. Електропровідну добавку представляв порошок міді з частинками, розміри яких не перевищували 60 мікрон. Були використані спеціальні заходи для забезпечення рівномірного розподілу гранульованої міді у всьому об'ємі матеріалу. Зразки, що використовувалися для вимірювань, мали форму плиток розміром 125×66×5 мм. Проведення вимірювань пропускання та відбиття здійснювалося на частотах електромагнітних хвиль, які належали до діапазону від 19 до 26 ГГц.

У кінці роботи маємо такий висновок: не виявлено плавного переходу між відповідними залежностями при значеннях кута θ менше за критичний кут θ_c та при значеннях більше за θ_c .

Основним недоліком даного методу є те, що розрахунки проведені лише для нормального падіння електромагнітної хвилі на матеріал. Крім того, не враховано вплив матеріалу, до якого прикріплено екрануючий шар. Тобто аналіз проводився лише для тієї сторони, на яку спрямований вплив електромагнітної хвилі.

Вибір вуглецевих нанотрубок був обґрунтований тим, що метали та композити, незважаючи на високий рівень екранування від електромагнітних перешкод, мають суттєві недоліки, пов'язані з їхньою великою масою.

Крім цього, останні дослідження показали, що зі зростанням частоти ефективність екранування від електромагнітних перешкод звичайним металевим екраном різко зменшується. У зв'язку з цим для заміни або доповнення звичайних металів, які використовуються для екранування від електромагнітних перешкод, стає все популярнішим використання альтернативних легких матеріалів з високою ефективністю на високих частотах.

1.4 Метод захисту від ЕМВ за допомогою макроплівки

Автори [4] під час свого дослідження виявили, що при макроплівці товщиною біля 4 мкм на основі вуглецевих нанотрубок, яка приклеєна до поверхні звичайної тканини має стабільно високу ефективністю екранування від 48 дБ до 57 дБ у діапазоні від 40 ГГц до 60 ГГц. Ці результати суттєво відрізняються від результатів традиційних електромагнітних екрануючих матеріалів, які демонструють зниження ефективності екранування при збільшенні частоти. Наприклад, ефективність екранування мідною фольгою зменшується з 75 дБ до 35 дБ при збільшенні частоти від 25 ГГц до 60 ГГц.

Обґрунтуванням вибору вуглецевих нанотрубок стало також те, що метали та композити, незважаючи на високий рівень екранування від електромагнітних перешкод, мають суттєві недоліки у їх великій вазі.

Для експерименту макроплівки з вуглецевих нанотрубок великої площі (більше 30 см × 3 см) були виготовлені методом хімічного осадження з парової фази плаваючого каталізатора. Товщина макроплівок була відрегульована від 1 мкм до 4 мкм під час виготовлення.

Камера складалася з екрануючого приміщення, обшитого абсорбуючими матеріалами, антенної вимірювальної системи, поворотного столу та системи керування. Системою вимірювання антени була система Hewlett Packard HP85301B. Міліметрові хвилі випромінювала рупорна антена зі стандартним посиленням (частота випромінювання коливалась від 40 ГГц до 60 ГГц).

У експерименті використовувалися дві ідентичні рупорні антени зі стандартним посиленням. Макроплівку приклеювали до поверхні звичайної тканини. Тканина потім була використана для покриття апертури рупорної антени зі стандартним посиленням, яка використовувалась для прийому сигналу. Інший рупор був встановлений у протилежному напрямку до випромінювача. Безлунну камеру герметизували. Після знаходження оптимального положення випромінювача і приймача вимірювали ефективність екранування макроплівки. Щоб забезпечити точність

вимірювань, кожен зразок вимірювався в однакових умовах щонайменше п'ять разів.

На рис. 1.3 показано залежність ефективності екранування для різних частот. Спостерігається сильна різаність характеристики екранів.

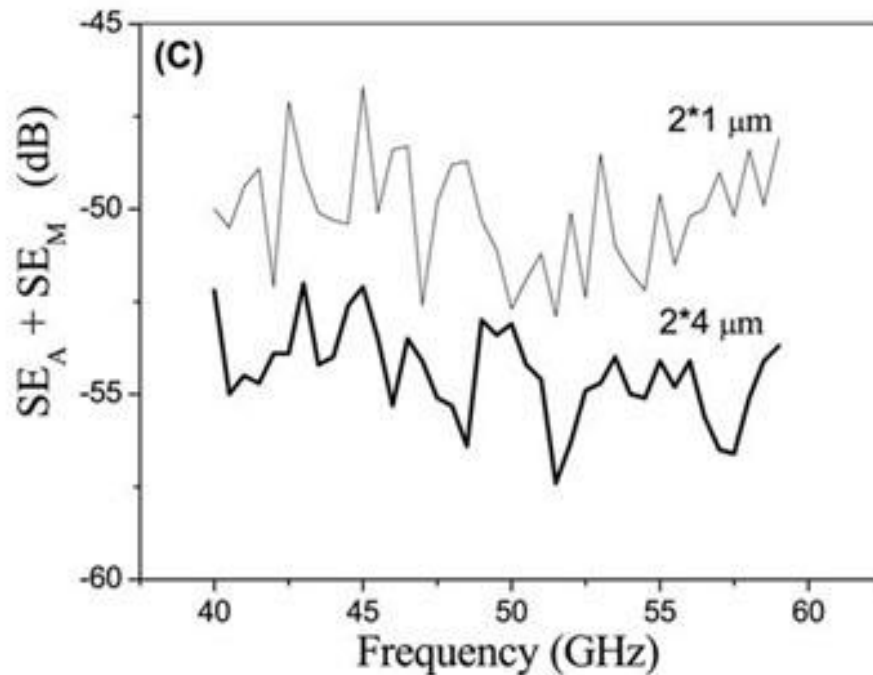


Рис. 1.3. Ефективність екранування у діапазоні від 40 ГГц до 60 ГГц одного шматка плівки та Cu фольги (1 мм)

Для оцінки впливу багатьох проміжків у композитних макроплівках, які використовуються для захисту від міліметрових хвиль, були використані макроплівки з карбонових нанотрубок різної товщини. Ці плівки були розміщені симетрично на тканині та використані для покриття відкриття рупорної антени стандартного типу.

Підсумовуючи дослідження, були досліджені композитні макроплівки з карбонових нанотрубок, які зберігають легкість, пружність до шовку та гладкість для ефективного екранування від електромагнітних перешкод. На високому діапазоні ефективності екранування, від 48 дБ до 57 дБ у діапазоні від 40 ГГц до 60 ГГц, звернули увагу макроплівки товщиною приблизно 4 мкм, що були приклеєні до звичайної тканини. Отримані результати свідчать, що ефективність екранування композитною плівкою не

зменшується зі зростанням частоти, відмінно від традиційних електромагнітних екрануючих матеріалів.

В роботі [5] описані захисні екрани на основі композитних матеріалів. Екрани можуть працювати в широкому діапазоні частот.

РОЗДІЛ 2. ПОГЛИНАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ДУЖЕ ТОНКИХ ПРОВІДНИКАХ

Поглинання та розсіяння випромінювання циліндричними об'єктами (прозорими волокнами, металевими провідниками, напівпровідниковими та графітовими волокнами) залежить від відношення діаметра волокна D до довжини хвилі випромінювання λ . В звичайних умовах максимум взаємодії випромінювання з волокном спостерігається при $D/\lambda \approx 1$. Але в роботах [5, 6] був описаний ефект дуже сильного поглинання та розсіяння випромінювання провідниковими волокнами діаметр значно менший, ніж довжини хвилі випромінювання у кілька сотень разів.

Безрозмірними факторами характеризується взаємодія електромагнітної хвилі з об'єктом:

$$Q_{sca} = \frac{P_{sca}}{P} - \text{фактор ефективності розсіяння,}$$

$$Q_{abs} = \frac{P_{abs}}{P} - \text{фактор ефективності поглинання,}$$

$$Q = Q_{sca} + Q_{abs} - \text{фактор ефективності ослаблення.}$$

P – потужність випромінювання, яке потрапило на об'єкт,

P_{sca} – потужність розсіяного випромінювання,

P_{abs} – потужність поглиненого випромінювання.

Для E -хвилі у роботах [7-9], даються такі формули:

$$Q = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \text{Re}(b_l) \quad (1)$$

$$Q_{sca} = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |b_l|^2 \quad (2)$$

$$Q_{abs} = Q - Q_{sca} \quad (3)$$

$$b_l = \frac{m J_l'(m\rho) J_l(\rho) - J_l(m\rho) J_l'(\rho)}{m J_l'(m\rho) H_l^{(2)}(\rho) - J_l(m\rho) H_l^{(2)'}(\rho)} \quad (4)$$

Формули для хвиль типу Н - мають структуру схожу з тими, що використовуються для інших хвиль, однак, замість коефіцієнтів b_l вони мають коефіцієнти a_l .

$$a_l = \frac{m J_l(m\rho) J_l'(\rho) - J_l'(m\rho) J_l(\rho)}{m J_l(m\rho) H_l^{(2)'}(\rho) - J_l'(m\rho) H_l^{(2)}(\rho)} \quad (5)$$

У цих формулах $J_l(z)$ - функції Бесселя, $H_l^{(2)}(z)$ - функції Ханкеля 2-го роду, штрих, що знаходиться над ім'ям функції, це похідна функції за всіма аргументами. Комплексний показник заломлення m представлений у вигляді різниці між n та уявною частиною, позначеною як ik . Індеси E та H відповідають двом типам поляризації хвилі: E -поляризація (вказує на паралельність електричного вектора хвилі до осі циліндра), тоді як H -поляризація описує паралельність магнітного вектора хвилі до осі циліндра, а електричний вектор перпендикулярний їй).

Комплексний показник заломлення металу $m = n - ik$ визначається за формулами електродинаміки, які справедливі для матеріалів, що добре проводять:

$$n = \kappa = \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\epsilon_0}} \quad (6)$$

де σ – питома провідність, ϵ_0 – діелектрична проникність вільного простору.

Фактор ефективності поглинання для металевих мікропроводів може досягати значень кілька сотень і тисяч. При деяких значеннях D/λ існує максимум поглинання. На рис. 2.1. показана залежність фактора ефективності

поглинання платиного мікродроту від його діаметра на різних довжинах хвиль.

Умова максимуму виглядає так [10]:

$$\frac{D}{\lambda_i} \approx 0.1$$

де λ_i - довжина хвилі в речовині дроту.

Ефект існує, коли електричний вектор падаючої хвилі паралельний осі волокна (E -хвиля). У випадку H -хвилі (магнітний вектор хвилі паралельний осі волокна) фактор ефективності поглинання дуже малий.

На Рис.2.1 показано, що поглинання може бути велике. Але діаметр дроту повинен бути дуже малий – одиниці та частки мікромметра. Це створює труднощі під час використання ефекту.

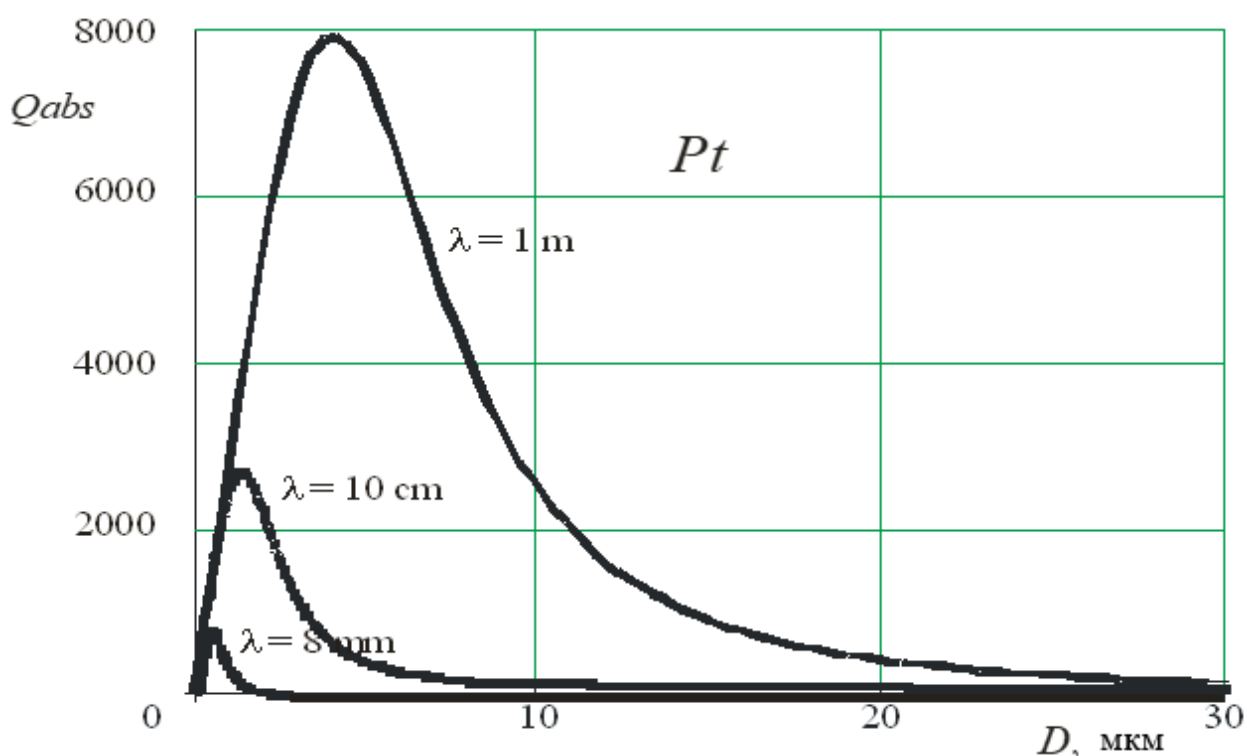


Рис. 2.1. Фактор ефективності поглинання платиного мікродроту

Більш зручно використовувати графітові волокна. На рисунку 2.2. показано залежність фактора ефективності поглинання в графітових волокнах від його діаметра на різних довжинах хвиль.

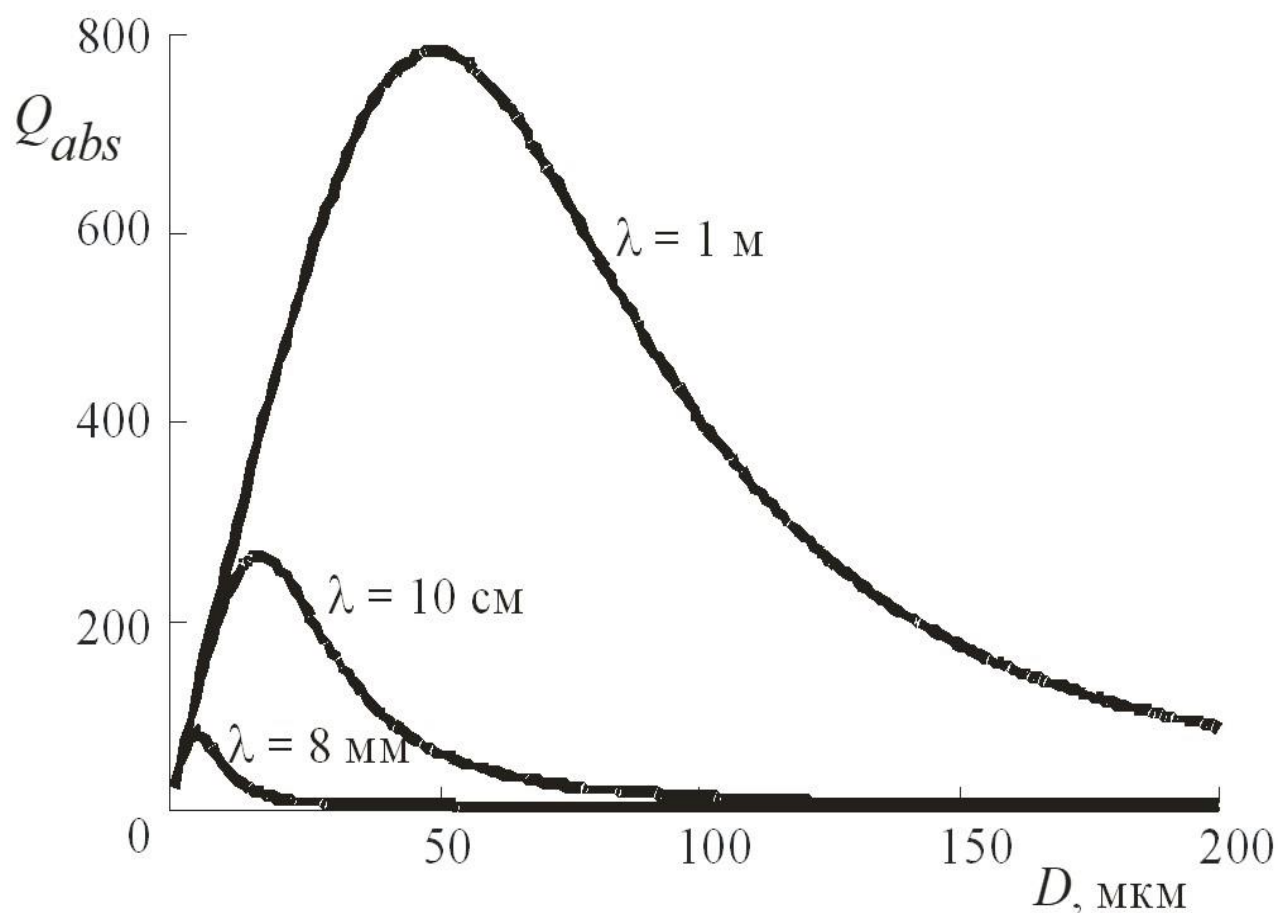


Рис. 2.2. Фактор ефективності поглинання платинового мікродроту

Провідність графіту значно менша, ніж у металів. Внаслідок цього положення максимуму графіка $Q_{abs}(D)$ зсувається у бік більших діаметрів. Величина максимуму зменшується, але все ж таки поглинання залишається великим.

Так, для графітового волокна при довжині хвилі 8 мм максимум поглинання знаходиться при 3.8 мкм, що значно більше, ніж для платини. Величина максимуму $Q_{abs} = 104$. Це велике значення. При довжині хвилі 10 см

максимум розташований на 12.4 мкм і дорівнює 346. При довжині хвилі 1 м максимум знаходиться на 38.2 мкм, його величина дорівнює 1040.

Це свідчить про доцільність використання графітового волокна в екранах для захисту людей та техніки від дії електромагнітного випромінювання у мікрохвильовому діапазоні.

Ще один фактор, що показує доцільність використання тонких провідних волокон у захисних екранах мікрохвильового діапазону, - рівномірною частотною характеристикою в широкому діапазоні частот.

На рис. 2.3. показано, як залежать фактори ефективності поглинання та розсіювання випромінювання графітовим волокном діаметром 12 мкм від частоти. При частотах до 0.4 ГГц поглинання майже однакове. Розсіювання тут мале. Далі починається зменшення поглинання та деяке збільшення розсіювання.

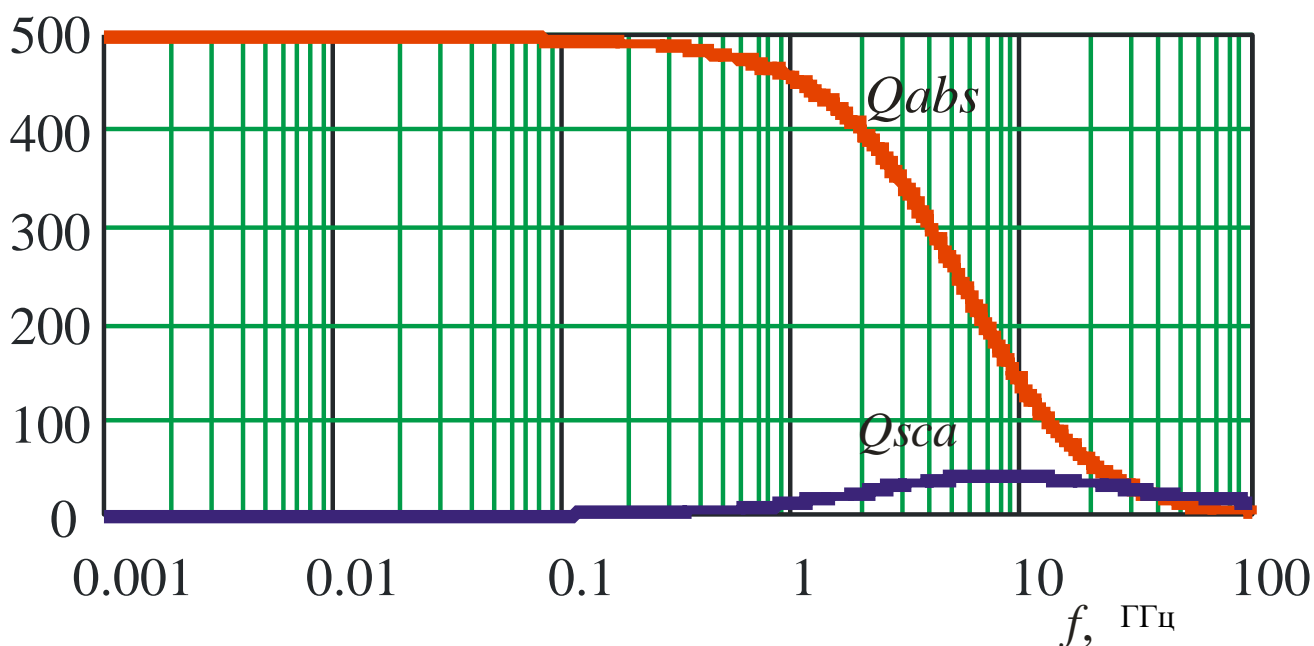


Рис. 2.3. Поглинання та розсіювання випромінювання графітовим волокном

На рис. 2.4. показано, як частотна характеристика поглинання залежить від товщини волокна. Видно, що товстіші волокна поглинають сильніше, але плоска ділянка характеристики у них менша, ніж у тонких волокон.

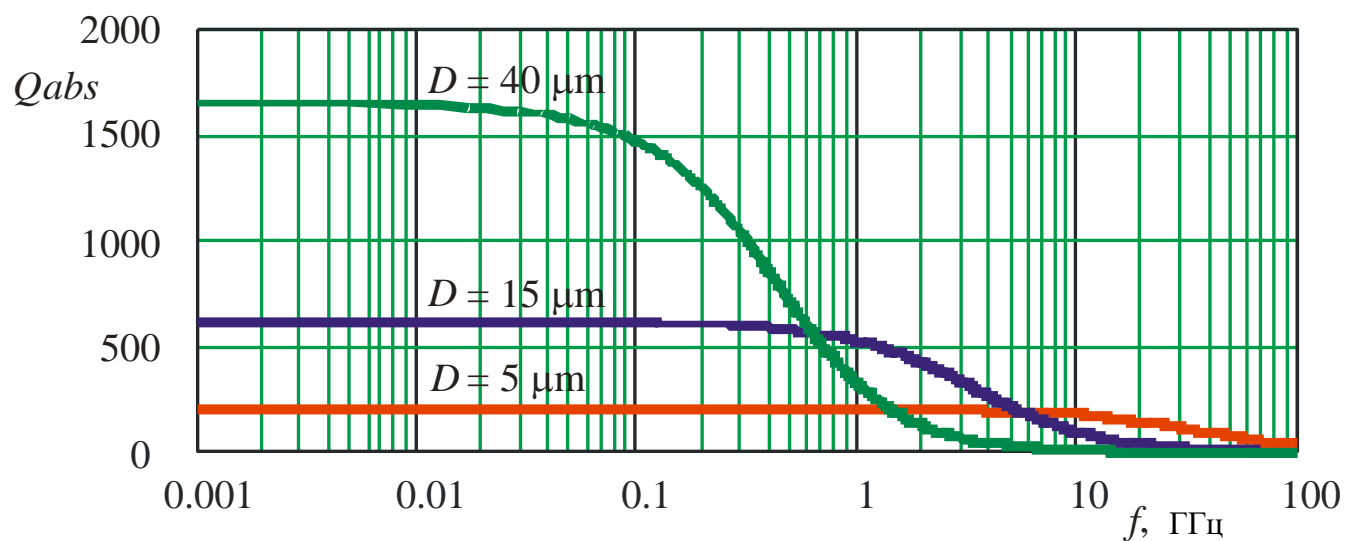


Рис. 2.4. Поглинання в графітових волокнах різної товщини

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТ

Досліджувалися три зразки екранів.

Їх фотографії показано на рис. 3.1.(а, б, в). Основа екрану – картон завтовшки 0.5 мм. На ньому хаотично розташовані відрізки волокна з графіту завтовшки 12-15 мкм і завдовжки від 1 до 5 мм. Їх концентрація найменша на екрані № 1 і найбільша на екрані № 3.

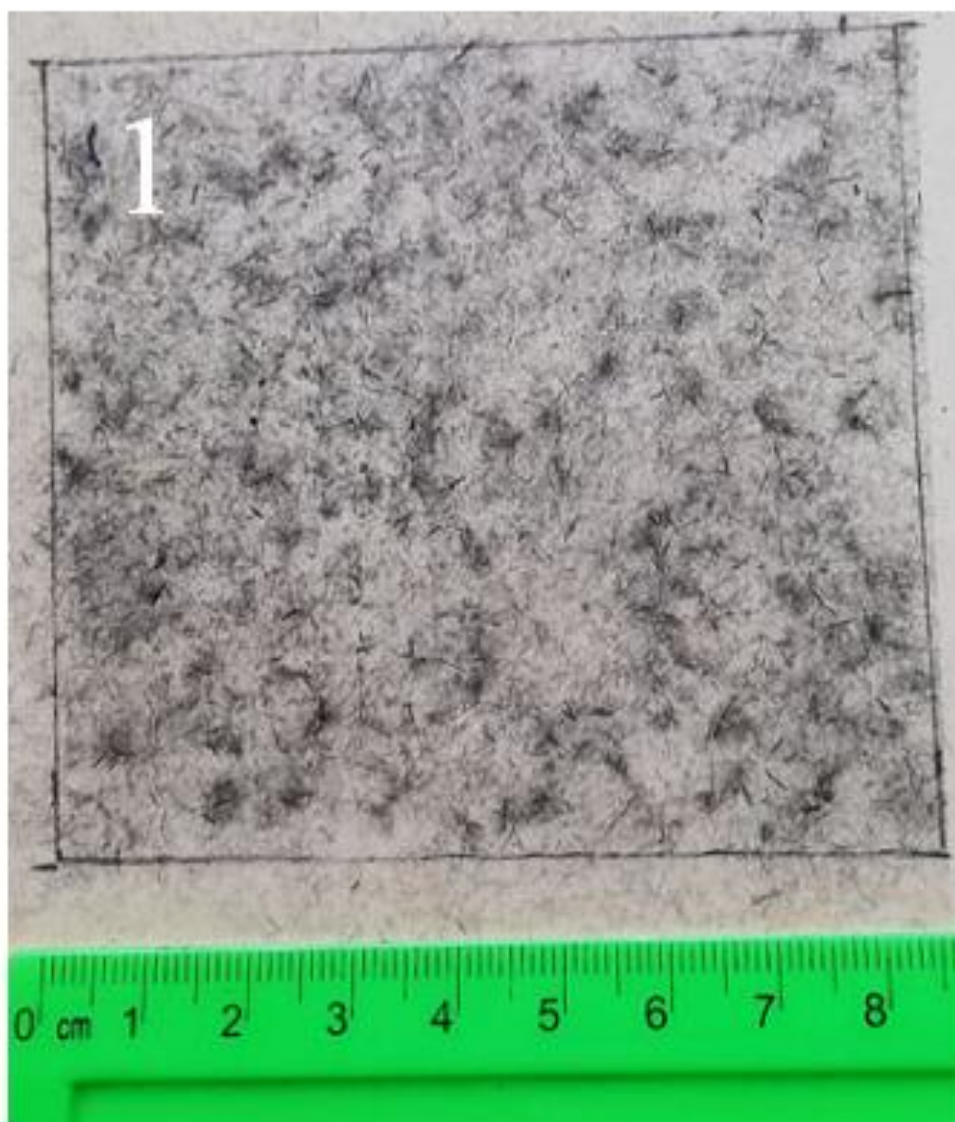


Рис.3.1. (а) – Захисний екран № 1

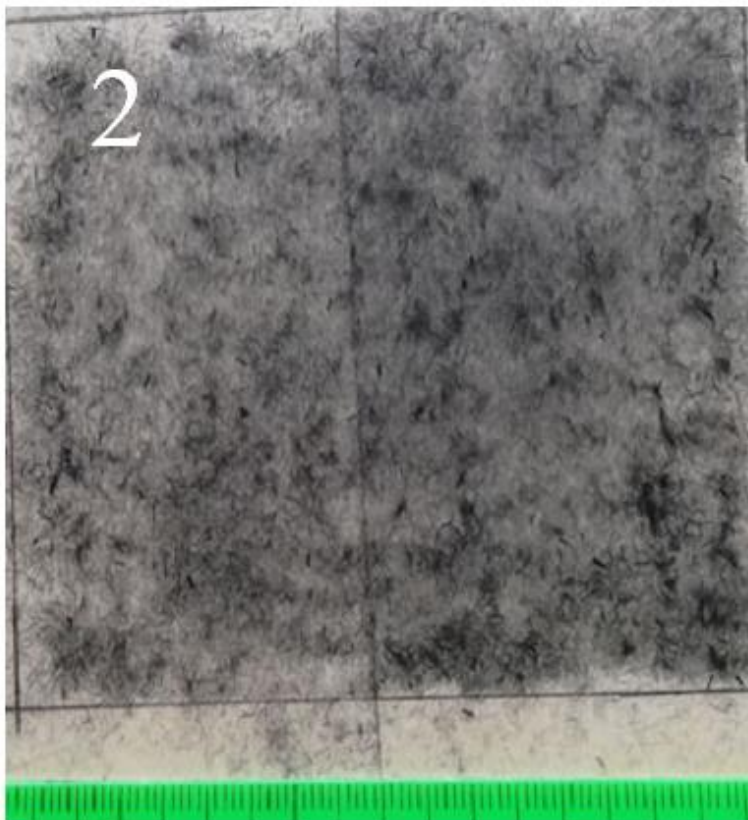


Рис. 3.1. (б) – Захисний екран № 2

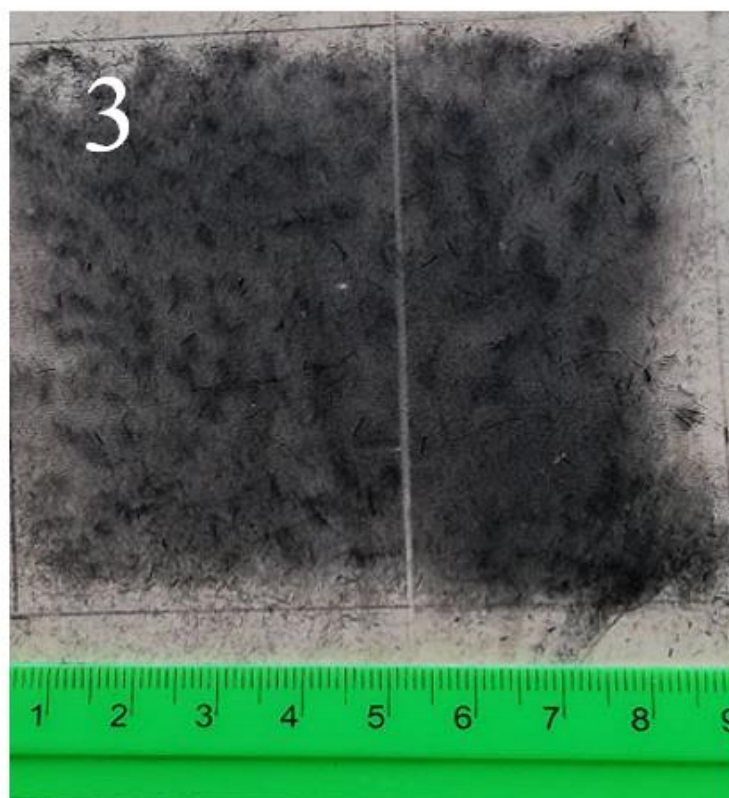


Рис.3.1 (в) – Захисний екран № 3

На рис. 3.2.(а, б, в) показані мікрофотографії екранів. На них розташована лінійка довжиною 1 мм (ціна одного поділу 10 мкм).

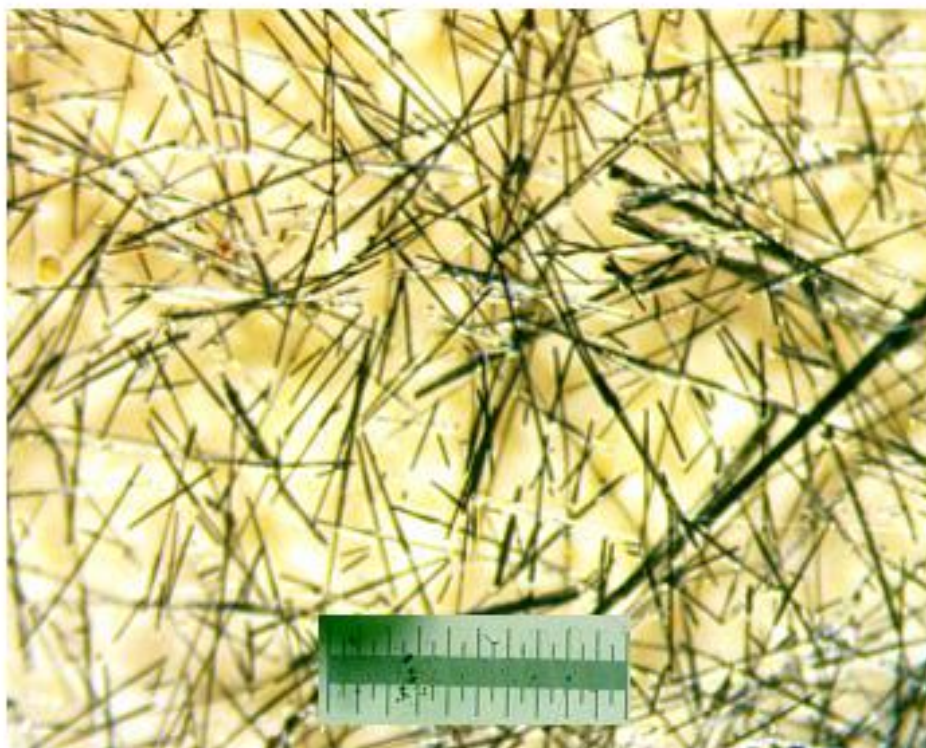


Рис. 3.2. (а) – Мікрофотографія захисного екрана № 1

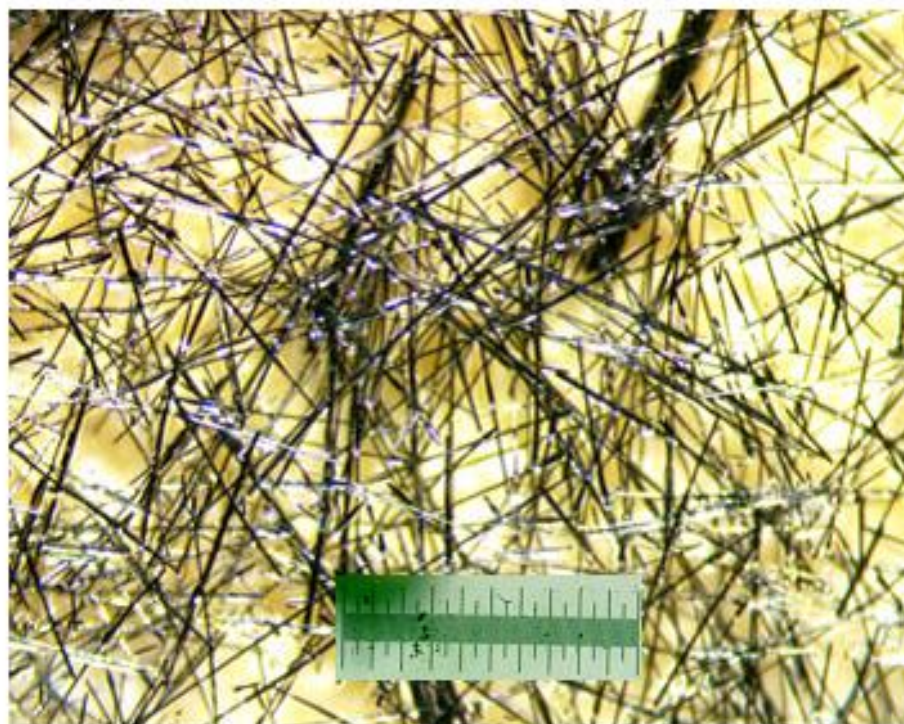


Рис. 3.2. (б) – Мікрофотографія захисного екрана № 2

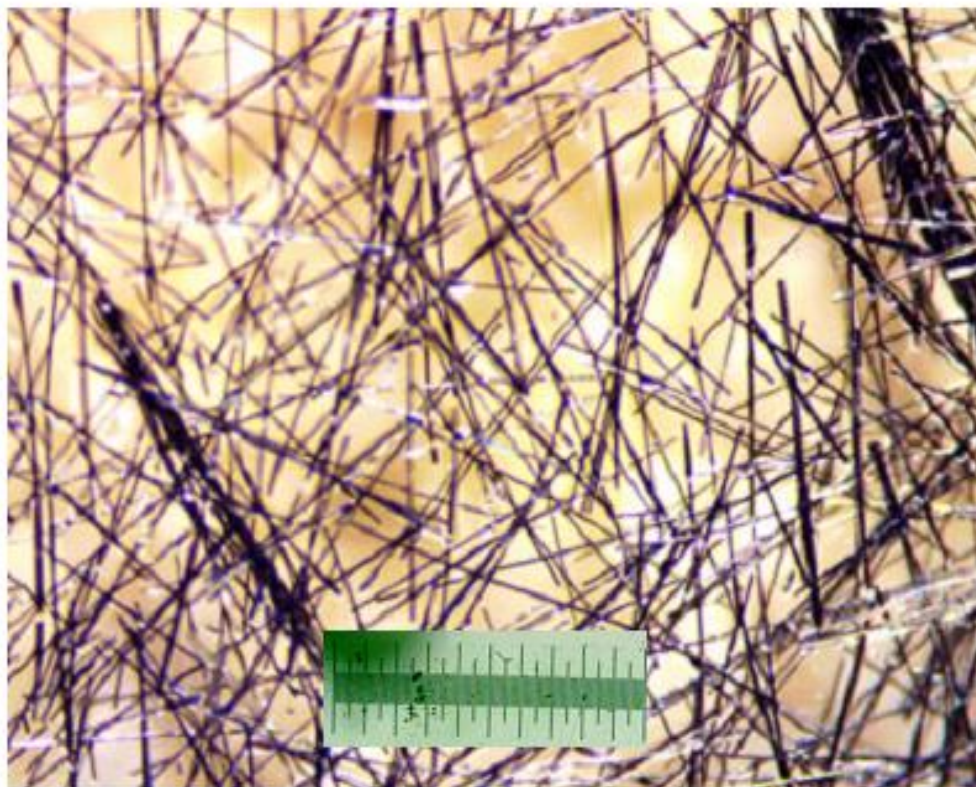


Рис. 3.2. (в) – Мікрофотографія захисного екрана № 3

Були проведені вимірювання таких характеристик захисних екранів:

- залежність пропускання від частоти;
- залежність відбиття від частоти;
- залежність пропускання від кута падіння хвилі на екран.

3.1. Вимірювання коефіцієнта пропускання

Блок-схема експериментальної установки для вимірювання коефіцієнта пропускання екрану показана на рис. 3.3. Генератор мікрохвильового випромінювання працює в діапазоні частот від 28 ГГц до 38 ГГц (довжина хвилі змінюється від 11 мм до 8 мм). Вихід генератора – хвилевід з розмірами поперечного перетину 7.2x3.4 мм з рупором 32x24 мм і довжиною 135 мм. Контроль потужності випромінювання здійснюється термопарним ватметром зі спрямованим відгалуджувачем. Для вимірювання потужності

випромінювання, яке вийшло з генератора, застосовується термопарний приймач. Відстань між передавальним і приймальним рупорами 160 мм.

Послідовність дій при вимірюваннях наступна:

1. Встановлюється необхідна частота випромінювання.
2. Вимірюються потужність випромінювання P_0 , яке попало в приймальний рупор при відсутності екрану.
3. Вимірюються потужність випромінювання P , яке попало в приймальний рупор при наявності екрану між рупорами. Екран встановлюється приблизно посередині. Це місце, де закінчується ближня зона ($z \approx \frac{d^2}{\lambda}$, d – характерний розмір розкриву передаючого рупора – 28 мм, λ – середня довжина хвилі робочого діапазону – 9.5 мм, $z = 82.5$ мм). В цьому місці інтенсивність випромінювання трохи змінюється при зміні частоти. Тому сигнал з приймача теж трохи змінюється, і на частотній характеристиці екрану з'являються осциляції.
4. Обчислюється коефіцієнт пропускання $T = \frac{P}{P_0}$.
5. Обчислюється ослаблення в децибелах $L = -\lg T$.
6. Встановлюється друга частота, і повторюються дії п. 2-5.

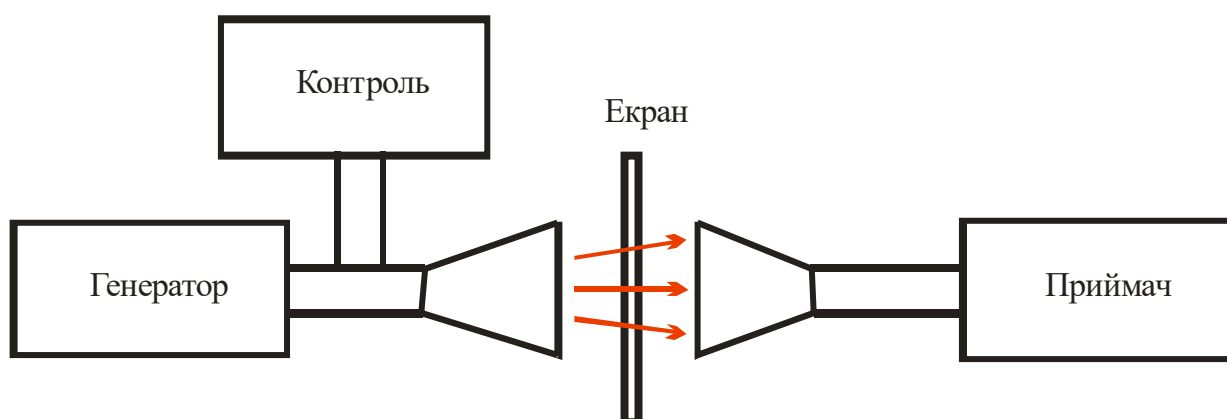


Рис. 3.3. Блок-схема експериментальної установки для вимірювання коефіцієнта пропускання екрану

На рис. 3.4. показані результати вимірювань:

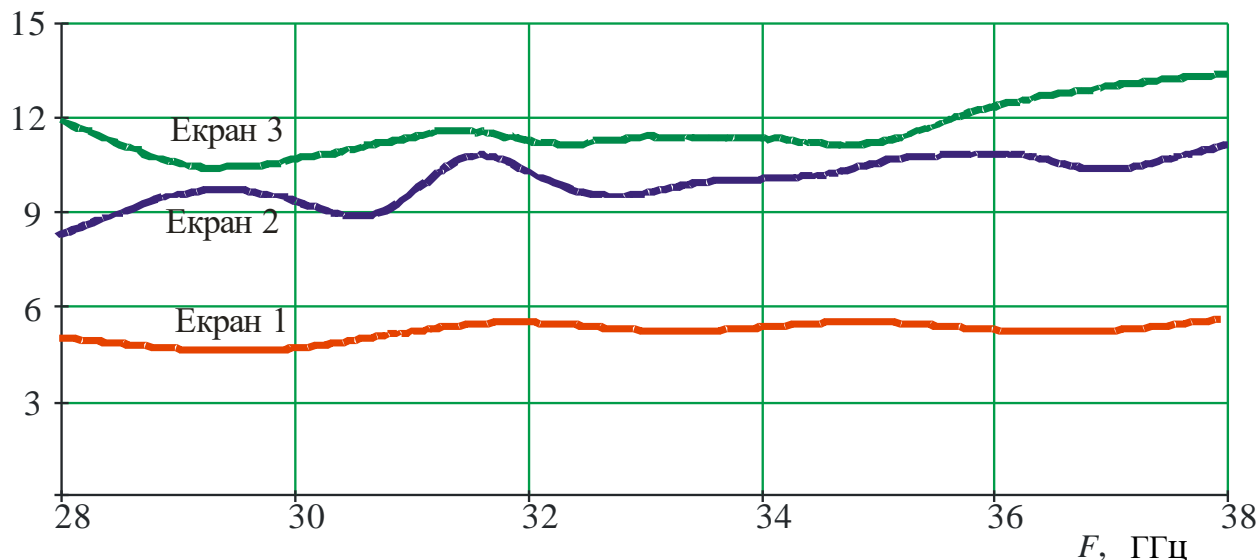


Рис. 3.4. Залежність пропускання екранів від частоти

Втрати енергії випромінювання в екрані 1 – близько 5 дБ, в екрані 2 – приблизно 10 дБ, в екрані 3 – 12 дБ.

Частотна характеристика в силу умов експерименту не така рівномірна, як на теоретичних графіках на див. Рис. 2.3. і 2.4., але значно рівномірніша, ніж на див. Рис. 1.1. - 1.3. для екранів, які розглянуті в огляді.

Так що узгодження між теорією, яка наведена в розділі 2 і експериментом у розділі 3 - цілком задовільне.

3.2. Вимірювання коефіцієнта відбиття

Блок-схема експериментальної установки для вимірювання коефіцієнта відбиття екрану показана на Рис. 3.5. Вона відрізняється від блок-схеми на див. Рис. 3.3. тим, що генератор і приймач випромінювання знаходяться по одну сторону від екрану, який тестується.

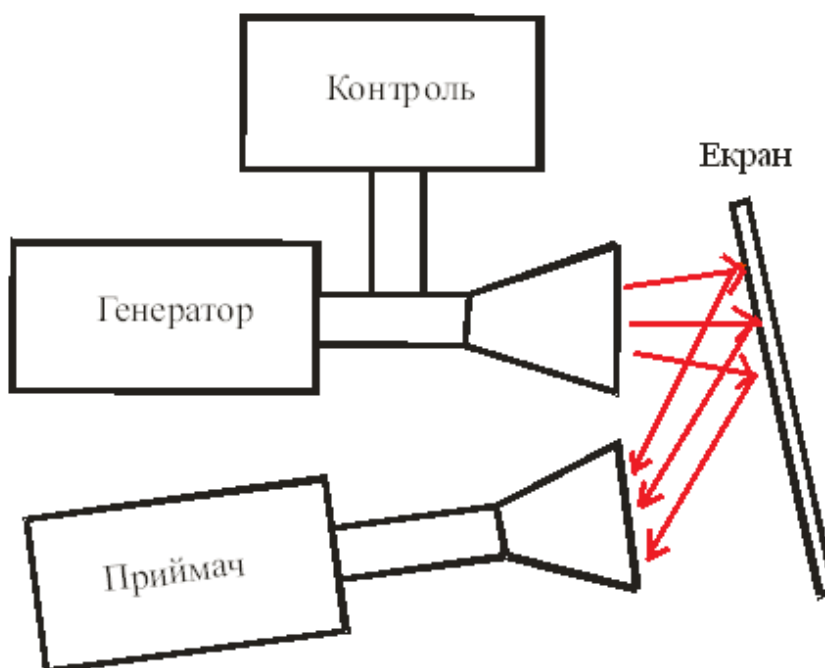


Рис. 3.5. Блок-схема експериментальної установки для вимірювання коефіцієнта відбиття екрану

Кут падіння випромінювання на екран складає декілька градусів, тому можна вважати, що випромінювання падає на екран нормально до його поверхні.

Послідовність дій при вимірюваннях наступна:

1. Встановлюється необхідна частота випромінювання.
2. На місці екрану розміщується металева пластина. Коефіцієнт відбиття металу в мікрохвильовому діапазоні дуже близький до 1.
3. Вимірюється потужність випромінювання P_0 , яке попало в приймальний рупор при відбитті від металевої пластини.
4. На місці металевої пластини розміщується екран.
5. Вимірюється потужність випромінювання P , яке попало в приймальний рупор при відбитті від екрану.

6. Обчислюється коефіцієнт відбиття $R = \frac{P}{P_0}$.

7. Встановлюється друга частота, і повторюються дії п. 2-5.

На рисунку 3.6. показано залежність коефіцієнтів відбиття від частоти:

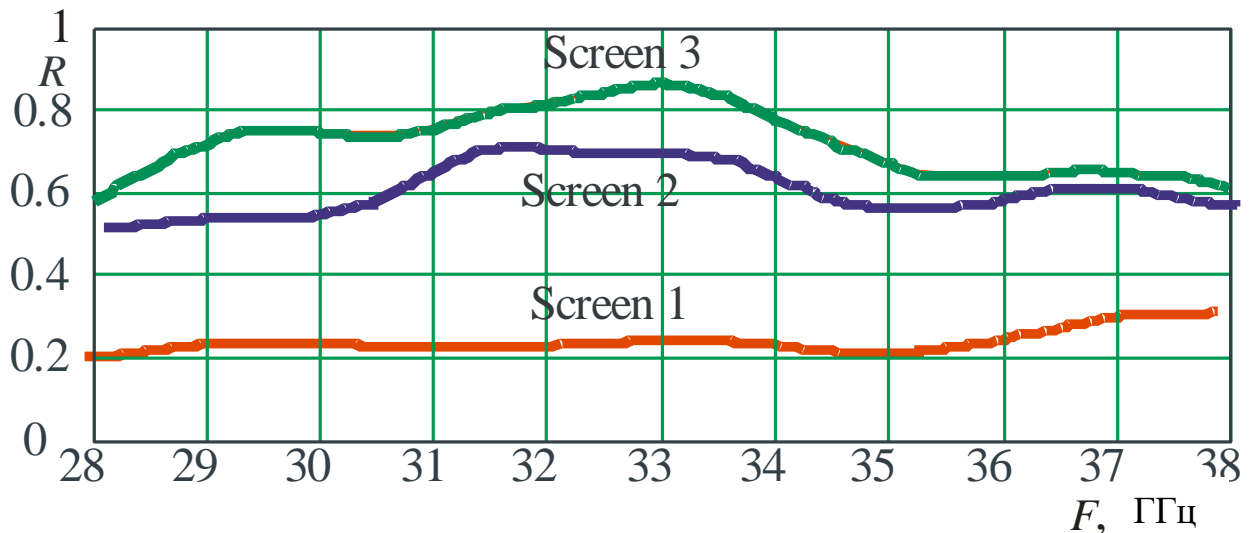


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнтів відбиття від частоти

3.3. Вимірювання залежності пропускання від кута падіння випромінювання

Блок-схема експериментальної установки для вимірювання залежності пропускання екрану від кута падіння випромінювання показана на Рис. 3.7. Вона відрізняється від блок-схеми на див. Рис. 3.3. тим, що екран може повертатися навколо вертикальної осі, так що кут падіння випромінювання на нього може змінюватись від 0° до 50° .

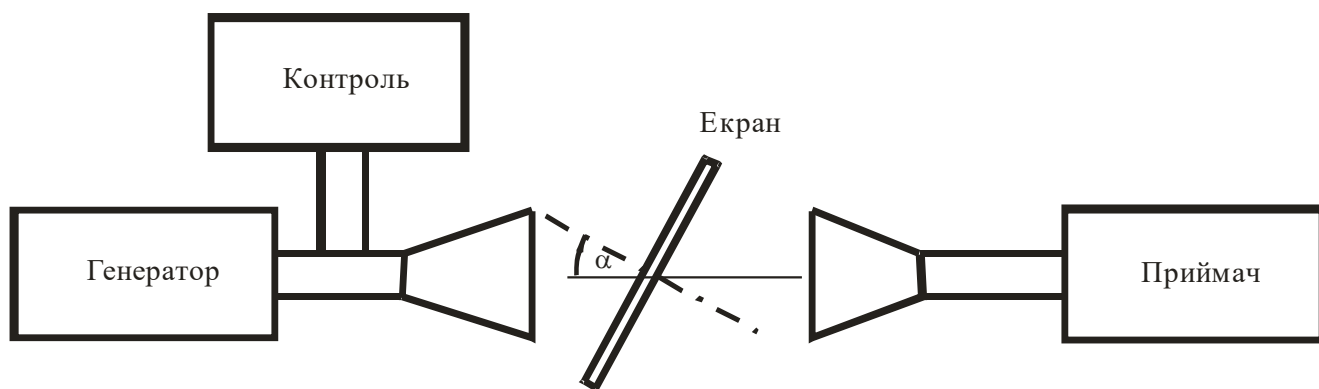


Рис. 3.7. Блок-схема експериментальної установки для вимірювання залежності пропускання екрана від кута падіння випромінювання

Послідовність вимірювань така ж, як і в п. 3.1. Вимірювання проводились на частоті 35 ГГц. На рис. 3.8. показана залежність ослаблення екраном випромінювання L (в децибелах) від кута падіння α (в градусах) на площину екрана 2. Для інших екранів залежність подібна. Ослаблення дещо збільшується зі збільшенням кута падіння. Видно, що ослаблення мало залежить від кута падіння. Це добре, тому що в реальних умовах випромінювання може падати на об'єкт, який захищається екраном, з різних сторін.

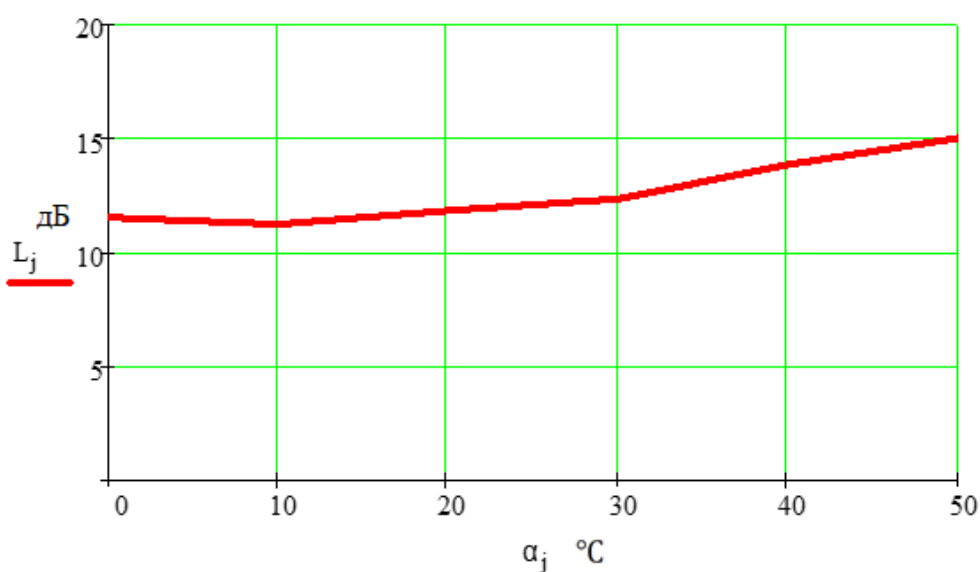


Рис. 3.8. Залежність ослаблення екраном випромінювання від кута падіння випромінювання на екран

Фото експериментальної установки показано на рис. 3.9.:



Рис. 3.9. Експериментальна установка

1 – генератор, 2 – хвилевід, 3 – екран, 4 – приймач, 5 – індикатор, котрий показує потужність, яка пройшла, 6 – індикатор, котрий показує падаючу потужність.

ВИСНОВКИ

1. В тонких провідникових волокнах, таких як металеві, напівпровідникові та графітові, спостерігається явище сильного поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання.

Це обумовлено властивостями провідності та внутрішньої будови таких матеріалів. У металевих волокнах висока провідність призводить до того, що електромагнітні хвилі зустрічають великий опір в матеріалі, що призводить до сильного поглинання енергії і подальшого перетворення її у тепло. Напівпровідникові та графітові волокна, хоча і мають меншу провідність порівняно з металами, також виявляють високу здатність поглинати та розсіювати електромагнітне випромінювання через внутрішні механізми взаємодії електромагнітних полів зі структурою їхньої будови.

Це явище має певні наслідки, такі як втрати сигналу у тонких провідникових структурах, зміни в електричних та магнітних властивостях матеріалів, а також вплив на електромагнітну сумісність у високочастотних пристроях та електронних системах.

2. Такий ефект поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання тонкими провідниковими матеріалами може бути використаний у створенні захисних екранів для захисту людей і техніки від шкідливого впливу мікрохвильового випромінювання.

Ці захисні екрани можуть бути розроблені з матеріалів, які мають властивості сильного поглинання мікрохвильових хвиль. Провідні матеріали, такі як метали або спеціально створені напівпровідникові композити, здатні відбивати або поглинати електромагнітне випромінювання у мікрохвильовому діапазоні. Це дозволяє створити бар'єр, який може зменшити або вберегти від проникнення шкідливих

мікрохвильових сигналів у приміщення, електроніку, або навіть забезпечити захист від радіації для людей.

Це має важливе значення у сучасному світі, де використання бездротових технологій, мобільних зв'язків та інших пристроїв, що випромінюють у мікрохвильовому діапазоні, постійно зростає. Захисні екрани можуть слугувати як ефективний спосіб захисту від шкідливого впливу цього виду електромагнітного випромінювання на здоров'я людей та електронічні пристрої.

3. Захисні екрани, що використовують властивості поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання, мають значну перевагу у тому, що їхні характеристики (поглинання та розсіювання) залишаються стабільними та однорідними у великому діапазоні частот.

Ця рівномірність характеристик екранів стає ключовим аспектом, оскільки вони забезпечують ефективний захист від електромагнітного випромінювання на різних частотах. Причиною цього є специфічні властивості матеріалів, які використовуються у конструкції екранів.

Зазвичай, такі матеріали мають однорідність у властивостях поглинання та розсіювання для широкого спектру частот, що відповідає вимогам різних застосувань. Це робить ці екрани універсальними і ефективними для захисту від різних видів електромагнітних сигналів у широкому частотному діапазоні.

Ця рівномірність характеристик екранів важлива у багатьох сферах, включаючи технології зв'язку, медичні пристрої, аерокосмічні системи та в електронних пристроях загалом, де захист від різноманітних електромагнітних сигналів є критичним.

4. Вимірювання характеристик екранів у діапазоні частот від 28 до 38 ГГц демонструє відповідність між експериментальними даними та результатами теоретичних розрахунків.

Цей діапазон частот відноситься до міліметрового діапазону хвиль, який є ключовим для різних застосувань, зокрема у сучасних бездротових мережах, супутниковій зв'язку та інших високочастотних технологіях. Вимірювання у цьому діапазоні є важливим для підтвердження ефективності захисних екранів саме у контексті їхньої роботи з високочастотним випромінюванням.

Підтвердження теоретичних розрахунків експериментальними даними у цьому діапазоні дозволяє підтвердити правильність моделей та методів розрахунків, які використовувалися для передбачення поведінки захисних екранів. Це підкреслює ефективність цих екранів у функціонуванні на високих частотах та доводить їхню здатність надійно захищати від електромагнітного випромінювання у відповідному діапазоні частот.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Р.К. Абасов. Застосування вуглецевих матеріалів в екрануванні електромагнітних полів. Політехнічний молодіжний журнал. 2016, № 5, С. 1-7.
2. Х.А.Э. Айад, Е.С. Білоусова, Т.А. Пулко. Вплив складу композиційних покриттів на основі порошкоподібного деревного вугілля на екранування електромагнітних випромінювань. Доповіді БДУІР. 2016, № 3(97), С. 88-94.
3. О.В. Панова, Г.Ю. Краснянський, І.О. Азнаурян. Розрахунок ефективності електромагнітного екранування композиційними матеріалами з електропровідними немагнітними добавками. Управління розвитком складних систем. Київ, 2021, № 48, С. 152-159.
4. Wu et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of composite carbon nanotube macro-film at a high frequency range of 40 to 60 GHz. AIP Advances 5, 067130 (2015).
5. Glyva V., Kasatkina N., Nazarenko V. et al. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, Vol. 2, No. 12(104), 40-47.
6. Kuzmichev, V. M., Kokodii, N. G., Safronov, B. V., Balkashin, V. P.: Values of the absorption efficiency factor of a thin metal cylinder in the microwave band. Journal of Communications Technology and Electronics. Vol. 48, No. 11, 1240–1242 (2003).
7. Kokodiy N.G. Absorbing of microwave radiation by very thing double-cylinder. Journal of Communications Technology and Electronics. Vol. 51, No. 2, 1-4 (2006).
8. M. Kerker. The scattering of light and other electromagnetic radiation. N.Y.: Academic Press, 1969. - 666 p.

9. H.C. van de Hulst. Light scattering by small particles. NY, Wiley, 1957
Dover, 1981. – 536 p.
10. C.F. Bohren, D.R. Huffman. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons, N.Y.: Toronto, Singapore, 1984. - 664 p.
11. M.G. Kokodii, A.O. Natarova, A.V. Genzarovskiy, I.A. Priz. Interaction between thin conductive fibers and microwave radiation. *Optical and Quantum Electronics* (2023) 55:256.
12. *Engineering Electromagnetic Fields and Waves* 2nd Edition by Carl T. A. Johnk
13. *Microwave Engineering* 4th Edition by David M. Pozar
14. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Clayton R. Paul
15. Feng X., Liao G., Du J. Electrical conductivity and microwave absorbing properties of nickel-coated multiwalled carbon nanotubes/poly(phthalazinone ether sulfone ketones) composites. *Polym Eng Sci.* 2008. Vol. 48, No 5.
16. Fan Z. J., Luo G. H., Zhang Z. F. Electromagnetic and microwave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes/polymer composites. *Mater Sci Eng.* 2006. Vol. 132.
17. Kaynak A., Polat A., Yilmazer U. Some microwave and mechanical properties of carbon fiber/polypropylene and carbon black-polypropylene composites. *Mater Res Bull.* 1996. Vol. 31, No 10.
18. Kanyak A., Unsworth J., Clout R. Study of microwave transmission, reflection, absorption, and shielding effectiveness of conducting polypyrrole films. *J Appl Polym Sci.* 1994. Vol. 54, No 3. P.269-278.
19. Naishadham K., Kadaba P. K. Measurement of the microwave conductivity of a polymeric material with potential applications in absorbers and shielding.
20. Pozar D. M. *Microwave engineering.* University of Massachusetts at Amherst. Hoboken : John Wiley & Sons, 2005.
21. Tantawy F. E., Ghamdi A. A., Heniti S., Aal N. A. A novel conducting nanocomposites containing phenolic resin/carbon nanoparticles for

electromagnetic wave shielding effectiveness at microwave frequency. Int. J. Nanomanuf. 2009. Vol. 4, P. 51-59