

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

Бакалавр

Освітній рівень

на тему: **ПРОЦЕС ВИСОКОЧАСТОТНОГО РОЗПИЛЕННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТОНКОДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва спеціальності

КПТР.021029.01.08 ПЗ

Виконав:

студент 3 курсу, група ТР2с-21-1


підпис

В.В. Лісовий

Ініціали, прізвище

Керівник: к.т.н., доцент


підпис

В.В. МІШАН

Ініціали, прізвище

Нормоконтроль


підпис

О.С. Пивовар

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТМІТ
д-р техн. наук, проф.


підпис

С.К. ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«14» 06 2024р.

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма Телекомунікації, медійні та інтелектуальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТМІТ


Підпис, дата

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

Лісовому Володимиру Володимировичу

1 Тема проекту: Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів

керівник проекту Мішан Віктор Володимирович, к.т.н, доцент

Затверджено наказом по університету від «15» 02. 2024р. № 8

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 20.05.2024р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Розробити проект високочастотного розпилювача.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1) Поверхневі покриття та методи їх нанесення 2) Розробка та аналіз методу багатоступеневого розпилення в ультразвуковому полі 3) Блок живлення для пристрою.

5 Перелік графічного матеріалу. 1) Схема електрична принципова. 2) Схема електрична функціональна.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7 Дата видачі завдання 15.02.2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Поверхневі покриття та методи їх нанесення	20.03.24	Вик.
2	Розробка та аналіз методу багатоступеневого розпилення в ультразвуковому полі	15.04.24	Вик.
3	Блок живлення для пристрою	30.04.24	Вик.
4	Висновки. Презентаційні матеріали за результатами виконання дипломної роботи	20.05.2024	Вик.

Здобувач



підпис

В.В. Лісовий

Ініціали, прізвище

Керіник проєкту



підпис

В.В. Мішан

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проєкту: «Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів»

Автор роботи: Лісовий Володимир Володимирович

Керівник роботи: к.т.н., доцент Мішан Віктор Володимирович

Пояснювальна записка: 67 сторінок, 13 рисунків, 4 таблиці, 16 джерел, 2 додатки.

Ключові слова: розпилення рідини; ультразвуковий; краплинна дисперсія; обприскування; випромінювач; деформація краплі; краплинна дисперсія; багатоступеневе розпилення

Метою кваліфікаційного проєкту є: дослідити та виявити ключові відмінності високочастотного наплення серед інших вакуумних методів.

Розпилення різних рідин широко використовується в різних технологічних процесах. Для більшості з них важлива висока здатність до диспергування та вузький розподіл крапель за розміром. Досягти цих параметрів дозволяє ультразвукове наплення. Однак чим вище дисперсність крапель, отриманих ультразвуковим розпиленням, тим нижча продуктивність розпилення.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод багатоступінчастого наплення. Для експериментального визначення можливостей даної методики був розроблений трубчастий емітер у формі циліндра зі ступінчасто-змінним перерізом.

Ефективність запропонованої та розробленої методики придатна для генерації крапель розміром менше 40μм, з продуктивністю, щонайменше в 10 разів перевищує відомі технології ультразвукового розпилення, було підтверджено в ході проведених досліджень.

В.В. Мішан
(Ініціали, прізвище здобувача)

13.06.24.
(Підпис, дата)

ANNOTATION

Topic of the Qualification Project: "High-Frequency Spraying Process for the Production of Fine-Dispersed Materials"

Author: Volodymyr Volodymyrovych Lisovyi

Supervisor: Ph.D., Associate Professor Viktor Volodymyrovych Mishan

Explanatory Note: 67 pages, 13 figures, 4 tables, 16 sources, 2 appendices.

Keywords: liquid spraying; ultrasonic; droplet dispersion; spraying; emitter; droplet deformation; droplet dispersion; multi-stage spraying

Objective of the Qualification Project: To study and identify the key differences of high-frequency spraying compared to other vacuum methods.

The spraying of various liquids is widely used in different technological processes. For most of these processes, high dispersibility and a narrow size distribution of droplets are important. Ultrasonic spraying allows achieving these parameters. However, the higher the dispersibility of the droplets obtained by ultrasonic spraying, the lower the spraying productivity.

To address this issue, a multi-stage spraying method has been proposed. To experimentally determine the capabilities of this method, a tubular emitter in the form of a cylinder with a stepwise varying cross-section was developed.

The efficiency of the proposed and developed method, suitable for generating droplets smaller than $40\mu\text{m}$ with productivity at least 10 times higher than known ultrasonic spraying technologies, was confirmed during the conducted research.

B.B. Lisovyi

(Initials and surname of the applicant)

[Signature] 13.06.24

(Signature date)

№ реєстрації	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	№ серії	Примітка
			Текстові документи			
1		КПТР 021029.01.08 ГЗ	Пояснювальна записка	67		
			Графічні матеріали			
2		КПТР 021029.01.08 БЗ	Електрично-принципова схема лабораторного блоку живлення	1		
			Функціональна схема лабораторного блоку живлення			
3		КПТР 021029.01.08 Б2	Функціональна схема лабораторного блоку живлення	1		

КПТР 021029.01.08 ВП								
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Літера		Аркуш	Аркушів
Розробив		Лісовий В.В.		10.06.24	Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів Відомість проекту		1	1
Перевір.		Мішан В.В.		3.06.24				
Н. контр.				5.06.24				
Затв.		Підченко С.К.		8.06.24				
					ХНУ, ТР2с-21-1			

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ПОВЕРХНЕВІ ПОКРИТТЯ ТА МЕТОДИ ЇХ НАНЕСЕННЯ.....	8
1.1 Характеристики поверхневих покриттів.....	8
1.2 Підготовка поверхонь.....	22
1.3 Методи нанесення поверхневих покриттів.....	28
1.4 Вакуумне напылення в радіотехніці.....	32
1.5 Не вакуумне нанесення покриттів.....	34
2. РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ МЕТОДУ БАГАТОСТУПЕНЕВОГО РОЗПИЛЕННЯ РІДИН В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОЛІ.....	37
2.1 Короткий опис методу.....	37
2.2 Метод багатоступеневого ультразвукового напылення.....	39
2.3 Ультразвуковий випромінювач.....	43
2.4 Динаміка розпаду краплі.....	49
2.5 Дисперсійні характеристики утворених крапель.....	52
2.6 Залежність діаметра краплі від швидкості розпилення.....	54
2.7 Залежність від в'язкості рідини.....	56
3. БЛОК ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АПАРАТУ РОЗПИЛЕННЯ РІДИН.....	58
3.1 Опис та принцип роботи лабораторного блоку живлення.....	58
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	66

КПТР.021029.01.08 ПЗ								
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата	Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів	Літера	Аркуш	Аркуші
Виконав		Лісовий В.В.		13.06.14		у		
Перевір.		Мішан В.В.		15.06.14			6	67
Т. Контр.						ТР2с-21-1, ФІТ. ХНУ		
Н. контр.		Стецюк В.І.		15.08				
Затвер.		Підченко С.К.		15.06				

ВСТУП

Багатьом відомо що, зараз всюди застосовують різні покриття на поверхні, пояснення цьому є безліч, від банального естетичної краси до захисних функцій. Для нанесення цих матеріалів використовують різні методи.

Однак, не менш важливими поверхневі покриття є для електроніки. В цій галузі вони застосовуються для формування різноманітних деталей, мікросхем та мікробірок. Їх застосування не нове для промисловості, але зараз постає питання використовувати найефективніший метод, який би міг використовуватись для різних матеріалів, мав високу продуктивність та чистоту кінцевого продукту. Таким методом являється високочастотне напилення. Через те що, це метод дає змогу наносити покриття, як металів та і діелектриків (це є одним з вирішальних факторів). А при високочастотному напиленні цей позитивний момент можна покращити зміною швидкості напилення. Через те що в камерах для такого нанесення тиск, ще нижчий, то й швидкість осідання розпорошеного матеріалу буде кращою.

Тому виходячи з цього можна сказати, що дослідження даного методу є актуальним. Попри те, що метод не новий, знаючи його характеристики та природу дії, можна покращити та сформувавши картину можливої автоматизації даного процесу .

					КПТР.021029.01.08 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		7

1. ПОВЕРХНЕВІ ПОКРИТТЯ ТА МЕТОДИ ЇХ НАНЕСЕННЯ

1.1 Характеристики поверхневих покриттів

Поверхневі покриття в радіотехніці виконують різноманітні функції, зокрема захист від корозії, поліпшення електромагнітних властивостей, підвищення механічної міцності та забезпечення електричної ізоляції. Існує кілька основних видів поверхневих покриттів, які використовуються залежно від специфічних вимог та умов експлуатації радіоелектронних пристроїв.

Металеві покриття в радіотехніці відіграють ключову роль, оскільки вони забезпечують низку важливих функцій, таких як захист від корозії, поліпшення електропровідності, зниження втрат сигналу і підвищення механічної міцності компонентів. Детально розглянемо найбільш поширені типи металевих покриттів, що використовуються в радіотехнічних пристроях.

Розглянемо мідні покриття. Мідь є одним з найпоширеніших металів, що використовуються для покриття радіотехнічних компонентів завдяки своїм високим електропровідним властивостям і відносній дешевизні. Мідні покриття зазвичай наносяться на друковані плати (PCB), де вони утворюють провідні доріжки, які з'єднують різні електронні компоненти.

Мідь легко обробляється, що дозволяє створювати покриття з високою точністю і однорідністю. Крім того, мідь має хорошу адгезію до багатьох матеріалів, включаючи полімерні підкладки, що робить її ідеальним вибором для багатошарових плат і інших складних конструкцій.

Далі срібні покриття. Срібло має найвищу електропровідність серед усіх металів, що робить його ідеальним матеріалом для використання в високочастотних радіотехнічних пристроях, де мінімальні втрати сигналу мають критичне значення. Срібні покриття часто використовуються в мікрохвильових технологіях, антенах, роз'ємах і інших компонентах, де потрібна максимальна ефективність передачі сигналу.

Крім високої провідності, срібло також відрізняється високою корозійною стійкістю, що забезпечує довговічність покриттів у різних умовах експлуатації. Проте вартість срібла є значно вищою порівняно з іншими металами, що обмежує його використання переважно в критично важливих застосуваннях.

Перейдемо до золотого покриття. Золото є іншим металом з високою електропровідністю і відмінною корозійною стійкістю. Основною перевагою золотих покриттів є їх стійкість до окислення і агресивних середовищ, що забезпечує стабільність електричних характеристик протягом тривалого часу.

Золоті покриття часто використовуються для контактів, роз'ємів і інших критичних з'єднань, де важлива надійність і стабільність роботи. Золото не окислюється, що дозволяє підтримувати низький опір контактів навіть після тривалого періоду експлуатації. Проте висока вартість золота обмежує його застосування тільки там, де інші матеріали не можуть забезпечити необхідну якість.

Наступними є нікелеві покриття. Нікель забезпечує добру корозійну стійкість і механічну міцність, що робить його популярним вибором для гальванічних покриттів. Нікелеві покриття часто використовуються як проміжний шар між підкладкою та іншим покриттям, наприклад, золотом або сріблом. Це покращує адгезію основного покриття і забезпечує додатковий захист від корозії.

Нікель також може використовуватися самостійно для захисту компонентів, які піддаються високим механічним навантаженням або агресивним середовищам. Він має високу твердість і стійкість до зносу, що робить його ідеальним для використання в умовах, де компоненти піддаються інтенсивним механічним впливам.

Також є хромові покриття. Вони відрізняються високою твердістю і зносостійкістю, що робить їх ідеальними для використання в умовах високих механічних навантажень. Хромування забезпечує міцне і стійке до абразивного зносу покриття, яке може використовуватися в різних радіотехнічних

пристроях, зокрема в контактах і роз'ємах, які часто піддаються зносу при з'єднанні та роз'єднанні.

Хром також забезпечує високу корозійну стійкість, що робить його ідеальним для використання в агресивних середовищах. Хромові покриття можуть застосовуватися як самостійно, так і в поєднанні з іншими металами для покращення їх властивостей.

Перейдемо до комбінованих металевих покриттів. Комбіновані покриття поєднують властивості кількох металів, що дозволяє створювати багатошарові структури з оптимальними характеристиками. Наприклад, часто використовується комбінація нікелю і золота, де нікель забезпечує адгезію і корозійну стійкість, а золото – стабільність електричних характеристик.

Такі багатошарові покриття дозволяють досягти високої ефективності і надійності радіотехнічних компонентів, забезпечуючи комплексний захист і покращення їх електромагнітних характеристик. Комбіновані покриття використовуються в критично важливих застосуваннях, де важливий кожен аспект функціональності і надійності.

Діелектричні покриття відіграють важливу роль в радіотехніці, забезпечуючи електричну ізоляцію, захист від зовнішніх впливів і підвищення механічної міцності компонентів. Ці покриття допомагають запобігати коротким замиканням, знижують електромагнітні завади і покращують загальну надійність радіоелектронних пристроїв. Детально розглянемо основні типи діелектричних покриттів і їх властивості.

На черзі оксидні покриття. Оксидні покриття, такі як оксид кремнію (SiO_2) та оксид алюмінію (Al_2O_3), широко використовуються в мікроелектроніці та радіотехніці завдяки їх високій діелектричній постійній, термічній стабільності та хімічній стійкості.

Оксид кремнію (SiO_2) застосовується для створення ізоляційних шарів в інтегральних схемах та друкованих платах. Він забезпечує чудову електричну ізоляцію і захист від зовнішніх впливів. SiO_2 має високу термічну стійкість і

витримує високу температуру обробки, що робить його ідеальним для застосування в умовах високих температур.

Оксид алюмінію (Al_2O_3) використовується як діелектричне покриття завдяки своїй високій твердості, стійкості до зносу і корозійній стійкості. Al_2O_3 часто застосовується в конденсаторах і інших електронних компонентах, де потрібна висока електрична ізоляція і термічна стабільність.

Полімерні покриття, такі як поліімід, політетрафторетилен (PTFE), епоксидні смоли та поліуретан, широко використовуються в радіотехніці для захисту друкованих плат та інших електронних компонентів від вологи, хімічних реагентів та механічних пошкоджень.

Поліімід має відмінну термічну стабільність і може витримувати екстремальні температури, що робить його ідеальним для використання в авіаційній і космічній техніці. Поліімідні покриття забезпечують високу гнучкість і механічну міцність, що дозволяє використовувати їх в гнучких друкованих платах і інших динамічних системах.

Політетрафторетилен (PTFE), відомий також як тефлон, має відмінні діелектричні властивості і стійкість до хімічних реагентів. PTFE покриття використовуються для захисту електронних компонентів від агресивних середовищ і забезпечення низького коефіцієнта тертя, що зменшує знос.

Епоксидні смоли широко застосовуються для заливки і герметизації друкованих плат, забезпечуючи захист від вологи і механічних впливів. Епоксидні покриття мають високу адгезію до різних матеріалів і забезпечують міцну ізоляцію.

Поліуретан використовується для захисту друкованих плат від вологи і механічних пошкоджень. Поліуретанові покриття мають високу еластичність і стійкість до агресивних хімічних речовин.

Скляні покриття застосовуються в умовах високих температур і агресивних середовищах, забезпечуючи чудові діелектричні властивості та захист від

зовнішніх впливів. Вони мають високу термічну і хімічну стійкість, що робить їх ідеальними для використання в екстремальних умовах експлуатації.

Боросилікатне скло часто використовується для покриття електронних компонентів завдяки своїй стійкості до теплових ударів і хімічних реакцій. Боросилікатні скляні покриття забезпечують високу прозорість для електромагнітних хвиль і можуть використовуватися в оптичних системах.

Фосфатне скло має високу електричну ізоляцію і використовується для захисту електронних компонентів, що працюють в умовах високих температур і агресивних середовищ.

Керамічні покриття, такі як карбід кремнію (SiC) і нітрид алюмінію (AlN), використовуються для захисту електронних компонентів від високих температур і механічних пошкоджень. Вони мають високу твердість, термічну і електричну стійкість, що робить їх ідеальними для використання в екстремальних умовах.

Карбід кремнію (SiC) відрізняється високою твердістю і стійкістю до абразивного зносу. SiC покриття забезпечують захист від механічних пошкоджень і термічної деградації.

Нітрид алюмінію (AlN) має високу теплопровідність і використовується для відведення тепла від електронних компонентів. Ці покриття забезпечують ефективну тепловіддачу і захист від високих температур.

Комбіновані діелектричні покриття поєднують властивості кількох матеріалів для забезпечення оптимального захисту і електричної ізоляції. Наприклад, можуть використовуватися багат шарові структури, що включають оксидні, полімерні і скляні шари, кожен з яких виконує свою функцію.

Такі комбіновані покриття дозволяють досягти високої ефективності і надійності електронних компонентів, забезпечуючи комплексний захист і поліпшення їх електричних характеристик. Вони використовуються в критично важливих застосуваннях, де важливий кожен аспект функціональності і надійності.

Комбіновані покриття, що об'єднують властивості металевих та діелектричних матеріалів, використовуються в радіотехніці для досягнення оптимального поєднання електричних, механічних та захисних характеристик.

Такі покриття створюються шляхом нанесення багатошарових структур, де кожен шар виконує певну функцію, покращуючи загальну продуктивність та надійність електронних компонентів.

Основною метою використання комбінованих покриттів є поєднання переваг металевих та діелектричних шарів для забезпечення:

- 1) високої електропровідності;
- 2) електричної ізоляції;
- 3) захисту від корозії та механічних пошкоджень;
- 4) зниження електромагнітних завад;
- 5) теплопровідності та відведення тепла.

Комбіновані покриття складаються з декількох шарів, кожен з яких виконує свою функцію:

1. Металевий шар забезпечує електропровідність, корозійну стійкість та механічну міцність. Залежно від вимог, можуть використовуватися мідь, нікель, золото, срібло та інші метали.

2. Діелектричний шар надає ізоляційні властивості, запобігає електричним пробоям і знижує електромагнітні завади. В якості діелектричних матеріалів використовуються оксиди металів (SiO_2 , Al_2O_3), полімери (поліімід, PTFE), кераміка (SiC , AlN) та інші.

3. Захисний шар може бути створений з діелектричних матеріалів або металів для додаткового захисту від механічних пошкоджень, впливу агресивних середовищ та інших факторів.

Приклади комбінованих покриттів:

1. Мідь-діелектрик.

Мідно-діелектричні покриття є поширеними в радіотехніці, особливо в друкованих платах. Мідний шар забезпечує провідні доріжки для електричних

сигналів, тоді як діелектричний шар (зазвичай оксид кремнію або полімери) надає ізоляцію між цими доріжками. Це дозволяє створювати багат шарові плати, де кожен шар може виконувати свої специфічні функції, забезпечуючи компактність та високу ефективність електронних схем.

2. Нікель-золото.

Нікелево-золоті покриття широко використовуються для контактів та роз'ємів. Нікель забезпечує міцну адгезію до підкладки та корозійну стійкість, тоді як золото, нанесене на нікель, надає стабільні електричні характеристики і стійкість до окислення. Такі покриття важливі для забезпечення надійності та тривалого терміну служби електричних з'єднань, особливо в умовах агресивних середовищ.

3. Срібло-епоксидна смола.

Срібло-епоксидні покриття часто застосовуються для екранування електронних компонентів і забезпечення електромагнітної сумісності (EMC). Срібний шар забезпечує високу електропровідність і відбивну здатність, тоді як епоксидна смола забезпечує захист від механічних пошкоджень і агресивних середовищ. Такі покриття допомагають знижувати рівень електромагнітних завад і забезпечують стабільну роботу чутливих електронних пристроїв.

Для нанесення комбінованих покриттів використовуються різні технології, що забезпечують високу точність і контроль за товщиною шарів:

- 1) Гальванічне покриття дозволяє наносити металеві шари з високою точністю, використовуючи процеси електролізу.
- 2) Хімічне осадження з парової фази (CVD) забезпечує формування діелектричних шарів, таких як SiO_2 і Al_2O_3 , з високою однорідністю.
- 3) Фізичне осадження з парової фази (PVD) використовується для нанесення тонких металевих та діелектричних шарів з високою адгезією.
- 4) Лазерне напилення та плазмове напилення дозволяють створювати покриття з високою точністю та відмінною адгезією до підкладок.

Комбіновані покриття забезпечують низку переваг, що робить їх незамінними в радіотехнічних пристроях:

1) Покращені електричні характеристики: Металеві шари забезпечують високу провідність і зниження втрат сигналу, тоді як діелектричні шари забезпечують ізоляцію і зниження електромагнітних завад.

2) Захист від корозії та механічних пошкоджень: Металеві і діелектричні шари забезпечують комплексний захист компонентів від зовнішніх впливів.

3) Тепловідведення: Деякі комбіновані покриття, що включають високотеплопровідні матеріали, забезпечують ефективне відведення тепла від електронних компонентів, підвищуючи їх надійність і довговічність.

4) Можливість мініатюризації: Багатошарові структури дозволяють створювати компактні та ефективні електронні схеми, що є критично важливим для сучасних радіотехнічних пристроїв.

Комбіновані покриття застосовуються в різних галузях радіотехніки:

1) Мікроелектроніка: для створення високоефективних мікросхем та інтегральних схем з високою щільністю розміщення компонентів.

2) Антени та високочастотні компоненти: для забезпечення стабільних електричних характеристик і захисту від зовнішніх впливів.

3) Контакти та роз'єми: для забезпечення надійності і довговічності електричних з'єднань.

4) Друковані плати: для створення багатошарових структур з високою електропровідністю та ефективною ізоляцією.

Вплив покриттів на електромагнітні характеристики. Втрати на поверхневих хвилях є важливим аспектом у радіотехніці, особливо в контексті роботи антен, хвилеводів та мікрохвильових ліній передачі. Поверхневі хвилі — це електромагнітні хвилі, які поширюються вздовж поверхні провідника або діелектрика, взаємодіючи з середовищем, через яке вони проходять. Ці втрати можуть значно впливати на ефективність роботи радіотехнічних систем і

Наприклад, для провідників часто використовують мідь або срібло, які мають високу електропровідність.

2) Поверхневі покриття: нанесення покриттів на поверхню провідників або діелектриків може зменшити втрати. Такі покриття можуть бути виготовлені з матеріалів з високою провідністю або низькими діелектричними втратами.

3) Оптимізація геометрії: зменшення шорсткості поверхні і оптимізація геометрії елементів дозволяє мінімізувати розсіювання і втрати на неоднорідностях.

4) Температурний контроль: підтримка оптимальної температури робочого середовища може знизити втрати, оскільки електропровідність провідників і діелектрична проникність матеріалів можуть змінюватися з температурою.

Втрати на поверхневих хвилях значною мірою залежать від частоти сигналу. Зі збільшенням частоти втрати зростають через зростання реактивного опору провідників і збільшення діелектричних втрат у матеріалах. Це явище особливо важливе при роботі з мікрохвильовими і терагерцовими частотами, де втрати можуть значно впливати на ефективність і стабільність систем.

Заниження шумів у радіотехніці є критично важливим для підвищення якості прийому та передачі сигналів. Шум у радіотехнічних системах може виникати через різноманітні причини, включаючи зовнішні джерела, недоліки обладнання або навіть через внутрішні процеси в електронних компонентах. Шуми можуть суттєво впливати на ефективність системи, зменшуючи чутливість приймача і погіршуючи здатність системи розрізняти сигнал від шуму. Тому методи заниження шумів є обов'язковою частиною проектування сучасних радіотехнічних пристроїв.

Основні підходи до заниження шумів включають:

1. Вибір оптимальних компонентів: використання якісних, низькошумових компонентів є одним з найефективніших способів зниження шуму. Це стосується таких елементів, як транзистори, діоди, опори та інші активні та пасивні компоненти.

2. Покращення дизайну схеми: ретельне планування розкладки друкованих плат, оптимізація схемних рішень та використання спеціальних технік заземлення та екранування може значно знизити вплив шуму.

3. Ізоляція та екранування: ефективне екранування електронних компонентів та схем може запобігти надходженню зовнішніх електромагнітних перешкод, які можуть викликати шум.

4. Фільтрація: використання фільтрів для видалення небажаних частот з сигналу допомагає зменшити рівень шуму, особливо в системах прийому та передачі.

5. Контроль температури: оскільки рівень шуму в електронних компонентах може залежати від температури, контроль температурного режиму може допомогти зменшити тепловий шум, особливо в чутливих аналогових компонентах.

6. Цифрова обробка сигналів: використання методів цифрової обробки сигналів для видалення шуму з сигналу після його прийому дозволяє покращити якість переданої інформації.

Ці методи зниження шумів можуть застосовуватися окремо або в комбінації для досягнення найкращих результатів у радіотехнічних системах. Важливим аспектом є також розуміння природи шуму в конкретному застосуванні, що вимагає детальних експериментів і тестувань.

Підвищення добротності резонаторів є важливим аспектом при розробці радіотехнічних та електронних систем, особливо в тих, де потрібна висока стабільність і точність частот. Добротність резонатора визначає його здатність підтримувати коливання з мінімальними втратами енергії та характеризується відношенням енергії, збереженої в резонаторі, до енергії, що втрачається за один цикл коливань. Добротність резонатора є критичним параметром в радіотехніці, який визначає якість і стабільність вібраційних і хвильових систем. Підвищення добротності можна досягти через кілька методів, кожен з яких має свої особливості та застосування.

Методи підвищення добротності резонаторів:

1. Використання матеріалів з високою внутрішньою добротністю: вибір матеріалу є фундаментальним для забезпечення високої добротності. Матеріали з низькими втратами на магнітну та діелектричну проникність, такі як чисті метали (золото, срібло), спеціальні сплави (наприклад, мю-метал) або діелектричні кристали (наприклад, кварц, рубін), є ідеальними.

2. Оптимізація геометрії резонатора: правильне проектування форми і розмірів резонатора може мінімізувати втрати енергії. Наприклад, у кварцових резонаторах, використання пластинок з орієнтацією, що зменшує механічний напруження, дозволяє досягти вищої добротності.

3. Екранування від зовнішніх впливів: екранування резонатора від зовнішніх електромагнітних полів і механічних впливів може істотно зменшити зовнішні втрати. Це може бути досягнуто за допомогою феромагнітних або провідних оболонок.

4. Температурна компенсація: резонатори можуть бути чутливими до температурних змін, що впливає на їх добротність. Використання температурно стабільних матеріалів або зовнішніх термостатичних систем може помітно підвищити стабільність і добротність.

5. Мінімізація механічних напружень: механічні напруження у матеріалі можуть викликати додаткові втрати. Ретельний дизайн монтажу та кріплення резонатора може допомогти зменшити ці впливи, зберігаючи високу добротність.

6. Зменшення впливу поверхні: поверхневі властивості матеріалів можуть значно впливати на втрати, особливо в дуже високочастотних системах. Полірування, покриття або обробка для зменшення шорсткості та інших дефектів поверхні можуть значно підвищити добротність.

Захист від корозії є критично важливим аспектом при проектуванні та експлуатації радіотехнічної апаратури, особливо в умовах, де обладнання може бути схильним до впливу вологи, хімічних речовин або солоного повітря.

Корозія не лише зменшує механічну міцність компонентів, але й може призводити до зниження електричної провідності, викликаючи збої в роботі електронних схем.

Методи захисту від корозії:

1. Поверхневі покриття: одним з найпоширеніших методів захисту металевих деталей від корозії є нанесення захисних покриттів. Це може бути гальванічне покриття такими металами як цинк, нікель, хром або золото, які створюють бар'єр між металом та агресивним середовищем. Також застосовуються лаки, фарби та пластмасові покриття, які також діють як діелектрики, запобігаючи електрохімічній корозії.

2. Анодування: для захисту алюмінієвих деталей часто використовується анодування, яке перетворює поверхневий шар металу на твердий шар оксиду алюмінію. Цей шар ефективно захищає від корозії і має естетичний вигляд.

3. Катодний захист: цей метод захисту використовується для захисту великих металевих конструкцій, таких як корпуси кораблів або трубопроводів. Катодний захист включає приєднання більш активного металу, як-от цинк або магній, які виступають як анод і кородують, захищаючи основний метал від руйнування.

4. Інгібітори корозії: додаються в середовище, де працює обладнання, для зниження корозійної активності. Ці речовини можуть блокувати активні центри на поверхні металу або змінювати хімічний склад середовища, роблячи його менш агресивним.

5. Конструкційні рішення: правильне конструкційне планування може мінімізувати ризики корозії, наприклад, через уникнення застою води на поверхнях або забезпечення достатньої вентиляції в критичних місцях.

Важливість застосування цих методів:

Захист від корозії в радіотехніці не лише збільшує термін служби обладнання, але й запобігає несподіваним відмовам у критичний момент, що є особливо важливим у ситуаціях, де надійність техніки є вирішальною. Втрати

					КПТР.021029.01.08 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		20

від корозії можуть бути значними, тому інвестиції в захист є виправданими з точки зору довгострокової економії коштів і збереження функціональності системи.

Радіоелектронні пристрої часто працюють в умовах змінних температур, що вимагає від покриттів високої термічної стабільності.

Оксидні покриття (наприклад, оксид алюмінію) забезпечують високу термічну стійкість і захист від температурних коливань.

Полімерні покриття (наприклад, поліімід) можуть витримувати високі температури і забезпечують гнучкість при термічних деформаціях.

Приклади застосування поверхневих покриттів наступні:

Друковані плати (PCB) є основою для багатьох радіоелектронних пристроїв. Вони вимагають покриттів, що забезпечують добру електропровідність, захист від корозії та механічних впливів.

Мідні покриття використовуються для створення провідних доріжок і контактних майданчиків.

Захисні лакофарбові покриття (наприклад, фоторезист) забезпечують додатковий захист від зовнішніх впливів і корозії.

Анени повинні мати покриття, що забезпечують високу провідність і мінімальні втрати сигналу. Металеві покриття, такі як срібло і мідь, забезпечують необхідні характеристики для антенних систем.

Срібні покриття використовуються для антен, що працюють на високих частотах, забезпечуючи мінімальні втрати.

Комбіновані покриття можуть включати захисні шари, що зменшують вплив зовнішніх факторів на роботу антени.

Контакти і роз'єми вимагають покриттів, що забезпечують надійний електричний контакт і захист від корозії. Золоті покриття є оптимальними для таких застосувань завдяки їх чудовим електричним і антикорозійним властивостям.

Золоті покриття використовуються для високонадійних контактів в критичних системах.

Нікелеві покриття можуть бути використані як проміжний шар для підвищення адгезії і корозійної стійкості.

Нижче наведена таблиця з основними покриттями, які використовуються в радіотехніці.

Таблиця 1.1 – Характеристики покриттів

Назва покриття	Матеріал	Твердість (HV)	Товщина (мкм)	Зносостійкість	Корозійна стійкість	Температурна стійкість (°C)	Використання
Золоте покриття	Золото	200	0.5-1.5	Низька	Дуже висока	До 200	Контакти, з'єднувачі, друковані плати
Срібне покриття	Срібло	250	1-2	Низька	Висока	До 150	Реле, перемикачі, роз'єми
Олов'яне покриття	Олово	5-10	0.5-2	Низька	Середня	До 200	Пайка, захист контактів
Нікелеве покриття	Нікель	500-550	2-5	Середня	Висока	До 300	Підкладки, друковані плати
Паладієве покриття	Паладій	400	0.1-1	Середня	Дуже висока	До 850	Контакти, роз'єми, друковані плати
Мідне покриття	Мідь	60-100	1-5	Низька	Низька	До 200	Друковані плати, підкладки
Нітрид титану (TiN)	Титан	2400	0.5-3	Висока	Висока	До 600	Різці, інструменти, електроди
Оксид цинку (ZnO)	Цинк	150-200	0.1-0.5	Низька	Середня	До 300	Тонкоплівкові транзистори, сенсори

дефектів з поверхні, а також для надання їй блиску та гладкості. Полірувальні матеріали, такі як полірувальні пасти або полірувальні круги, наносяться на спеціальні пристрої і використовуються для обробки поверхні.

Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження і використовується в залежності від вимог до кінцевого продукту та характеристик матеріалу.

Наприклад, шліфування може бути більш ефективним для видалення грубих дефектів, таких як глибокі подряпини, тоді як полірування може бути використане для досягнення більш високого рівня гладкості та блиску.

Крім того, важливо враховувати такі фактори, як тип матеріалу, з якого виготовлений виріб, його міцність та структура, а також технічні характеристики обладнання, доступного для проведення механічного очищення. Правильно вибраний метод механічного очищення дозволить досягти оптимальних результатів і забезпечить якісну підготовку поверхні для подальшого нанесення покриття.

Другим етапом підготовки поверхонь для нанесення покриття в радіотехніці - хімічне очищення - є ключовим етапом у процесі підготовки, оскільки він забезпечує додаткову очистку поверхні від різних типів забруднень і дефектів. Цей етап включає в себе використання різноманітних хімічних розчинників, розчинів та кислот з метою розчинення органічних і неорганічних забруднень, а також очищення поверхні від окисних плівок та інших нанесених шарів.

Один з найпоширеніших методів хімічного очищення - це використання розчинників. Розчинники є рідкими речовинами, які здатні розчиняти органічні забруднення, такі як масла, жири, фарби та лаки. Вони можуть бути використані для підготовки різних видів поверхонь, включаючи метал, пластик, скло та кераміку. Розчинники застосовуються шляхом нанесення їх на поверхню за допомогою щіток, валиків або розпилювачів, після чого забруднення зм'якшуються та відокремлюються від поверхні.

Іншим методом хімічного очищення є використання кислот. Кислоти, такі як сірчана кислота, соляна кислота та фосфорна кислота, можуть бути використані для видалення неорганічних забруднень, таких як ржавчина та інші окисні відкладення. Кислоти застосовуються на поверхню, де вони реагують з окисними забрудненнями, перетворюючи їх на розчинні солі, які можуть бути легко видалені.

Додатковою можливістю для хімічного очищення є використання лугів або алкалійних розчинів. Ці речовини ефективно видаляють органічні забруднення, такі як жири та масла, та можуть бути використані для підготовки металевих поверхонь перед фарбуванням або гальванічним покриттям.

Хімічне очищення також може включати процес етчіngu. Етчіng - це процес видалення тонкого шару матеріалу з поверхні за допомогою хімічних реакцій. Цей метод часто використовується для створення мікроструктур або для видалення окисних шарів з металевих поверхонь перед нанесенням покриття.

Для досягнення оптимального результату під час хімічного очищення необхідно дотримуватися правильних пропорцій розчинів, правильно вибирати хімічні реагенти та дотримуватися встановлених технологічних процесів. Неправильне використання хімічних речовин або недотримання технологічних режимів може призвести до появи додаткових дефектів на поверхні або навіть до її пошкодження.

Третім етапом підготовки поверхонь для нанесення покриття в радіотехніці - електрохімічне очищення - є одним з ключових етапів у процесі підготовки, оскільки він дозволяє ефективно очистити поверхню від забруднень та покращити її адгезію до покриття. Цей метод використовує електричний струм для сприяння хімічним реакціям, які відбуваються на поверхні матеріалу. Електрохімічне очищення може бути використане для різних типів матеріалів, включаючи метали, пластик та скло.

Одним з найпоширеніших методів електрохімічного очищення є метод електролізу. Під час електролізу на поверхні матеріалу відбуваються хімічні реакції під впливом електричного струму. Зазвичай для електролізу використовують електроліти, які містять розчинені іони металів, які можуть розчинятися або осаджуватися на поверхні. Електроліз дозволяє видалити органічні забруднення, окисні відкладення та інші неправильності з поверхні, що покращує якість покриття та забезпечує його тривалу експлуатацію.

Ще одним методом електрохімічного очищення є анодне окислення. Під час анодного окислення на поверхні матеріалу утворюється окисний шар за рахунок окиснення металу або сплаву. Цей окисний шар може бути використаний для поліпшення адгезії покриття та захисту від корозії. Анодне окислення може бути застосоване до різних типів металів, включаючи алюміній, титан, магній та інші.

Крім того, електрохімічне очищення може включати в себе процеси гальванічного осадження. Гальванічне осадження використовується для відновлення покриття на поверхні матеріалу або для створення нового покриття. Під час гальванічного осадження на поверхню матеріалу наносяться металеві або не металеві іони з допомогою електролітичного розчину, що дозволяє створити тонкий шар покриття, який має високу стійкість та адгезію до основи.

Окрім цього, електрохімічне очищення може включати в себе використання різних методів електрохімічного оброблення, таких як електрохімічне полірування, електрохімічне фрезерування та електрохімічне травлення. Ці методи дозволяють здійснювати точне контрольоване видалення матеріалу з поверхні, що дозволяє досягти високої якості покриття та точної розмірної та формової обробки.

Четвертим етапом підготовки поверхонь для нанесення покриття в радіотехніці - фізичне чи хіміко-фізичне зміцнення поверхні - є важливим кроком у підготовці, оскільки він спрямований на підвищення міцності, адгезії

та стійкості покриття на поверхні матеріалу. Цей етап може включати в себе використання різних методів та технологій для покращення фізичних та хімічних властивостей поверхні перед нанесенням покриття.

Один із найпоширеніших методів фізичного зміцнення поверхні - це обробка методом піскування. Піскування використовує абразивний матеріал, як правило, пісок, який під великим тиском наноситься на поверхню. Цей процес допомагає видалити останні залишки забруднень та подряпин, підвищує адгезію шару покриття та покращує його стійкість до зовнішніх впливів. Піскування може бути використане на різних типах матеріалів, включаючи метали, скло та пластик.

Ще одним ефективним методом є обробка методом гартування. Гартування полягає в нагріванні поверхні матеріалу до високої температури, а потім її швидке охолодження. Цей процес допомагає підвищити міцність та твердість поверхні, що робить її більш стійкою до подряпин та зношування. Гартування застосовується в основному до металевих матеріалів, таких як сталь, алюміній та титан.

Третім методом є метод хіміко-фізичного зміцнення, який включає в себе використання різних хімічних сполук для підвищення міцності та адгезії покриття до поверхні. Один з таких методів - це фосфатування. Фосфатування використовується для створення захисного шару фосфатних солей на поверхні металевих матеріалів. Цей шар сприяє покращенню адгезії покриття та захищає поверхню від корозії.

Ще одним методом хіміко-фізичного зміцнення є підвищення структурної стійкості поверхні за допомогою різних хімічних реакцій. Наприклад, оксидування поверхні металу може використовуватися для створення тонкого шару оксиду, який покращує адгезію покриття та захищає поверхню від корозії.

Крім цього, до методів фізичного чи хіміко-фізичного зміцнення можна віднести іонно-плазмове напилення. Цей метод полягає у нагріванні іонів вакуумної плазми до високої температури, що призводить до їх розплавлення та

нанесення на поверхню матеріалу. Іонно-плазмове напилення дозволяє отримати покриття з високою адгезією та стійкістю до зношування.

1.3 Методи нанесення поверхневих покриттів

У радіотехніці, як і в будь-якій іншій галузі техніки, нанесення поверхневих покриттів відіграє важливу роль у покращенні функціональних характеристик електронних пристроїв та збільшенні їх терміну служби.

Розглянемо хімічне осадження як метод нанесення поверхневих покриттів в радіотехніці детальніше, зосередившись на його особливостях, перевагах та недоліках.

Хімічне осадження є одним з найпоширеніших методів нанесення покриттів у радіотехніці. Воно базується на хімічних реакціях, що відбуваються між осаджувальною речовиною та поверхнею матеріалу, на який наноситься покриття. Для виготовлення покриття використовують розчини, які містять хімічні сполуки, що можуть взаємодіяти з поверхнею підкладки. Нижче ми розглянемо основні аспекти хімічного осадження у радіотехніці, його переваги, недоліки та застосування.

Особливості хімічного осадження:

1. **Універсальність застосування:** Хімічне осадження може бути використане для різноманітних матеріалів та деталей, що робить його універсальним методом нанесення покриттів у радіотехніці.
2. **Контроль товщини шару:** Один із важливих аспектів хімічного осадження - це здатність контролювати товщину утворюваного покриття. Це робить його ефективним для застосування в радіочастотних пристроях, де потрібна висока точність.
3. **Можливість нанесення тонких шарів:** Хімічне осадження дозволяє наносити тонкі покриття, що важливо для деяких електронних пристроїв, де необхідно забезпечити мінімальний вплив на внутрішні розміри та параметри пристрою.

4. Рівномірність покриття: Цей метод забезпечує рівномірне покриття навіть на складних або неоднорідних поверхнях, що робить його відмінним вибором для радіотехнічних застосувань, де необхідно забезпечити однорідність покриття.

Переваги хімічного осадження:

1. Висока адгезія: Покриття, отримані за допомогою хімічного осадження, зазвичай відрізняються високою адгезією до підкладки, що забезпечує стійкість і довговічність конструкції.
2. Економічність: Хімічне осадження може бути більш економічним порівняно з іншими методами, оскільки воно не вимагає дорогого обладнання та спеціальних умов.
3. Широкий спектр матеріалів: Хімічне осадження може бути використане для нанесення різноманітних матеріалів, таких як метали, оксиди, нітриди та інші, що розширює спектр застосування цього методу.

Недоліки хімічного осадження:

1. Чутливість до забруднень: Поверхня деталей під час хімічного осадження може бути чутливою до забруднень або забруднень, що може призвести до неоднорідності покриття.
2. Обмеженість у виборі матеріалів: Деякі матеріали можуть бути складні у відкладенні за допомогою хімічного осадження, що обмежує його застосування у деяких випадках.

Фізичне осадження, також відоме як вакуумне нанесення, є одним із методів нанесення покриттів у радіотехніці. Воно базується на процесі випаровування матеріалу в вакуумі, а потім його осадження на поверхні матеріалу. Цей метод є досить поширеним у виробництві електронних пристроїв, оскільки він дозволяє отримати тонкі, рівномірні та досить стійкі покриття. Нижче ми розглянемо особливості, переваги та недоліки фізичного осадження у радіотехніці.

Особливості фізичного осадження:

					КПТР.021029.01.08 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		29

1. Вакуумний процес: Фізичне осадження відбувається у вакуумному середовищі, що дозволяє уникнути впливу атмосферних газів та інших забруднень на утворення покриття.
2. Контроль товщини шару: Як і у хімічному осадженні, фізичне осадження також дозволяє контролювати товщину утворюваного покриття, що робить його досить ефективним для радіочастотних пристроїв.
3. Висока чистота покриття: Покриття, отримані за допомогою фізичного осадження, зазвичай відрізняються високою чистотою та гладкістю поверхні, що робить їх ідеальними для застосування в радіотехніці.
4. Можливість нанесення тонких плівок: Фізичне осадження дозволяє наносити тонкі плівки матеріалів, що важливо для деяких електронних пристроїв, де необхідно забезпечити мінімальний вплив на внутрішні розміри та параметри пристрою.

Переваги фізичного осадження:

1. Висока чистота та гладкість поверхні: Покриття, отримані фізичним осадженням, мають високу чистоту та гладкість, що робить їх ідеальними для радіочастотних пристроїв, де потрібна висока електрична провідність та низький коефіцієнт втрат.
2. Висока точність контролю товщини: Фізичне осадження дозволяє досягти високої точності в контролі товщини покриття, що є важливим для деяких радіочастотних пристроїв, де необхідно забезпечити точність параметрів.
3. Ефективність виробництва: Фізичне осадження може бути ефективним з точки зору виробництва, оскільки процес може бути автоматизований та масштабований для великих обсягів виробництва.

Недоліки фізичного осадження:

1. Висока вартість обладнання: Для фізичного осадження потрібне спеціальне обладнання, що може бути досить дорогим у встановленні та експлуатації.

2. Обмеженість у виборі матеріалів: Деякі матеріали можуть бути складні у відкладенні за допомогою фізичного осадження, що обмежує його застосування у деяких випадках.

Фізико-хімічне осадження представляє собою складний процес, який поєднує в собі фізичні та хімічні аспекти для створення покриття на поверхні матеріалів. Цей метод нанесення покриттів в радіотехніці використовується для отримання покриттів з особливими властивостями, такими як висока адгезія, механічна міцність та стійкість до корозії. У цьому розділі ми розглянемо особливості, переваги та недоліки фізико-хімічного осадження в радіотехніці.

Особливості фізико-хімічного осадження:

1. Комплексний процес: Фізико-хімічне осадження вимагає використання як фізичних, так і хімічних процесів для утворення покриття на поверхні матеріалу. Цей комбінований підхід дозволяє отримувати покриття з унікальними властивостями, які не можуть бути досягнуті іншими методами.
2. Висока адгезія та стійкість: Однією з основних переваг фізико-хімічного осадження є його здатність забезпечувати високу адгезію до підкладки та стійкість до механічного зносу та корозії.
3. Контроль товщини та однорідність покриття: Фізико-хімічне осадження дозволяє точно контролювати товщину покриття та забезпечити його однорідність на всій поверхні матеріалу.
4. Широкий спектр матеріалів: Цей метод може бути застосований для нанесення різноманітних матеріалів, включаючи метали, оксиди, нітриди та інші сполуки, що розширює його застосування в радіотехніці.

Переваги фізико-хімічного осадження:

1. Висока якість покриття: Покриття, отримані фізико-хімічним осадженням, зазвичай відрізняються високою якістю, що робить їх ідеальними для радіочастотних пристроїв, де необхідна висока електрична провідність та низький коефіцієнт втрат.

2. **Можливість контролю товщини та однорідності:** Фізико-хімічне осадження дозволяє точно контролювати товщину покриття та забезпечити його однорідність на всій поверхні матеріалу.
3. **Висока стійкість до корозії та зносу:** Покриття, отримані фізико-хімічним осадженням, зазвичай відрізняються високою стійкістю до корозії та механічного зносу, що робить їх ідеальними для електроніки, що працює в агресивних середовищах.

Недоліки фізико-хімічного осадження:

1. **Складність процесу:** Фізико-хімічне осадження може бути складним у виконанні та вимагати спеціального обладнання та високої кваліфікації персоналу.
2. **Висока вартість обладнання та матеріалів:** Для фізико-хімічного осадження потрібне спеціальне обладнання та дорогі реагенти, що може зробити його вартість високою.

1.4 Вакуумне напилення в радіотехніці

Вакуумне напилення є одним із ключових процесів у виробництві електронних пристроїв, зокрема в радіотехніці. Цей метод дозволяє наносити тонкі плівки різних матеріалів на поверхні напівпровідників, металів та інших матеріалів з високою точністю і якістю. У цьому рефераті ми розглянемо процес вакуумного напилення, його застосування в радіотехніці, а також технологічні аспекти та переваги використання цього методу.

Вакуумне напилення є одним із найдавніших методів нанесення тонких плівок на поверхні матеріалів. Його початки можна відстежити до початку 20 століття, коли вчені почали досліджувати можливості використання вакууму для нанесення матеріалів. Перші спроби вакуумного напилення були проведені за допомогою простих апаратів, які склалися з підігріву матеріалу та його подачі у вакуумну камеру.

У наступні десятиліття вакуумне напилення пройшло значний шлях розвитку. З'явилися нові технології та матеріали, які дозволили покращити якість та ефективність процесу. У 1950-1960-х роках вакуумне напилення стало широко використовуватися в промисловості, зокрема в електронній та радіотехнічній галузях.

Основний принцип вакуумного напилення полягає у нагріванні матеріалу до високої температури в вакуумній камері, де він переходить у стан пари або плазми. Потім цей матеріал напилюється на поверхню під дією вакууму. Цей процес може бути виконаний за допомогою різних методів, таких як евапорація, sputtering, атомарне напилення тощо.

Один з найпоширеніших методів вакуумного напилення - це sputtering, або іонно-плазмове напилення. У цьому методі матеріал, який потрібно нанести, збуджується за допомогою іонного потоку, що призводить до його розплавлення та розпилювання на поверхню під дією іонів. Цей процес дозволяє отримувати дуже тонкі та рівномірно розподілені плівки на поверхні матеріалів.

Вакуумне напилення має широке застосування в радіотехніці. Одним з основних напрямків його використання є виробництво радіочастотних пристроїв, таких як фільтри, антени, підсилювачі та інші компоненти.

Наприклад, тонкі плівки металів, таких як алюміній, мідь чи титан, наносяться на поверхню напівпровідників для створення електродів та провідників у пристроях.

Крім того, вакуумне напилення використовується для нанесення діелектричних плівок, наприклад оксидів та нітридів, які використовуються для створення ізолюючих шарів у пристроях радіотехніки. Ці шари важливі для забезпечення електричної ізоляції та захисту від зовнішніх впливів.

Однією з головних переваг вакуумного напилення в радіотехніці є можливість отримання тонких плівок з високою ступенем однорідності та контролю товщини. Це особливо важливо у виробництві радіоелектроніки, де

навіть невеликі недоліки в товщині плівки можуть вплинути на роботу пристрою. Вакуумне напилення дозволяє досягти високої точності в контролі параметрів плівки, що робить його важливим інструментом у виробництві електроніки для радіотехнічних пристроїв.

Іншою перевагою вакуумного напилення є можливість використання різноманітних матеріалів для нанесення плівок. Залежно від потреб конкретного додатку, можуть використовуватися метали, напівпровідники, діелектрики та інші матеріали, що розширює можливості проектування та виробництва радіотехнічних пристроїв.

Додатковою перевагою вакуумного напилення є його висока ефективність та швидкість виробництва. У порівнянні з іншими методами нанесення плівок, вакуумне напилення може бути більш ефективним та економічним з точки зору часу та ресурсів.

Не дивлячись на всі переваги, вакуумне напилення також має свої обмеження та недоліки. Наприклад, деякі матеріали можуть бути складними для напилення у вакуумі через їх хімічну або фізичну структуру. Крім того, процес вакуумного напилення може бути витратним у виробництві та вимагати великих витрат на обладнання та підтримку вакуумних систем.

У зв'язку з постійним розвитком технологій, вакуумне напилення продовжує вдосконалюватися та адаптуватися до нових вимог та викликів у галузі радіотехніки. Завдяки його універсальності та ефективності, воно залишається важливим інструментом у виробництві електроніки та радіотехнічних пристроїв і прогнозується, що й надалі буде використовуватися на протязі багатьох років.

1.5 Не вакуумне нанесення покриттів

Радіотехніка в сучасному світі є важливою складовою багатьох технологій та систем, від комунікаційних мереж до медичних приладів і військової техніки. Забезпечення ефективності та надійності пристроїв

радіотехніки вимагає застосування високоякісних покриттів, які можуть захищати їх від впливу навколишнього середовища, корозії, абразії та інших шкідливих факторів. У цьому контексті методи нанесення покриттів виявляються ключовими для забезпечення якості та довговічності радіотехнічних систем.

Одним із способів нанесення покриттів є вакуумне нанесення (наприклад, методи фізичного відкладення парів та хімічного відкладення з газової фази). Ці методи виявилися досить ефективними для отримання тонких плівкових покриттів з високою якістю та контрольованими властивостями. Однак, вакуумне нанесення має свої обмеження, зокрема, обмежену швидкість процесу, складність в управлінні параметрами та вимоги до спеціального обладнання.

У зв'язку з цим, невакуумне нанесення покриттів стає об'єктом зростаючої уваги у радіотехніці. Одним з основних методів невакуумного нанесення є метод хімічного відкладення (Chemical Vapor Deposition, CVD). Цей метод передбачає взаємодію газової фази реагентів з поверхнею субстрату за умови високої температури та/або вакууму, що призводить до утворення тонкого плівкового шару. CVD широко використовується у виробництві напівпровідників, оптичних пристроїв та інших електронних компонентів, оскільки дозволяє отримувати покриття з високою ступенем чистоти та точно визначеними властивостями.

Ще одним поширеним методом невакуумного нанесення є термічне розпилення (Thermal Spray). Цей процес включає розпилення розплавленого матеріалу на поверхню за допомогою газу чи плазми. Термічне розпилення використовується для нанесення захисних покриттів на металеві конструкції, включаючи корпуси радіотехнічних пристроїв, а також у виробництві термозахисних матеріалів.

Крім того, у радіотехніці широко використовуються різноманітні методи хімічного осадження (Chemical Deposition), такі як електрохімічне осадження

(Electrochemical Deposition) та хімічне відкладення з розчину (Chemical Bath Deposition). Ці методи дозволяють отримувати покриття з високою стійкістю до корозії та інших негативних впливів.

Невакуумне нанесення покриттів в радіотехніці вирізняється своєю ефективністю, швидкістю та можливістю застосування на великих поверхнях. Воно дозволяє отримувати покриття з високою якістю та стабільністю, що робить його важливим елементом виробництва радіотехнічних пристроїв. Однак, для досягнення оптимальних результатів необхідно постійно вдосконалювати методи нанесення, враховуючи вимоги щодо якості, ефективності та екологічності.

					<i>КПТР.021029.01.08 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		36

цього методу є стабільне та передбачуване співвідношення між робочими параметрами, швидкістю розпилення та діаметром краплі. Крім того, ультразвукове розпилення забезпечує найвужчий розподіл крапель за розміром порівняно з іншими методами розпилення. Крім того, ультразвуковий метод забезпечує знижені швидкості розпилення, плавне регулювання швидкості розпилення рідини та суттєво знижене робоче споживання електроенергії. На відміну від звичайних механізмів розпилення, які покладаються на відносно високий гідравлічний тиск або високошвидкісні газові потоки для розпилення розпилюваних рідких середовищ, ультразвукові форсунки використовують ультразвукові механічні коливання п'єзоелектричного перетворювача для вібрації поверхні розпилення та, таким чином, розпилення рідини, що розпилюється. на ньому. У сучасній практиці використовуються дві основні техніки ультразвукового напилення: розпилення у фонтані та розпилення в шарі рідини. Розпилення у фонтані забезпечує утворення аерозолів із середнім розміром частинок 2–5µм на частоті до 5 МГц.

Проте продуктивність цього способу напилення становить менше 1 мл/хв, що недостатньо для практичного застосування в промисловості (наприклад, для нанесення покриттів). Тому його найбільш поширене застосування відноситься до інгаляційної терапії та зволожувачів повітря. У свою чергу, концепція ультразвукового розпилення рідини в шарі полягає в тому, що рідина у вигляді тонкої плівки розпадається на дрібні краплі при русі по вібруючій поверхні (частота > 20 кГц). Дві основні гіпотези, а саме гіпотеза капілярної хвилі та гіпотеза кавітації, були запропоновані для пояснення концепції розпаду рідини під час ультразвукового розпилення. Гіпотеза капілярної хвилі базується на критеріях нестабільності Тейлора. Ланг вимірював поверхневі збурення, фотографуючи піки капілярної хвилі на вібруючій поверхні. Вважається, що очевидна кореляція між середнім діаметром краплі та довжиною хвилі капілярних хвиль підтверджує теорію капілярних хвиль.

Вважається, що кавітаційні бульбашки утворюються в рідинній плівці під впливом ультразвуку за умови, що рідинна плівка на вібруючій поверхні має певну мінімальну товщину. Під час імпульсивного колапсу цих порожнин, особливо при імпульсії порожнин поблизу поверхні рідини, утворюються стрибки тиску високої інтенсивності. Ці стрибки тиску ініціюють розпад рідкої плівки та викликають пряме вивільнення крапель. У цьому випадку розмір фасонних крапель також пропорційний розміру утворених кавітаційних бульбашок, тобто частоті ультразвукового впливу. Бугуславський і Екнадіосянц об'єднали ці дві теорії та запропонували кон'юнктивну теорію. Згідно з цією теорією, періодичні стрибки тиску від кавітаційних збурень генерують і взаємодіють з капілярними хвилями кінцевої амплітуди та руйнують і збуджують їх з утворенням крапель. Слід також зазначити, що кавітаційний удар (який, по суті, є статистично випадковим явищем) призводить до нерівномірного випадкового розпаду, і спостережувана нерівномірність розподілу крапель підтверджує цю теорію.

Оскільки більшість крапель утворюється через генерацію капілярної хвилі, діаметр краплі можна досить точно оцінити за допомогою рівняння Ланга:

$$D_1 = 0.34\lambda = 0.34 \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}} \quad (2.1)$$

Використання цього рівняння виправдано тим, що діаметр крапель аерозолі визначається частотою ультразвукових коливань, прикладених до плівки рідини. Із збільшенням частоти діаметр утворених крапель зменшується. Очевидно, що пропорційно зменшується продуктивність обприскування, що описується відомим рівнянням:

$$P_1 = 2 \frac{f}{\lambda^2} \pi \frac{D_1^3}{6} \quad (2.2)$$

З наведених виразів випливає, що продуктивність обернено пропорційна частоті обприскування. На практиці залежність від частоти не є лінійною, що

ультразвукового наплення з підведенням акустичної енергії до рідини через газ. Концепція реалізації запропонованої методики ультразвукового наплення пояснюється схемою, представленою на рисунку 2.1.

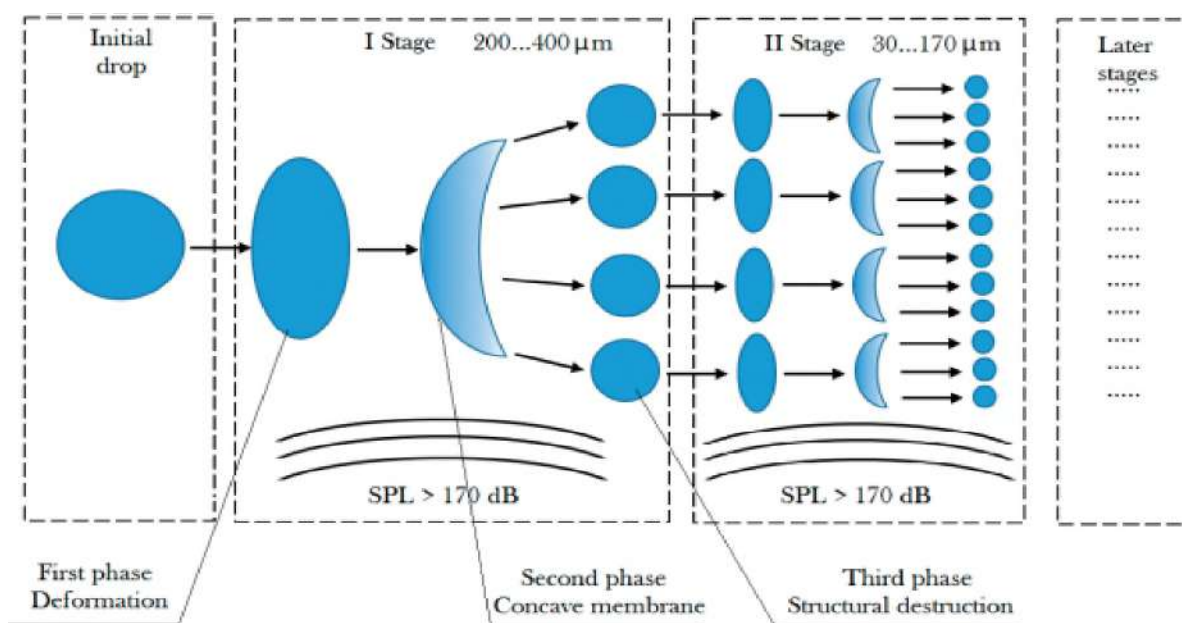


Рисунок 2.1 – Метод багатоступеневого ультразвукового наплення

Запропонований спосіб полягає в тому, що розпилювану рідину піддають диспергування на великі краплі будь-яким відомим способом розпилення, що забезпечує достатню продуктивність при великих діаметрах крапель до кількох міліметрів (наприклад, гідравлічним та ультразвуковим обприскування при низькій частоті впливу тощо) на першому етапі. Продуктивність початкового утворення великих крапель визначатиме продуктивність загального багатоступінчастого процесу. Початкові краплі, створені з високою продуктивністю, які знаходяться в повітрі та рухаються в напрямку сили тяжіння (або потоку газу, що транспортує краплі), піддаються впливу ультразвукових коливань (стояча ультразвукова хвиля) з боку газу. Завдяки цьому краплі деформуються і руйнуються, а дисперсний склад крапель зазнає подальшої еволюції. Описаний процес повторюється для кожної з новоутворених крапель багато разів, стільки разів, скільки краплі взаємодіють із пучністю швидкості в стоячій ультразвуковій хвилі. Процес деформації та

руйнування краплі під час перебування краплі в ультразвуковому полі триває до тих пір, поки сили поверхневого натягу не зрівняються з силами акустичного поля. Таким чином, рівень звукового тиску є основною величиною, що визначає мінімальний розмір, до якого може згорнутися крапля. Аналізуючи сили, що діють на частинку, можна визначити величину порогової інтенсивності руйнування частинки:

$$I_t = 2W_1 \left(\frac{\sigma_{stp}}{D\omega\rho_l} \right)^2 \quad (2.3),$$

де σ_{stp} – сила частинки, ω – частота випромінювання, ρ_l – це щільність рідини, $W_1 = \rho_1 c$ – хвильовий опір, і c – швидкість звуку.

Слід мати на увазі, що сила води σ_{stp} при імпульсному впливі на кілька порядків менше еталонного (теоретичного) значення. Рівняння для мінімального діаметра краплі, при якому крапля може розпастися за заданого рівня інтенсивності впливу I отримується з рівняння:

$$D_{min} = \frac{\sigma_{stp}}{\omega\rho_l} \sqrt{\frac{2W_1}{I}} \quad (2.4),$$

де інтенсивність впливу пов'язана з рівнем звукового тиску p за відомим співвідношенням:

$$I = \frac{p^2}{2W_1} \quad (2.5)$$

Таким чином, існує граничний розмір, до якого крапля може бути зруйнована, залежно від інтенсивності ультразвукових коливань. При низькій інтенсивності ультразвукових коливань цей розмір буде більше початкового розміру крапель, а значить, вони не будуть руйнуватися. У такому випадку первинні краплі генеруються з високою продуктивністю (наприклад, 100µм) буде піддаватися впливу ультразвукових коливань (стоячої ультразвукової хвилі) з боку газу, наприклад, 3...5 разів (етапів) при русі в напрямку сили тяжіння (або потоку газу, що транспортує краплі), що забезпечить утворення частинок із середнім розміром менше 40µм. Кількість етапів буде визначатися кількістю антивузлів на шляху краплі.

2.3 Ультразвуковий випромінювач

Для практичної реалізації запропонованої технології багатоступінчастого ультразвукового наплення розроблено ультразвуковий випромінювач у вигляді порожнистого згинально-коливального циліндра (трубчастий випромінювач). Випромінювач являє собою циліндр зі ступінчасто змінним перерізом, який створює згинально-діаметральні коливання з частотою понад 20 кГц. Для цього випромінювача була обрана порожниста форма циліндра з метою забезпечення самофокусування ультразвукових коливань у внутрішній порожнині на осі циліндра. Застосування даного типу випромінювача дозволяє генерувати регулярну структуру коливань великої довжини. Краплі рідини, які постійно проходять максимумами швидкості стоячої хвилі всередині циліндричного випромінювача, деформуватимуться та згортатимуться, доки не досягнуть мінімально можливого розміру частинок для рівня звукового тиску, створюваного випромінювачем.

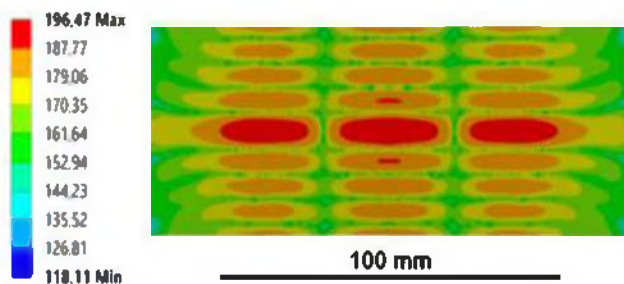
Щоб забезпечити достатню інтенсивність ультразвукових коливань на високих ультразвукових частотах, як п'єзоелектричний перетворювач може бути використаний мультипакетний перетворювач із радіально розташованими датчиками Ланжевена. Оцінку акустичних і геометричних параметрів і розрахунок форми коливальної хвилі випромінювача проводили за допомогою модального аналізу в системі скінченно-елементного моделювання (пакет ANSYS, вер. 19.2).

Тетраедричний тип скінченного елемента використовувався для оцінки та аналізу характеристик ультразвукового випромінювача, що піддається впливу об'ємного напруженого стану. Під час виконання модального аналізу аналізувалася збіжність чисельних результатів для різних конструкцій емітера. Результат моделювання, що відповідав скінченно-елементній моделі з мінімізованою кількістю скінченних елементів, збільшення якої призводить до зміни основних значень розрахункових параметрів (наприклад, власної частоти коливань) не більш ніж на 0,2–0,5 %, визнано задовільним.

Ультразвукове поле, створюване трубчастим випромінювачем, було оцінено методом кінцевих елементів у ANSYS. Використовувався гармоакустичний модуль гармоакустичного аналізу. При моделюванні на основі отриманих розрахункових даних задавалися граничні умови із зазначенням параметрів циліндричного емітера (частота коливань і розподіл амплітуд коливань імітуючої поверхні). Обсяг розрахункової області обмежувався внутрішньою поверхнею трубчастого емітера. Граничні умови встановлювалися на кінцях розрахункової області: радіаційна межа. Під час оцінки акустичного поля проводилось ітераційне варіювання розмірів трубчастого випромінювача для забезпечення режиму стоячої хвилі у внутрішньому просторі випромінювача. На рисунку 3 показані результати оцінок розподілу звукового тиску, створюваного в випромінювачі, і зображення виготовленого випромінювача.

Результати розрахунків свідчать про наявність умов і достатнього рівня звукового тиску в об'ємі камери багатоступінчастого наплення (понад 190 дБ) для здійснення багатоступінчастого наплення. Уздовж осі випромінювача утворилися три максимуми звукового тиску. Таким чином, крапля, що рухається всередині випромінювача, зазнає до трьох стадій розпаду.

Для підтвердження оцінок було виміряно рівень звукового тиску всередині виготовленого випромінювача. Вимірювання проводили шумоміром/віброметром Екофізика-110А з мікрофоном ВМК-401. Вимірювання показали, що рівень звукового тиску, який формується всередині трубчастого випромінювача, знаходився в межах 170...182 дБ. Вимірювання проводилися при максимальному споживанні електроенергії.



a)



б)

Рисунок 2.3 - Ультразвуковий трубчастий випромінювач: (а) розподіл звукового тиску всередині випромінювача; (б) зображення ультразвукового трубчастого випромінювача.

Визначено акустичну потужність розробленого випромінювача. Вона визначалася як різниця між загальною електричною потужністю, спожитою випромінювачем, і потужністю власних втрат випромінювача. Методика вимірювання полягала в наступному.

Сумарну електричну потужність, споживану ультразвуковим випромінювачем від генератора, визначали як суму акустичної потужності, що виділяється в газове середовище, і потужності власних втрат у випромінювачі. Акустична потужність, що випромінюється в газоподібне середовище, пропорційна густині газу, помноженій на швидкість звуку в газі. Відповідно, якщо щільність газу зменшити до значень, близьких до нуля (шляхом відкачування газу з об'єму, в якому встановлений випромінювач), то акустична потужність також стане нульовою. При цьому споживана від генератора електрична потужність зменшиться і стане рівною потужності власних втрат у матеріалі емітера. Таким чином, акустична потужність випромінювача може бути визначена як різниця між електричною потужністю, споживаною випромінювачем від генератора при нормальному тиску, і електричною потужністю, споживаною від генератора, коли випромінювач працює у вакуумі. Втрату потужності оцінювали шляхом вимірювання потужності, споживаної

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

КПТР.021029.01.08 ПЗ

Арк.

46

емітером при роботі без навантаження. Для цього випромінювач поміщали у вакуумну камеру. Повітря відкачували з вакуумної камери до залишкового тиску не більше 1000 Па. Електроенергію, споживану емітером, вимірювали вимірювальним приладом MT-1010 (Motech Industries Inc., Тайвань).

Таблиця 2.2 - Основні параметри розробленого трубчастого випромінювача

Параметр	Значення
Розміри трубчастого емітера, мм	D2 = 92
	D1 = 52
	L = 96
Частота вібрації, кГц	22.2
Споживана електроенергія, Вт	50
Амплітуда (розгортка) коливань поверхні, max-min	51 - 40
Акустична потужність, ВТ	35

Для експериментальної оцінки доцільності та ефективності запропонованого способу багатоступінчастого розпилення рідин розроблено випробувальний стенд. Конструктивну схему випробувального стенду та його зображення наведено на рисунку 2.4. Випробувальний стенд дозволяє здійснювати високошвидкісну відеофіксацію процесу розпаду краплі та оцінювати дисперсійні характеристики утвореного аерозолю залежно від рівня звукового тиску та властивостей рідини. Випробувальний стенд складається з ультразвукового трубчастого випромінювача (3) з п'єзоелектричним перетворювачем, що живиться від електронного генератора ультразвукової частоти (4), дозатора (1) з встановленим соплом (2) і оптичний аерозольний аналізатор (6) від Malvern SprayTec. Принцип роботи аналізатора заснований на лазерній дифракції. Аналізатор Spraytec дозволяє вимірювати дисперсність частинок з частотою до 10 кГц в діапазоні від 0,1 до 2000µм. Під час

Візуальне спостереження та аналіз динаміки деформації та руйнування крапель рідини в звуковому полі проводили за допомогою високошвидкісної відеокамери «ВідеоСпринт». Частота кадрів становила 5000 кадрів/с.

В якості прикладу рідини для розпилення використовували воду, водні розчини гліцерину (різної в'язкості) і спирт (різного поверхневого натягу).

2.4 Динаміка розпаду краплі

Для дослідження динаміки першої стадії розпаду краплі рідини відеокамеру фокусували на ділянку на осі трубчастого емітера, розташовану на 20 мм нижче верхнього торця емітера (перша стадія розпаду краплі). Записи деформації та розпаду краплі із зазначеними часовими відмітками наведені на рисунку 5. Рівень звукового тиску всередині трубчастого випромінювача становив 175 дБ.

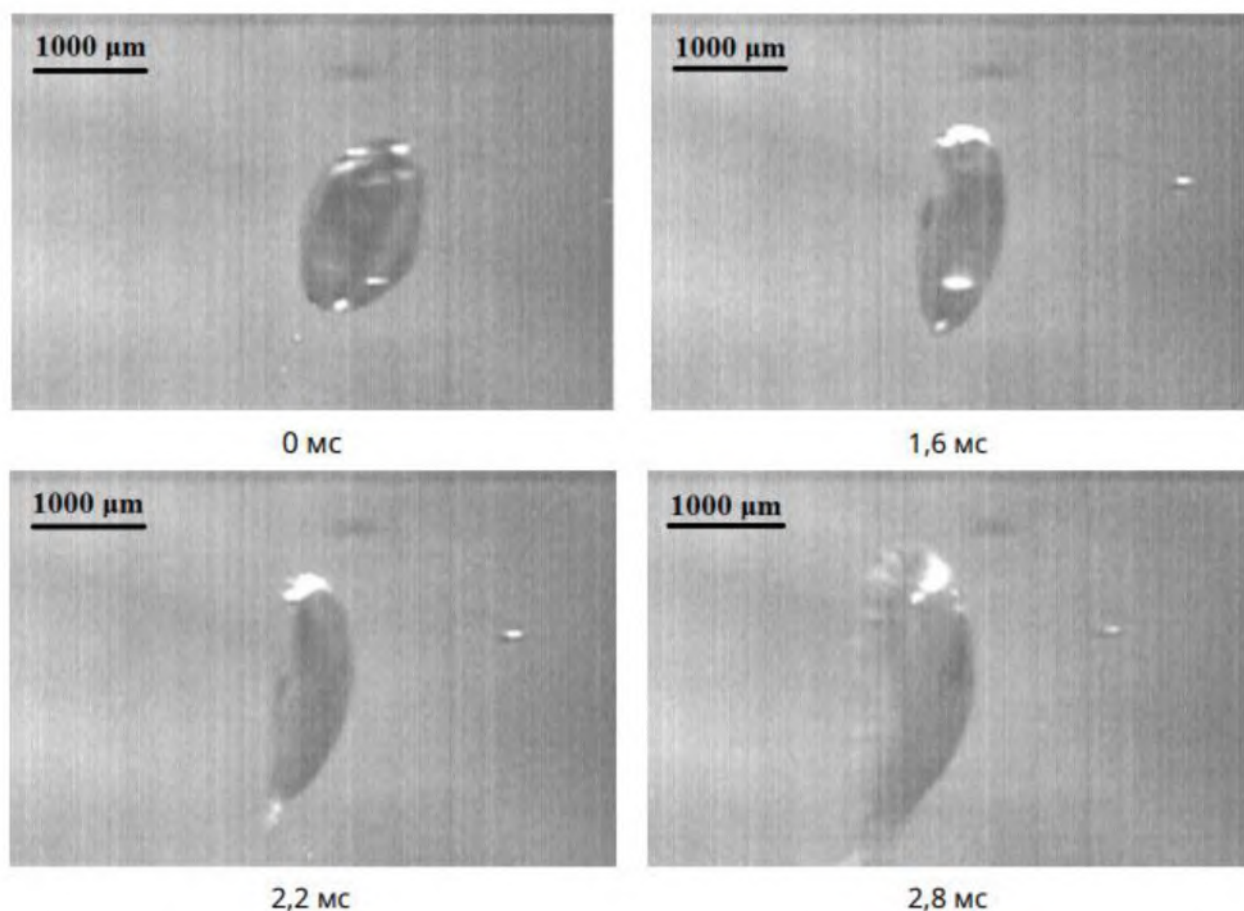
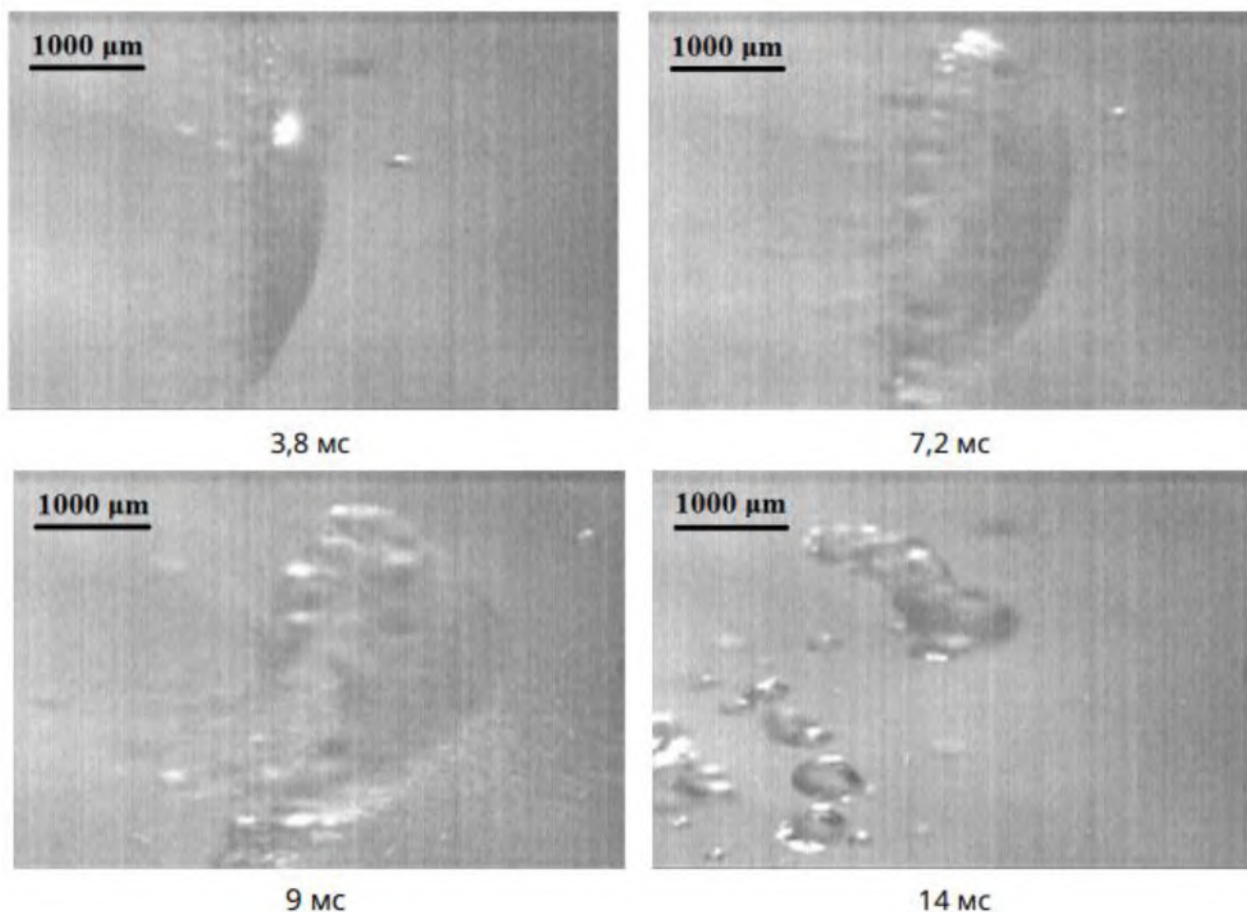


Рисунок 2.5 – Зображення первинного розпаду краплі



Продовження рисунка 2.5

Представлена послідовність високошвидкісних відеокадрів вказує на те, що крапля піддається серії деформацій, перебуваючи в ультразвуковому полі, перш ніж розпастися на менші краплі.

На першому етапі можна виділити такі фази деформації та розпаду краплі:

1. Перша фаза: Початкова крапля, що має початковий імпульс (отримана шляхом дроблення струменя рідини на виході з сопла) деформується при наближенні до області пучності швидкості в стоячій хвилі. Крапля під дією радіаційного тиску приймає форму увігнутої мембрани (диска).

2. Друга фаза: зі збільшенням діаметра рідкої мембрани та збільшенням ступеня її увігнутості товщина рідкої плівки зменшується. Капілярні хвилі Фарадея генеруються на поверхні рідкого диска під впливом ультразвукових

структуруючу дію (вибіркове руйнування найбільших крапель). Усі зафіксовані зображення деформації та розпаду краплі на другому та наступних етапах наведено на рисунку 6.

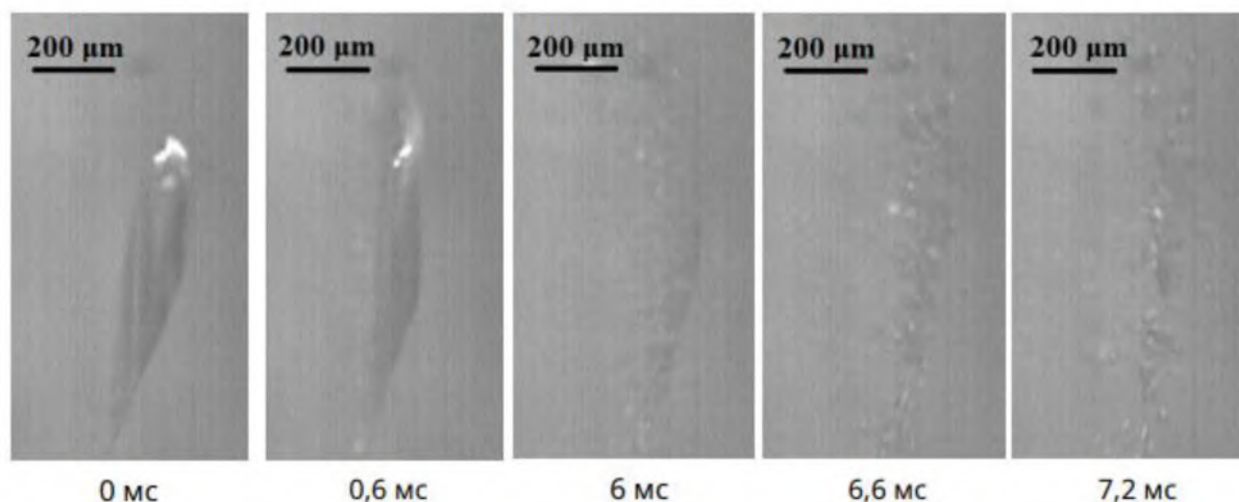


Рисунок 2.6 – Зображення вторинного розпаду краплі (другий етап)

Як видно із зображень, представлених на рисб, вторинний і подальший розриви також деформують краплі в плоский диск. Однак меніск не утворюється через менший діаметр краплі. Завдяки цьому хвилі Фарадея збуджуються по всій поверхні диска. В результаті диск розпадається на дрібні краплі, діаметр яких пропорційний довжині збуджуваної капілярної хвилі. У той же час, оскільки капілярні хвилі, що збуджуються ближче до краю диска, мають меншу довжину хвилі, краплі, що утворюються з країв диска, також матимуть менший діаметр. Це пояснює розкид діаметрів крапель відносно середнього діаметра.

2.5 Дисперсійні характеристики утворених крапель

Для підтвердження придатності запропонованої методики обприскування досліджували дисперсний склад крапель, утворених розпилюваною водою (відстояною, водопровідною, температура 23°C) проаналізовано. Рівень звукового тиску становив 182 дБ. Продуктивність подачі води дорівнювала 5 мл/с. Початковий розмір крапель, введених у трубчастий емітер, дорівнював

з тим, що використовувана ультразвукова частота (22,2 кГц) значно вища, ніж необхідна для коагуляції утворених крапель рідини, і не надає їм коливального руху. Цей факт буде предметом майбутніх досліджень.

Встановлено, що утворюються краплі мають менший діаметр, ніж такі ж, отримані відомим методом ультразвукового розпилення рідини в шарі при тій же частоті впливу. Запропонована техніка багатоступеневого розпилення забезпечує середній діаметр (за Саутером) 120μм проти 34μм для ультразвукового напилання в шарі рідини. Це забезпечує значно вищу (більш ніж у 10 разів) продуктивність напилання, ніж у відомих методах ультразвукового напилання.

2.6 Залежність діаметра краплі від швидкості розпилення

Рисунок 2.8, показує гістограми розподілу крапель по діаметру для підвищеної швидкості подачі рідини 10 мл/с.

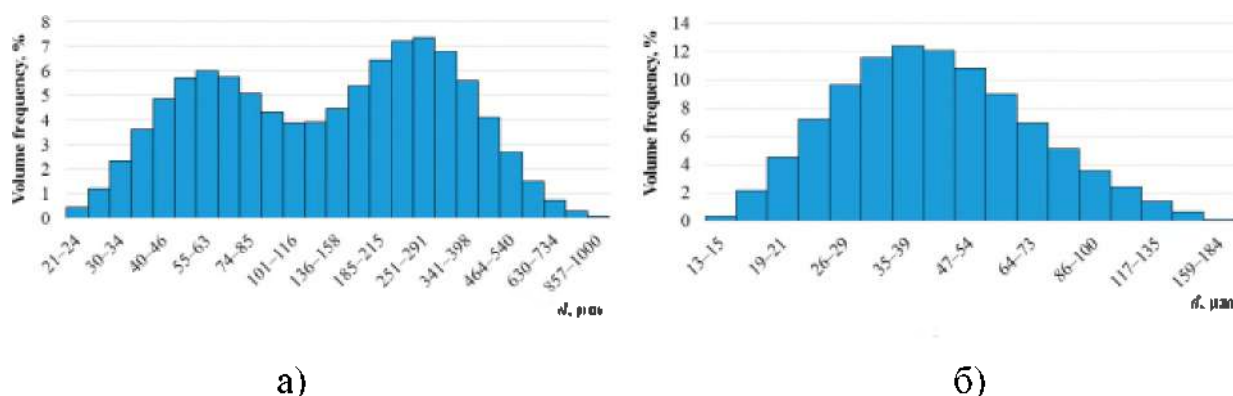


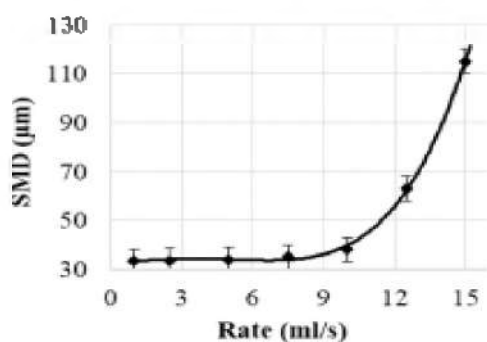
Рисунок 2.8 - Гістограми розподілу крапель по діаметру при підвищеній швидкості 10 мл/с: (а) після першого етапу руйнування; (б) на виході трубчастого емітера.

При збільшенні витрати рідини на першому етапі обприскування зростає частка крупних крапель. Аналіз зареєстрованих зображень розпаду крапель при збільшеній швидкості подачі рідини показав, що за рахунок збільшення швидкості викиду первинних крапель із сопла швидкість подачі збільшувалася

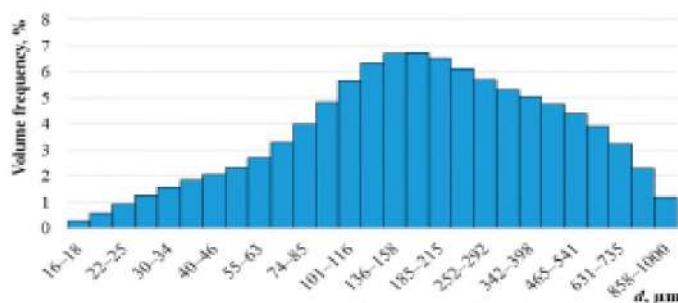
за рахунок підвищення тиску рідини в соплі. Оскільки краплі рухалися в область антивузла з більшою швидкістю, час розвитку їх структурної нестабільності зменшувався. І, навпаки, зменшився час утворення дрібних крапель за рахунок капілярних хвиль Фарадея. Крім того, підвищена концентрація вторинних крапель, що розлітаються після розпаду первинної краплі, що призводить до збільшення ймовірності їх коагуляції, може призвести до утворення більшої кількості великих крапель.

У свою чергу, дисперсний склад аерозолу після проходження всіх етапів розпилення трокси зміщується в область більших частинок (діаметр Заутера 38 μ m). Збільшення середнього діаметра становило не більше 5 μ m. Той факт, що краплі послідовно сповільнювалися, коли вони проходили крізь вузли швидкості ультразвукової вібрації, корелює з відсутністю значного збільшення розміру частинок зі збільшенням продуктивності розпилення. В результаті час впливу краплі на пучності швидкості ультразвукових коливань був достатнім для генерації капілярних хвиль Фарадея по всій поверхні краплі (сплющеної в диск). У результаті утворювалися дрібні краплі, пропорційні довжині збуджуваних капілярних хвиль.

Залежність середнього діаметра утворених крапель від швидкості подачі розбризкуваної рідини наведена на рисунку 2.9 (а). Кожна експериментальна точка на рисунку 2.9 (а) було отримано шляхом усереднення 10 вимірювань діаметра Sauter (визначено за допомогою Malvern SprayTech). Рисунок 2.9 (б) показує гістограму розподілу діаметра краплі для максимального виходу.



а)



б)

Рисунок 2.9 - Характеристики дисперсії крапель при різних швидкостях: (а) залежність середнього діаметра від швидкості подачі; (б) гістограма розподілу крапель по діаметру при максимальній швидкості (15 мл/с).

Таким чином, встановлено, що характеристики крапель залишаються практично постійними в широкому діапазоні зміни продуктивності аерозологенерації. Незначне збільшення середнього діаметра утворених крапель асоціювалося зі збільшенням ймовірності коагуляції крапель зі збільшенням їх концентрації. Однак коли продуктивність перевищувала певне граничне значення (залежно від розмірів емітера; для досліджуваної конструкції — 10 мл/с), середній діаметр краплі починав суттєво зростати (рисунок 2.9 (а)). Вона продовжувала зростати до значень, що відповідають середньому діаметру великих крапель, отриманих на першому етапі розпаду крапель. У цьому випадку гістограма розподілу крапель по діаметру набуває вигляду, зображеного на рисунку 2.9 (б).

2.7 Залежність від в'язкості рідини

Як зазначалося вище, в'язкість є однією з основних фізичних властивостей рідини, яка впливає на дисперсні характеристики утворених крапель рідини. Для аналізу впливу в'язкості рідини на дисперсний склад отриманого аерозолу використовували водний розчин з об'ємним вмістом гліцерину 20 %; 30%; 40%; 50%; і використано 60%. В'язкості рідини становили

відповідно: 1,8; 2,5; 3,7; 6,0; і 10,8 мПа·с. Рівень звукового тиску становив 182 дБ, а швидкість потоку рідини – 5 мл/с. Гістограми розподілу крапель по діаметру при розпиленні рідин різної в'язкості представлені на рисунку 2.10. Як видно з гістограм, зі збільшенням в'язкості рідини діаметри крапель мають тенденцію до міграції в область великого діаметра. Розкид крапель відносно середнього діаметра також збільшується. Наприклад, при в'язкості рідини 1,8 мПа·с, середній діаметр утворених крапель становить 34μм, а при збільшенні в'язкості до 10,8 мПа·с, середній діаметр збільшується до 57μм. Залежність середнього діаметра утворених крапель від в'язкості рідини представлена на рисунку 2.11. Кожна експериментальна точка на рисунку 2.11 була отримана шляхом усереднення 10 вимірювань діаметра Sauter (визначених за допомогою Malvern SprayTech). Експериментальні дані задовільно відповідають поліноміальній регресії. Смуги помилок вказують на стандартне відхилення.

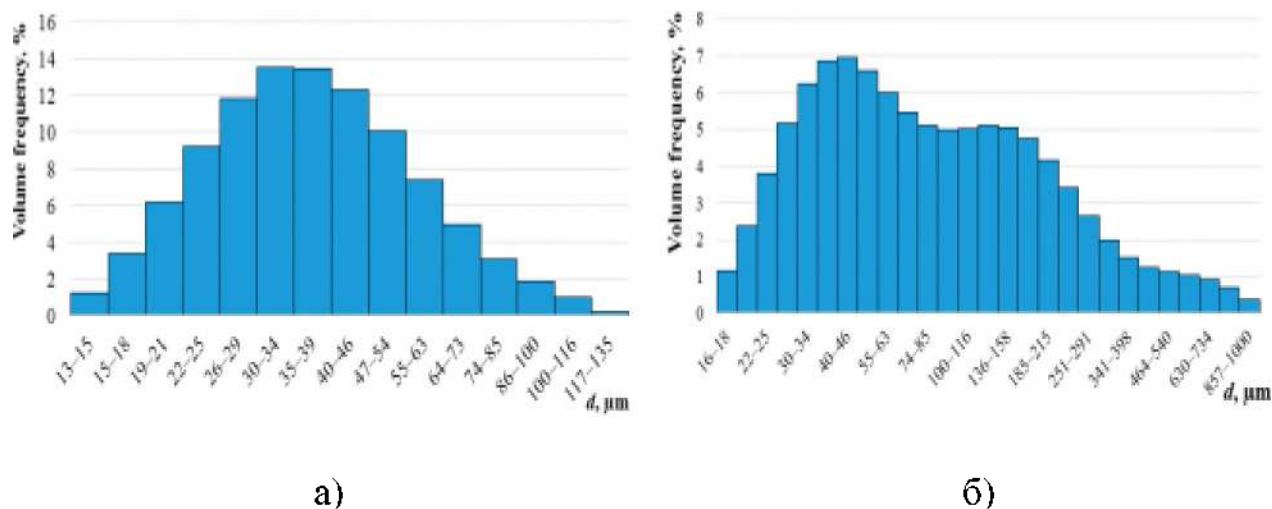


Рисунок 2.10 - Гістограми розподілу крапель рідини по діаметру при різних в'язкостях рідини: (а) 1,8 мПа*с; (б) 10,8 мПа*с

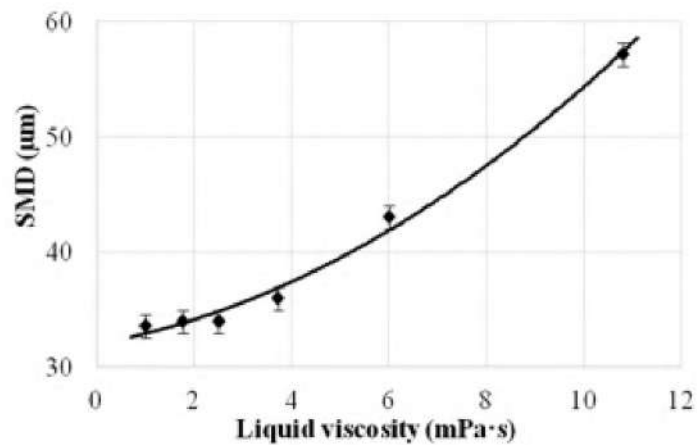


Рисунок 2.11 - Залежність середнього діаметра краплі від в'язкості рідини.

Наведена залежність показує, що в'язкість рідини мало впливала на діаметр утворених крапель. В діапазоні в'язкості від 1 мПа*с (вода) до 3,7 мПа*с (40% водний розчин гліцерину), слабке збільшення середнього діаметра утворених крапель (не більше 2μm) спостерігалось. Подальше збільшення в'язкості рідини призвело до збільшення середнього діаметра отриманих крапель до 57μm. Мабуть, це пояснюється тим, що сили в'язкого тертя перешкоджають розвитку хвиль Фарадея і утворенню більш дрібних крапель. При цьому більшість крапель утворюється за механізмом структурного розпаду краплі рідини (великі краплі розміром понад 100 μm утворюються).

3. БЛОК ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АПАРАТУ РОЗПИЛЕННЯ РІДИН В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОЛІ

3.1 Опис та принцип роботи лабораторного блоку живлення

Лабораторний блок живлення складається з таких основних блоків: первинного джерела живлення, що призначений для гальванічної розв'язки від мережі живлення та пониженню напруги для блоку регулювання; блок регулювання – основна силова аналогова частина, що здійснює регулювання напруги та струму в залежності від параметрів установлених мікроконтролером, а також забезпечує компенсацію падіння напруги на струмовимірювальному резисторі; блок керування та індикації інформації – забезпечує керування всією системою, обробку даних про поточні значення напруги на виході блоку живлення, струм споживання навантаженням; індикація напруги, струму та поточному стані блока живлення, вмикання/вимикання навантаження, індикація перевищення струму навантаження.

Функціональна схема лабораторного блоку живлення наведена на рисунку 1. Блок регулювання представляє безтрансформаторний стабілізатор зі зменшенням напруги, що складається з ключа (DA1), дроселя L, діода VD2, конденсатора C. Коли ключ на DA1 замикає коло, струм від джерела тече через дросель L в навантаження. ЕРС самоіндукції дроселя скерована проти напруги джерела напруги. В результаті напруга на опорі навантаження дорівнює різниці напруг джерела і ЕРС самоіндукції дроселя, струм через дросель росте, як і напруга на конденсаторі C і навантаженні. При розімкнутому ключі на DA1 струм продовжує текти через дросель в тому ж напрямку через діод D і навантаження, а також конденсатор C. ЕРС самоіндукції прикладена до опору R через діод D, струм через дросель зменшується, як і напруга на конденсаторі C і на навантаженні.

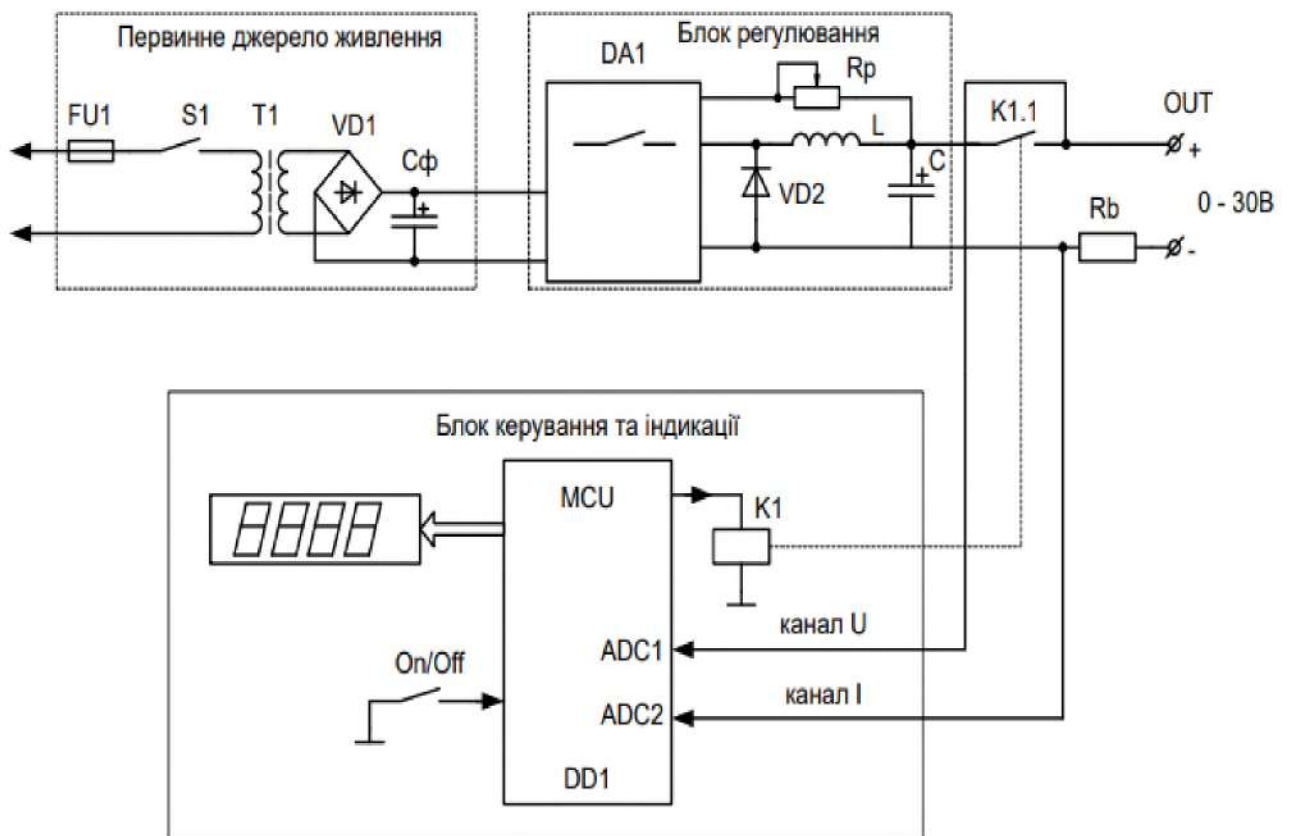


Рисунок 3.1 - Функціональна схема лабораторного блоку живлення

Практична схема лабораторного блоку живлення наведена на рисунку 3.1. Блок регулювання виконаний на спеціалізованій мікросхемі DA1 LM2596 фірми National Semiconductor, що представляє собою імпульсний широтноімпульсний модулятор (ШИМ) - регулятор напруги. Генератор виробляє імпульси частотою 150 кГц на виводі 2 (OUT) DA1. Відбувається накачування напруги на підключений до виводу 2 індуктивності L2 та конденсаторів C10, C11. Вхід FEEDBACK (вивід 4) – контрольний, він вимірює вихідну напругу, після чого відбувається корекція шпаруватості вихідних імпульсів так, щоб вихідна постійна напруга відповідала нормі. В мікросхемі для встановлення напруги використовується зовнішній резистивний дільник R2, R3. Дільник повинний бути зроблений так, щоб на вході FEEDBACK була напруга 1.23В. Вхід ON/OFF (вивід 5) дозволяє заблокувати перетворювач. У робочому режимі на даному вході повинний бути нуль. Змінюючи параметри

зворотного зв'язку, за допомогою R3, змінюється шпаруватість імпульсів на виході мікросхеми DA1, і проходячи через LC – фільтр L2, C10, C11 формується постійна напруга від 1,5В до 31,5В.

Основу блок керування та індикації інформації складає мікросхема DD1 ATtiny861 фірми Atmel. В її складі маються 10-розрядні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Джерелом зразкової напруги 5 В для АЦП є живлення мікроконтролера (МК), що подається на 15 вивід через фільтр L1C6C7.

Як давач струму, що споживає навантаження, використовується потужний без індукційний резистор малого опору R8. Величина падіння напруги на ньому подається для аналізу на АЦП (ADC9, вивід 9) DD1.

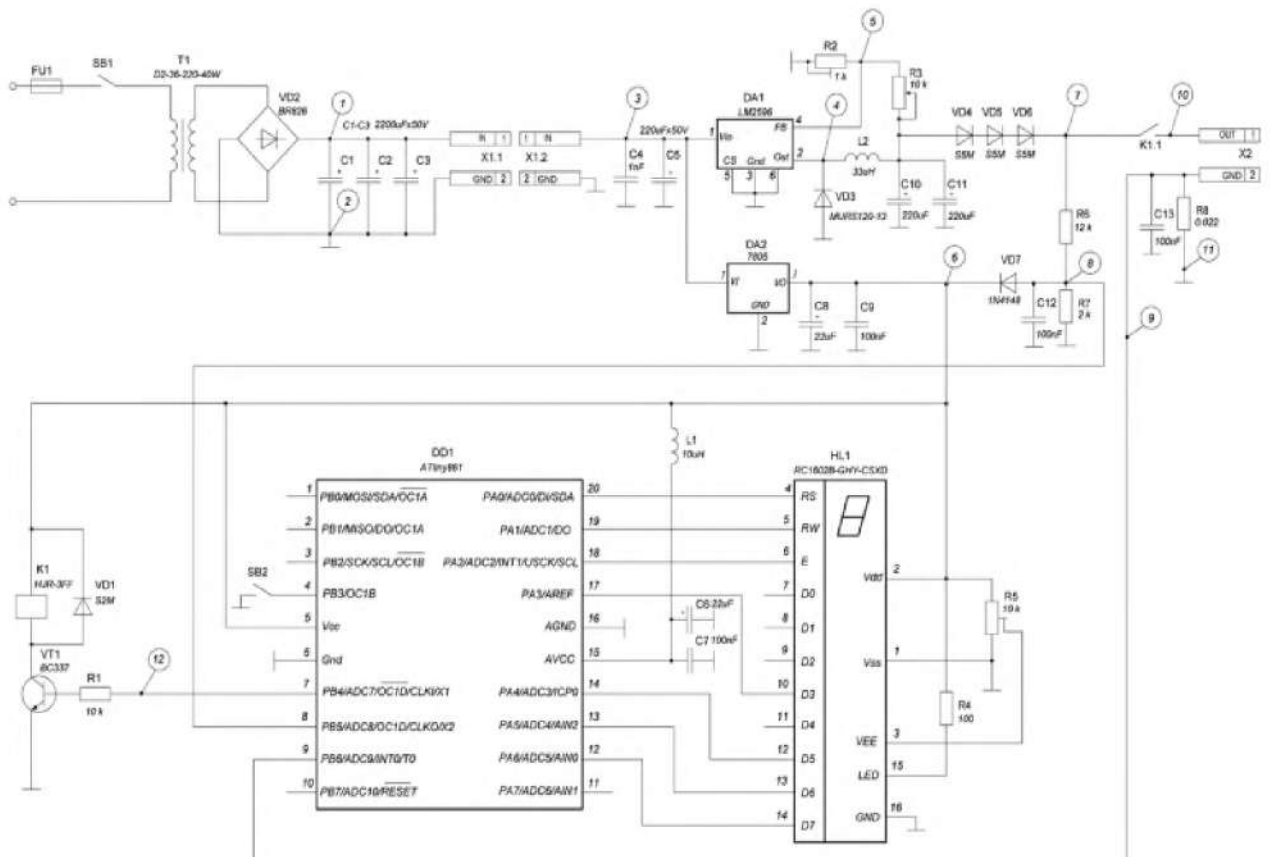


Рисунок 3.2 - Схема електрична принципова лабораторного блоку живлення

Продовження таблиці 3.1

Таймери/Лічильники	1 x 16-бітний, 2 x 8-бітні
АЦП	10 біт, 8 каналів
Компаратор	Вбудований
Генератор тактових імпульсів	Вбудований
Інтерфейси	SPI, USI (Universal Serial Interface), I2C
Енергоспоживання в режимі сну	Менше 0.1 мкА

КПТР.021029.01.08 ПЗ

Арк.

64

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційного проєкту вирішено завдання, яке полягало в дослідженні та вивленні ключових моментів високочастотного напилення. Було ознайомлено з характеристиками поверхневих покриттів, досліджено алгоритм підготовки поверхні.

Крім цього у цьому дослідженні було запропоновано метод багатоступеневого розпилення, що полягає в генерації великої кількості частинок великого початкового діаметру (для забезпечення високої продуктивності) та їх подальшого руйнування в періодичному ультразвуковому полі (для забезпечення малих розмірів крапель при високій продуктивності).

Для практичної реалізації методу розроблено ультразвуковий випромінювач у формі циліндра зі ступінчасто змінним перерізом для формування згинально-діаметральних коливань. Форма цього випромінювача у вигляді порожнистого циліндра була обрана для забезпечення самофокусування ультразвукових коливань у внутрішній порожнині на осі циліндра. Розроблений випромінювач забезпечує генерацію періодичного ультразвукового поля з частотою 22,2 кГц і рівнем звукового тиску до 182 дБ. Конфігурація ультразвукового поля всередині випромінювача забезпечує триступеневе розпилення.

Після завершення дослідження переконались, що хоч такий метод напилення не новий і не зовсім простий, але він досі залишається актуальним.

					КПТР.021029.01.08 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		65

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кваліфікаційний проєкт : методичні вказівки щодо його підготовки та виконання здобувачами вищої освіти (ОР «бакалавр») спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / уклад.: С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк, О. С. Пивовар. Хмельницький: ХНУ, 2021. – 71 с.

2. Бойко Ю.М. Текстові документи. Загальні вимоги СОУ 207.01:2017 / Ю.М. Бойко, Г.В. Красильникова, Л.І. Першина, Т.Ф. Косянчук. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 45 с.

3. Хмельов В.Н.; Шалунов А.В.; Голих Р.Н.; Нестеров В.А.; Доровських Р.С.; Шалунова А. В. Визначення режимів і умов ультразвукового розпилення, що забезпечують задану продуктивність і дисперсні характеристики аерозолію. 2017. - 67 с.

4. Хмельов В.Н.; Шалунов А.В.; Нестеров В. А. Сумування коливань високочастотних перетворювачів Ланжевена для підвищення потужності ультразвукового випромінювача. ультразвуку 2021. – 114 с.

5. Кустрон, П.; Корженювський, М.; Сайбура, А.; Пивоварчик, Т.; Качинський, П.; Соколовський, П. Розробка ультразвукової системи високої потужності, призначеної для розпилення металевого порошку. 2023. – 98 с.

6. Основи регулювання та ремонту РЕА [Електроний ресурс] /Конструювання, виробництво та технічне обслуговування радіотехнічних пристроїв. – Режим доступу: http://radio_vtc.inf.ua/zagal.html, вільний. – Загл. з екрана. – Мова укр.

7. Кузнецов, В., та ін. "Недавні досягнення у високопотужному імпульсному магнетронному розпиленні (HiPIMS): Виклики та застосування у виготовленні тонких плівок VO₂." *AIP Advances*, т. 7, вип. 11, 2017, с. 115203-115212.

8. Гудмундссон, Дж.Т., та ін. "Теорія та молекулярне моделювання плазмового розпилення." *Applied Physics A*, т. 126, вип. 10, 2020, с. 1-14.

					КПТР.021029.01.08 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		66

9. Вельцель, У., та ін. "Магнетронне розпилення для розробки наноструктурованих матеріалів." *Surface and Coatings Technology*, т. 334, 2018, с. 36-45.

10. Аламе, К., та ін. "Матеріали тонких плівок на основі оксидів та металодіелектриків, підготовлені методом радіочастотного магнетронного розпилення для специфічних застосувань." *Materials*, т. 12, вип. 20, 2019, с. 3448-3460.

11. Саракінос, К., та ін. "Вступ до обробки тонких плівок за допомогою високопотужного імпульсного магнетронного розпилення (HiPIMS)." *Applied Physics A*, т. 126, вип. 10, 2020, с. 1-15.

12. Мохаммаді, М., та ін. "Радіочастотне магнетронне розпилення як інструмент для модифікації поверхонь медичних імплантатів." У: Горкі, Дж., ред. *Матеріали для розпилення в медичних застосуваннях*. IntechOpen, 2018, с. 153-175.

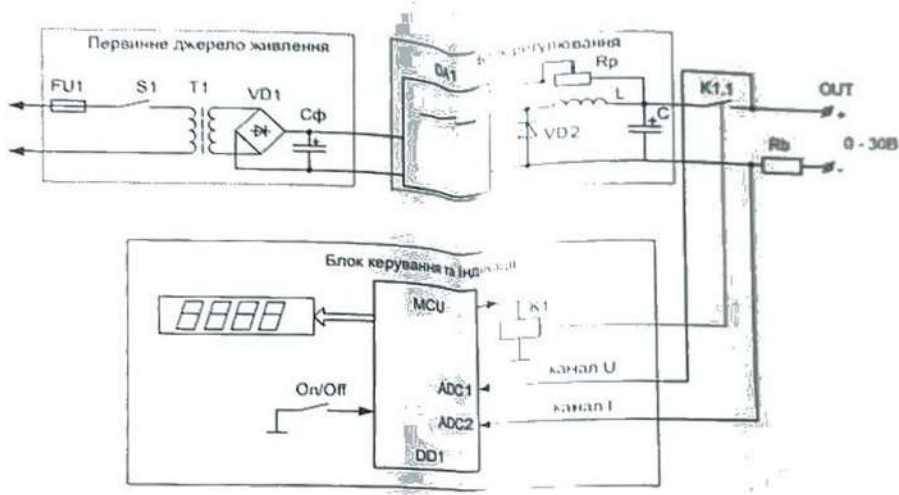
13. Андерс, А., та ін. "Покриття, створені за допомогою реактивного високопотужного імпульсного магнетронного розпилення." *Journal of Applied Physics*, т. 127, вип. 9, 2020, с. 094301-094312.

14. Парк, Дж., та ін. "Короткий огляд осадження тонких плівок з борокарбону методом радіочастотного розпилення." *Applied Physics A*, т. 125, вип. 8, 2019, с. 654-662.

15. Цай, Т., та ін. "Покриття, створені методом фізичного осадження з розпиленням (PVD): Критичний огляд." *Coatings*, т. 9, вип. 5, 2019, с. 308-320.

16. Тіварі, А., та ін. "Матеріали та інженерія структур методом магнетронного розпилення для передових застосувань." *Thin Solid Films*, т. 675, 2019, с. 78-90.

81.06.00.00.00.00



				КПТР 021029 01.08. ЕО		
№	В.контр.	Підпис	Дата	Сен встановити прилад на об'єкті і виконати налаштування	№	№
1	1029	[Signature]	08.08.21		4	
					ХНУ ТР2С-21-1	
				Контроль	Сторона 21	

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних
технологій (ТМІТ)
Підченко С.К
здобувача вищої освіти
студента 3 курсу, гр. ТР2с-21-1
Лісового Володимира
Володимировича

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення “Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті” від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційного проекту до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (іпісБеск Апгі- ПлаІагІ8т) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи зберігається (ідентична) з друкованою.

11.06.24



Лісовий В.В.

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 7%

ID: 130396 Назва: Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів Додано в БД: 2024-06-14 Автора: Лісовий Володимир Володимирович Керівники: Мішан Віктор Володимирович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	78796	1225	465 (1%)	7 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документах	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:
Kafedra TMIT KhNU

ID перевірки:
1016359467

Дата перевірки:
14.06.2024 09:59:59 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
14.06.2024 10:25:25 EEST

ID користувача:
100005657

Назва документа: Лісовий ТРС - 21-1

Кількість сторінок: 62 Кількість слів: 12470 Кількість символів: 97240 Розмір файлу: 1.22 MB ID файлу: 1016164126

8.16% Схожість

Найбільша схожість: 5.54% з Інтернет-джерелом (http://radio-vtc.inf.ua/laby/10_PS.pdf)

7.33% Джерела з Інтернету

192

Сторінка 64

2.17% Джерела з Бібліотеки

173

Сторінка 65

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

21

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджую ознайомлений з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів

Автор: **Лісовий Володимир Володимирович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: **к.т.н., доцент Мішан Віктор Володимирович**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження Запозичення у розмірі 8% (Unicheck) та 1% (Anti-Plagiarism), виявлені в роботі є випадковими і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.

11.06.2024р.

Відповідальний за перевірку Unicheck

Олег Пивовар

Відповідальний за перевірку Anti-Plagiarism

Віктор Стецюк

Керівник роботи:

Віктор Мішан

Зав.каф.ТМІТ

Сергій Підченко

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційний проект студента групи TP2c-21-1

Лісового Володимира Володимировича

“Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів”

Кваліфікаційний проект бакалавра складається із текстової частини, що складається із вступу, 3 розділів, висновків з виконання проекту, списку використаних джерел та додаткових матеріалів у кінці звіту. Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 67 сторінок і є достатнім для кваліфікаційних проектів бакалаврів. В додатках подані усі необхідні документи для захисту та підтвердження автентичності.

Перевагами кваліфікаційного проекту є дослідження, яке доводить, що високочастотне розпилення, є найкращим методом нанесення покриттів в радіотехніці та мікроелектроніці. В проекті був показаний приклад розпилення та проаналізовано матеріали якими можна покривати елементи.

Загалом кваліфікаційний проект ст. гр... TP2c-21-1 Лісового Володимира Володимировича “Процес високочастотного розпилення для виробництва тонкодисперсних матеріалів” виконано на високому технічному рівні та може бути рекомендовано до впровадження як навчально-лабораторний засіб. Проект заслуговує оцінку “добре”.

Рецензент:

*Б. М. Н., доцент катедри
Корняк Л. О.*

*AKITCAP
13.06.24р.*