

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
_____ О.К. Дідик
“ ____ ” _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Автоматизація керування процесом катодного
розпилення по каналу товщини плівки»**

**«Automated control of the cathodic sputtering process
along the film thickness channel»**

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи АК-23М-1
спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»
_____ В.М. Луньов
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
доц, канд.техн.наук
_____ О.М. Сербул
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент
доц. каф. ЕТС та ЕМ, к.т.н

« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Область застосування та призначення установки електронно-променевого напилювання.....	7
1.1 Оптоелектроніка молекулярних сполук.....	7
1.2 Опис установки електронно-променевого напилювання.....	9
2 Огляд методів нанесення органічних плівок.....	12
2.1 Фотолітографія.....	12
2.2 Осадження плівок у вакуумі.....	15
2.2.1 Термічне вакуумне напилювання.....	15
2.2.2 Розпилення шляхом іонного бомбардування.....	18
3 Опис та обґрунтування проектних рішень та їх конструкцій.....	23
3.1 Опис установки синтезу тонкоплівкових структур.....	23
3.1.1 Розробка методів осадження плівок та конструювання установки.....	26
3.2 Вибір датчика товщини плівки.....	27
3.2.1 Датчик кварцовий QS/QSM.....	35
3.3 Обґрунтування вибору мікроконтролера.....	36
4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу.....	41
4.1 Кореляційно-регресійний аналіз результатів експерименту.....	41
4.2 Визначення передаточної функції.....	47
4.2.1 Побудова моделі ланки першого порядку геометричним методом.....	50
4.2.2 Побудова моделі ланки другого порядку з використанням методом площ.....	51
4.3 Вибір апроксимуючої моделі.....	53
4.4 Дослідження динаміки системи автоматичного регулювання.....	55
4.4.1 Розробка схеми електричної структурної системи.....	55

4.4.2 Побудова АФЧХ розімкнутої системи.....	58
4.4.3 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи.....	59
4.4.4 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи.....	60
4.4.5. Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи.....	61
4.4.6. Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості.....	62
4.4.7. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.....	65
4.4.8. Побудова перехідного процесу замкнутої системи.....	66
4.4.9. Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї.....	67
4.4.10. Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками.....	70
4.4.11. Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР.....	71
5 Опис організації робіт, що пов'язані із застосуванням установки синтезу тонкоплівкових структур.....	74
Висновки.....	77
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів.....	79
Список літератури.....	80
Додатки.....	82

ВСТУП

Впровадження сучасних автоматизованих систем полягає у розробці універсальних, надійних та довговічних пристроїв, що сприяють ефективному вирішенню завдань людиною. Для високоточних виробництв особливо важливим є забезпечення високої точності позиціонування робочого органу. Мехатронна система, як комплексна структура, включає електричні та перетворювальні пристрої, систему управління, механічну передачу та робочий орган, що відповідає за рух та контроль цього руху відповідно до заданого алгоритму, реалізованого через мікрокомп'ютер або мікроконтролер.

Властивості електромеханічної системи визначаються взаємозалежними характеристиками її елементів та підсистем, таких як механічна, електрична і магнітна. Тому при поетапному проектуванні особлива увага приділяється вибору елементної бази системи, зокрема електродвигунів, інформаційних і силових напівпровідникових перетворювачів, а також статичних і динамічних характеристик як силових виконавчих елементів, так і системи управління. Важливим етапом є дослідження якості регулювання електромеханічної системи, зокрема за допомогою мікроконтролерів.

Автоматизація в будь-якому випадку сприяє зменшенню браку, покращенню якості продукції, збільшенню продуктивності праці, поліпшенню технологічних показників виробництва, а також звільненню обслуговуючого персоналу від рутинних операцій і створенню комфортніших умов праці.

Швидкий розвиток методу випаровування та конденсації у вакуумі за останні 20 років обумовлений його універсальністю, високою продуктивністю процесу нанесення покриттів, низькою енергоємністю та іншими перевагами в порівнянні з традиційними методами виготовлення покриттів для різних функціональних застосувань. Однією з головних переваг нанесення органічних плівок у вакуумі є екологічна чистота цієї технології.

Вакуумна техніка на сьогодні знаходить широке застосування в багатьох промислових галузях. Хоча її початкові сфери використання, такі як відкачка

освітлювальних електроламп та електровакуумних приладів, залишаються важливими, з появою транзисторів електронна промисловість знайшла нові способи застосування вакуумного обладнання, зокрема у виробництві високочистих матеріалів.

Вакуумна техніка також знайшла своє застосування в металургії: за допомогою вакуумної плавки метали очищаються від розчинених газів і летючих домішок, а термообробка у вакуумі дозволяє уникнути окислення та інших забруднень поверхні. Без використання вакуумної техніки неможливе виробництво хімічно чистих та жароміцних металевих матеріалів у великих масштабах. Металеві плівки та покриття, які наносяться в вакуумі, знаходять широке застосування в різних галузях промисловості — від виробництва дитячих іграшок до виготовлення оптичних приладів та електронних компонентів.

У хімічній промисловості молекулярна дистиляція при низьких температурах, що стала можливою завдяки зниженню тиску в перегінному кубі, дозволяє отримувати речовини, які за звичайного атмосферного тиску розкладаються. У медицині, біології та харчовій промисловості сублімаційне сушіння дає змогу проводити процес збезводнення при низьких температурах у вакуумі, що дозволяє зберегти цілісність матеріалів, які руйнуються при температурах, необхідних для традиційного сушіння. Без вакуумної техніки неможливе існування атомної промисловості, де вакуум використовується для поділу ізотопів, обробки матеріалів та відкачки вакуумного обладнання.

Зростаючі потреби народного господарства в покриттях різного призначення та широкий асортимент продукції сприяли розвитку великої кількості спеціалізованих вакуумних установок, створених для вирішення конкретних виробничих завдань. До таких завдань відносяться металізація рулонних і смугових матеріалів, нанесення захисних, зносостійких та декоративних покриттів на металеві та неметалічні поверхні, виготовлення плівкових елементів для виробів електронної техніки, а також дослідно-конструкторські роботи та дрібносерійне експериментальне виробництво в

галузях напівпровідникової техніки, мікросистемотехніки, нанотехнологій і мікроелектроніки.

Удосконалення вакуумного обладнання та ускладнення технологічних процесів нанесення покриттів вимагають підготовки висококваліфікованих фахівців для обслуговування такого устаткування, управління процесами нанесення різноманітних покриттів з використанням сучасних технологій, а також для контролю та регулювання процесу нанесення органічних плівок.

Розробка систем електронно-променевого напилювання для осадження надчистих покриттів є не тільки новим етапом технічного прогресу, але й ключовим напрямом у розвитку аналітичного приладобудування.

У цій магістерській роботі запропоновано вирішення важливої задачі щодо вдосконалення системи стабілізації технологічного параметра установки для синтезу органічних тонкоплівкових структур. Однак варто зазначити, що досягнення високої якості продукції та зменшення кількості дефектних виробів неможливе без врахування специфіки роботи цієї установки.

Об'єкт дослідження – це процес нанесення полімерних плівок.

Предметом дослідження виступає система стабілізації товщини плівки в процесі синтезу органічних тонкоплівкових структур.

У роботі основна увага зосереджена на стабілізації технологічного параметра, що вимагає детального аналізу важливості його підтримання, а також розгляду різних підходів до реалізації таких систем з подальшим вибором оптимального рішення. Для цього потрібно розробити функціональну та структурну схеми системи, визначити її якісні показники, побудувати перехідний процес і, у разі відхилення від заданих значень, здійснити синтез коректуючого пристрою.

1 ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ

1.1 Оптоелектроніка молекулярних сполук

Тонкоплівкові матеріали, застосовувані в фотоніці та оптоелектроніці, охоплюють фурилени, органічні барвники, металоорганічні комплекси, поліанілін, поліпаракилілен, фторопласт, поліетилен, нанокompозити, а також різноманітні комбінації, такі як полімер-барвник, полімер-елементорганіка, полімери з неорганічними сполуками та барвники з неорганічними елементами. До технологій створення органічних плівок відносяться фізичне осадження в вакуумі, хімічне осадження з газової фази, молекулярне нашарування з газової фази, адсорбція та полив з розчину [1].

Методи дослідження включають оптичну спектроскопію в інфрачервоному, видимому та ультрафіолетовому діапазонах, спектральну еліпсометрію, спектроскопію люмінесценції та математичне моделювання.

Області застосування: електролюмінісцентні екрани, органічна оптоелектроніка, електрооптичні прилади, оптичні комп'ютери, захисні шари, сорбція важких металів, біомедичні прилади, світловипромінювальні прилади, оптичний запис інформації, сенсори, нелінійна оптика, захист навколишнього середовища, сонячна енергетика.

Технологія синтезу органічних тонкоплівкових нанокompозитів та багат шарових структур включає використання полі-*p*-ксиліленових покриттів. Вихідні сполуки сублімуються при температурі 150°C і розкладаються на димери при температурі 600°C. Полі-*p*-ксиліленові покриття наносяться з газової фази при низькому тиску (від 10 до 60 Па) на попередньо охолоджені до температури нижче 250°C поверхні.

Покриття на папері та тканинах формуються на окремих волокнах, зберігаючи фактуру та колір матеріалів. Піролітична технологія застосовується для герметизації радіоелектронних виробів, зокрема для військово-морської та

авіаційної техніки, медичного обладнання, точної механіки та оптики. Обробка тканин, паперу та інших волокнистих матеріалів для надання водо- та масло-стійкості за допомогою покриттів має перевагу низьким вакуумом. Вихідні сполуки та кінцевий полімер є інертними і біосумісними [2].

Переваги процесу: можливість капсулювання дисперсних матеріалів, порошків, тканин та паперу; відсутність розчинників та потреби в додатковому затверджуванні; висока суцільність і однорідність покриття в вузьких місцях, зазорах, порах, на волокнах і гострих кромках; відсутність перегріву матеріалу; екологічна чистота, пожежна безпечність та низька матеріалоємність.

Області застосування: збереження старовинних документів, тканин та історичних артефактів; гідрофобізація металів, тканин та паперу; виготовлення точних копій поверхонь; вологозахист; виробництво електретних приладів; електроізоляція та капсулювання у мікроелектроніці та оптоелектроніці; захист біомедичних приладів і цінних паперів; капсулювання реакційноздатних речовин; виготовлення мембран.

Хімічні властивості: стійкі відносно дій луг та кислот (окрім 70% азотної кислоти); нерозчинні у всіх розчинниках при температурах 150 - 200°C.

Згідно з законом Мура, швидкість та продуктивність процесорів зростають на 10-15% щорічно, залежно від типу процесора та його елементної бази. Однак, досягнувши певної межі, цей процес може зіткнутися з фізичними обмеженнями. Теоретично, а в найближчому майбутньому і практично, сучасні процесори можуть досягти своєї критичної межі можливостей. Проблема полягає в тому, що електрони, через які проходить електричний струм, не здатні забезпечити швидкість операцій вище 10^4 год/с, що вже близьке до межі для сучасних мікропроцесорів ($2 \cdot 10^{10}$ год/с). Це вимагає пошуку нових підходів до архітектури процесорів. Одним із найбільш перспективних рішень є використання світла для передачі бітів інформації, що стане основою для розробки оптичних процесорів. Вони будуть мати ряд переваг у порівнянні з електричними процесорами:

– Швидкість передачі — частота світла становить $2 \cdot 10^{15}$ Гц, що значно перевищує швидкість роботи сучасних процесорів. Хоча досягти цієї швидкості

буде не просто, вже перші оптичні процесори зможуть стати серйозною конкуренцією для найбільш потужних електронних мікропроцесорів;

- Паралелізм — промені світла, навіть перебуваючи на дуже близьких відстанях один від одного або перетинаючись, не спричиняють перешкод, збоїв чи втрат інформації через взаємний вплив;

- Відсутність проблеми дискретності електричного заряду — хоча для фотонів існує подібна проблема, вона має іншу фізичну природу і не є настільки критичною, як проблема дискретності електричного заряду;

- Стійкість до електромагнітних полів — через свою природу електромагнітні поля не можуть впливати на світлові промені.

Отже, використання оптичних процесорів відкриває нові перспективи, зокрема у підвищенні продуктивності та надійності обробки інформації, а також у розвитку нових інформаційних технологій [3].

Існують два підходи до створення оптичних процесорів: використання голограм та застосування Булевої алгебри для обробки "0" і "1". Другий підхід ускладнений відсутністю відповідних оптичних елементів, але після стабілізації управління світловими променями стане можливим створення логічних елементів. Одним з варіантів є використання тонких органічних плівок, що дозволяють керувати інтенсивністю світла і реалізувати логічні стани. Тому розробка технологій виробництва органічних плівок є важливим завданням для оптичних процесорів.

1.2 Опис установки електронно-променевого напилювання

Установка електронно-променевого напилювання призначена для осадження тонких плівок у надвисокому вакуумі на підкладки до 150 мм. Вона використовується в наукових дослідженнях, дослідно-конструкторських роботах та експериментальному виробництві в галузях напівпровідникової техніки, мікросистемотехніки, нанотехнологій і мікроелектроніки [4].

Установка дозволяє наносити тонкі плівки п'яти матеріалів на зразки до 150 мм або кілька зразків на тримачі. Вона включає шлюз, електронно-

променевий випарник з блоком живлення 3 кВт, та використовує тиглі з графіту або кераміки. Завантаження зразків відбувається через технологічні фланці камери. Товщина і швидкість напилення контролюються кварцовим датчиком з водяним охолодженням. Установка нагріває зразки до 200°C і має можливість обертання тримача під час напилення.

Для маршового режиму використовується іонно-розпилювальний насос продуктивністю 400 л/сек. Модель оснащена компактним електронно-променевим випарником лінійного типу з п'ятьма тиглями по 2,2 см³ кожен. Завантаження зразків здійснюється через вакуумні двері швидкого доступу, що визначають граничний передопераційний вакуум у камері (не гірше 1×10^{-9} мм рт. ст.). Для забезпечення чистоти при завантаженні зразків передбачений бокс з інертною атмосферою, що підключається до цих дверей [5].

Установка передбачає використання шлюзового пристрою для завантаження та вивантаження зразків. Це забезпечує дві основні переваги: підтримку низького тиску в камері напилювання, що сприяє підвищенню продуктивності процесу, та ізоляцію випарника і мішеней від атмосфери, що запобігає неконтрольованому нагріву і випаровуванню вологи. Волога може вплинути на контактний опір металізації та призвести до змін у якості плівки, тому її усунення критично важливе для стабільності процесу. Крім того, шлюзовий пристрій дозволяє зменшити час, необхідний для підготовки установки до роботи, що також підвищує ефективність процесу.

Для контролю швидкості осадження використовуються системи на основі кварцового резонатора, що дають точкову картину осадження. Оскільки площа датчика обмежена 1 см², для рівномірного напилення рекомендується використовувати кілька датчиків, розташованих по трикутнику або квадрату. Це дозволяє оператору коригувати промінь для досягнення однорідності покриття. У сучасних установках електронно-променевого випаровування рівномірність покриття складає $\pm 1\%$ на діаметрі 1000 мм [6].

Технічні характеристики наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики установки електронно-променевого напилювання

Найменування параметра	Значення
Максимальний діаметр підкладки	150 мм
Температура прогріву камери напилювання	не менш 150 °С
Максимальна температура нагрівання підкладки	не менш 200 °С
Швидкість відкачки робочого насоса камери напилювання	700 л/сек
Максимальний залишковий тиск у камері напилювання після прогріву 200°С протягом 48 годин, з відключеними внутрішніми джерелами тепла й без подачі газів	не гірше 1×10^{-7} Па
Неоднорідність напилювання (для діаметра 102 мм)	не більше 5 %
Кількість розпилюємих матеріалів	5
Відстань від випарника до зразка	150–300 мм
Максимальний обсяг осередку випарника	2,2 см ³

Основною метою магістерської роботи є дослідження шляхів підвищення ефективності автоматизації технологічного процесу нанесення органічних плівок на установці електронно-променевого напилювання. Робота спрямована на аналіз існуючих методів автоматизації цього процесу, виявлення можливих слабких місць і розробку пропозицій щодо оптимізації системи управління. Завдяки удосконаленню автоматизованих засобів, планується досягти підвищення точності та стабільності процесу нанесення плівок, зменшення кількості дефектів, а також збільшення продуктивності та енергоефективності установки.

2 ОГЛЯД МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ПЛІВОК

2.1 Фотолітографія

Процеси нарощування шарів різних матеріалів є необхідними для формування вертикальної фізичної структури інтегральних мікросхем (ІМС). Відповідні форма і розміри елементів та областей на кожному шарі структури забезпечуються процесом фотолітографії. Фотолітографія — це процес вибіркового травлення поверхневого шару з використанням захисної фотомаски. На рисунку 2.1 представлена структурна схема процесу фотолітографії, де кожен етап включає кілька операцій. Як приклад, нижче наведено опис основних операцій при вибіркового травленні оксиду кремнію (SiO_2) [7].

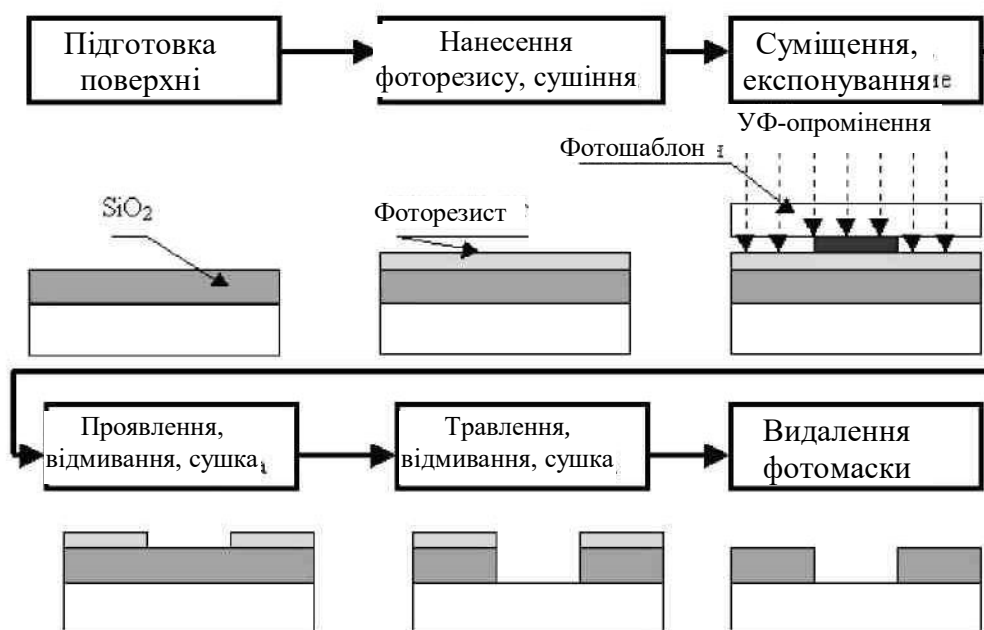


Рисунок 2.1 – Структурна схема процесу фотолітографії

Підготовка поверхні. Для виготовлення напівпровідникових пластин використовується хімічно чистий кремній. Поверхня обробляється парами органічного розчинника для видалення жирових плівок, після чого промивається деіонізованою водою для усунення залишків розчинника та мікрочастинок, що можуть призвести до утворення "проколів" у шарі фоторезисту.

Нанесення фотошару. Для цього використовується розчин світлочутливого полімеру у органічному розчиннику (фоторезист). Для тонких шарів в'язкість має бути низькою, що досягається високим вмістом розчинника (80–95%). Зменшення товщини шару підвищує роздільну здатність, але при товщині менше 0,5 мкм зростає кількість дефектів, що знижує ефективність фотомаски [8].

Нанесення фотошару може бути виконане центрифугуванням або розпиленням аерозолі. При центрифугуванні фоторезист подається в центр обертової пластини, і відцентрові сили рівномірно розподіляють його по поверхні, скидаючи надлишки в кожух. Товщина h нанесеної плівки залежить від швидкості обертання платформи ω , від в'язкості фоторезисту ν і визначається співвідношенням (2.1):

$$h = k \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}, \quad (2.1)$$

де k – коефіцієнт, який зазвичай встановлюваний експериментально.

Швидкість обертання центрифуги близько 6000 об/хв, а товщина фотошару регулюється в'язкістю, що залежить від вмісту розчинника. Однак цей метод має недоліки: напруження в плівці, що може призвести до деформації фотомаски під час проявлення; складнощі з обробкою кількох пластин одночасно; нерівномірне розподілення фоторезисту; та крайове потовщення, що погіршує контакт фотошаблону з фотошаром.

При розпиленні аерозолі фоторезист подається на пластини, що рухаються зворотно-поступально. Товщина шару формується поступово, коли частки зливаються, утворюючи суцільний шар. Час обробки залежить від в'язкості, витрат фоторезисту, швидкості руху столу та відстані від форсунки до підкладки. Для рівномірного розподілу фоторезисту форсунці дається зворотно-поступальний вертикальний рух, а при гальмуванні столу підвищується щільність потоку часток на пластинах.

Розпилення аерозолі позбавлене недоліків центрифугування і дозволяє групову обробку пластин, але вимагає високої чистоти навколишнього середовища. Нанесення та сушіння фоторезисту критично впливають на вихід

придатних мікросхем, оскільки пилові частки можуть спричинити мікродефекти. Процес має проводитися в умовах чистоти першого класу, де на літр повітря припадає не більше чотирьох часток розміром до 0,5 мкм.

Під час сушіння фоторезисту можуть залишатися пухирці розчинника, які при виході на поверхню утворюють мікротріщини. Сушіння здійснюється за допомогою інфрачервоного випромінювання, яке поглинається на межі "пластина–фоторезист", що забезпечує рівномірне вивільнення розчинника. Температура сушіння повинна бути 100–120°C, щоб уникнути передчасної полімеризації. Дефекти фотошару, як пил, пухирці й мікротріщини, передаються оксидній масці, утворюючи мікроотвори. Через ці отвори домішки можуть проникати при легуванні, викликаючи витoki струму й пробой в р-п-переходах. Якщо маска є шаром контактних вікон, метал може проникнути в мікроотвори, створюючи паразитні зв'язки й короткі замикання [9].

Сполучення та експонування. Сполучення перед експонуванням полягає в точному вирівнюванні фотошаблону з підкладкою, щоб елементи наступного шару збігалися з елементами попереднього шару за проектом. Процес сполучення включає три етапи:

1. Орієнтація за базовим зрізом для оптимального поділу пластини на кристали;
2. Грубе сполучення для запобігання розвороту пластини й фотошаблону щодо осі Z;
3. Точне сполучення для усунення зсуву малюнків по осях X і Y.

Процес проявки негативних фоторезистів включає обробку фотошару розчинником, внаслідок чого неоприлюднені ділянки розчиняються, а опромінені зберігаються завдяки фотополімеризації. У позитивних фоторезистах опромінені ділянки руйнуються, утворюючи кислоту, яка потім розчиняється лужними розчинами (наприклад, КОН або NaOH).

Після видалення проявника та сушіння фотомаска піддається тепловому задублюванню (120–180°C, залежно від типу фоторезисту), що остаточно формує її захисні властивості. Для травлення використовують водяні розчини кислот, чия концентрація забезпечує активне розчинення поверхневого шару і збереження

нижнього. Травлення супроводжується підтравлюванням під фотомаску і варіативністю процесу в межах одного шару. До завершення травлення бокове травлення рівне товщині шару, а час його завершення залежить від розмірів елементів [10].

2.2 Осадження плівок у вакуумі

Провідники на поверхні кристала ІМС та пасивні елементи гібридно-плівкових мікросхем створюються з тонких плівок товщиною від 0,1 до 2 мкм. Високу точність товщини та чистоти досягають вирощуванням плівок з атомарного (молекулярного) потоку в вакуумі або при бомбардуванні матеріалу іонами інертного газу, що розпилює матеріал і конденсує його на поверхні. Ці процеси називаються "термічним вакуумним напилюванням" (ТВН) та "розпиленням іонним бомбардуванням" (РІБ).

2.2.1 Термічне вакуумне напилювання

Схема комбінована загальна робочої камери установки термічного вакуумного напилювання наведена на рис. 2.2 (слайд 01.01). Процес вакуумного напилювання включає кілька етапів. Спочатку знімають оброблені підкладки з підложкодержателя та встановлюють нові. Потім ковпак опускають і запускають систему вакуумних насосів, починаючи з попереднього розрідження, а потім переходять до високого вакууму. Для прискорення десорбції повітря з внутрішніх поверхонь і зменшення часу відкачки подають гарячу проточну воду в трубопровід.

Коли в камері досягається тиск 10–4 Па, вмикаються нагрівачі випарника та підкладок. Після досягнення робочих температур заслінку відкривають, і пари матеріалу конденсуються на підкладці, утворюючи плівку. Система контролю вимірює товщину плівки, поверхневий опір або час напилювання. Після завершення напилювання сигнал активує соленоїд заслінки, що перекриває потік пари. Потім вимикають нагрівачі та систему відкачки, подаючи холодну воду в трубопровід. Після охолодження через натікач поступово впускають атмосферне повітря [11].

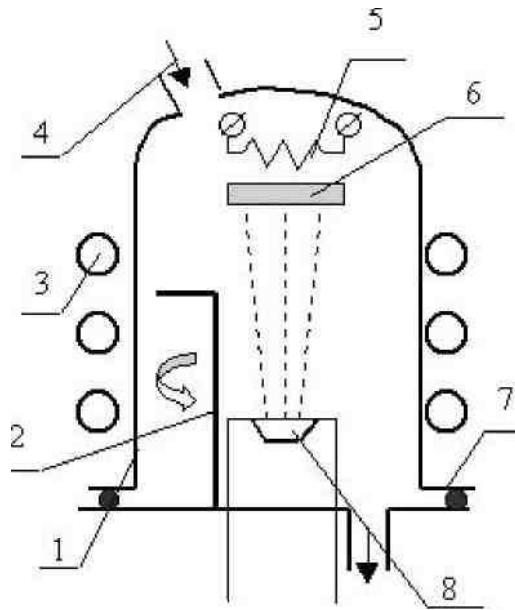


Рисунок 2.2 – Структурна схема робочої камери установки термічного вакуумного напилювання:

1 – вакуумний ковпак з нержавіючої сталі; 2 – заслінка; 3 – трубопровід для водяного нагрівання або охолодження ковпака; 4 – голчастий натікч для подачі атмосферного повітря в камеру; 5 – нагрівач підкладки; 6 – підкладкотримач із підкладкою, на якій може бути розміщений трафарет; 7 – герметизуюча прокладка з вакуумної гуми; 8 – випарник з розміщеним у ньому речовиною й нагрівачем (резистивним або електронно-променевим).

Вирівнювання тисків усередині та зовні ковпака дозволяє розпочати новий цикл обробки. Процес термічного вакуумного напилювання залежить від температури випарника, тиску в камері та температури підкладок. Температура випарника має забезпечити достатню інтенсивність випару, щоб час напилювання не перевищував двох хвилин, при цьому надмірна інтенсивність може призвести до нестійкої структури плівки. Інтенсивність випару характеризується пружністю пари (мова йде про тиск пари в стані насичення) P_s . Пружність пари для даної речовини залежить тільки від температури, формула (2.2):

$$\lg P_s = A \frac{B}{T}, \quad (2.2)$$

де A и B – коефіцієнти, що характеризують рід матеріалу;

T – абсолютна температура речовини.

Оптимальною інтенсивністю випару вважається така, при якій пружність пари дорівнює 1,3 Па. Температура випару, що відповідає цій пружності,

називається умовною і може бути обчислена за формулою (2.2). Для алюмінію вона становить 1150°C , для хрому – 1205°C , для міді – 1273°C , а для золота – 1465°C .

Низький тиск (P_0) у робочій камері необхідний для:

1. Вільної дифузії атомів матеріалу;
2. Прямолінійного руху атомів без зіткнень з молекулами повітря;
3. Уникнення хімічної взаємодії між матеріалом і повітрям.

Ці умови забезпечуються при залишковому тиску (P_0) , що досягається за допомогою форвакуумного механічного та високовакуумного дифузійного насосів. Температура підкладки впливає на структуру плівки і її електрофізичні властивості. Атоми матеріалу потрапляють на підкладку з енергією $(k \cdot T)$ та швидкістю близько 1000 м/с , передаючи частину енергії поверхневим атомам підкладки. Залишкова енергія зростає з підвищенням температури підкладки [12].

Під час міграції атом може або покинути підкладку, або втратити енергію, взаємодіючи з іншим атомом. Повністю втратити здатність мігрувати і закріпитися на підкладці може лише багатоатомна група, що стає центром кристалізації. За низької щільності потоку атомів і помірній температурі випарника, кількість центрів кристалізації мала, і великі кристали встигають вирости до утворення суцільної плівки.

Зниження температури підкладки та збільшення щільності потоку призводять до швидшого утворення центрів кристалізації, збільшення їх кількості та формування дрібнозернистої структури. Під час експлуатації, при циклічному нагріванні та охолодженні, ця структура рекристалізується в крупнозернисту, що змінює електрофізичні властивості, зокрема спричиняє "старіння" плівки. Для стабільності плівок під час експлуатації важливо уникати форсованого нагріву випарника. Для виготовлення тонкоплівкових структур використовуються групові підкладки ($60 \times 48 \text{ мм}$ або $120 \times 96 \text{ мм}$), виготовлені з ізолюючих матеріалів (сіталл, полікор, скло), що дозволяє одночасно виготовляти кілька десятків ідентичних модулів. Властивості плівки повинні бути однаковими по всій площі підкладки.

Потік атомів від випарника до підкладки є розбіжним, тому щільність потоку на підкладці нерівномірна: вона максимальна в центрі і зменшується до країв. Це призводить до утворення товстішої плівки в центрі підкладки. Для

вирішення цього використовуються обертові пристрої (диски, барабани), які можуть вміщувати кілька підкладок, що кілька разів проходять над нерухомим випарником, набираючи необхідну товщину плівки. Підкладки багаторазово проходять над нерухомим випарником (рисунок 2.3), поступово набираючи необхідну товщину плівки [13].

В результаті руху підкладки центральний "пагорб", який утворився б на нерухомій підкладці, розмивається в "хребет", витягнутий у напрямку її руху. Для вирівнювання товщини плівки в поперечному напрямку використовується коригувальна діафрагма, розташована між випарником і підкладкою. Профіль діафрагми розраховується на основі аналізу рельєфу плівки, отриманого при напилюванні на нерухомій і рухомій підкладках. Це дозволяє досягти рівномірності товщини плівки на груповій підкладці в межах $\pm 2\%$ (для підкладок розміром 60×48 мм).

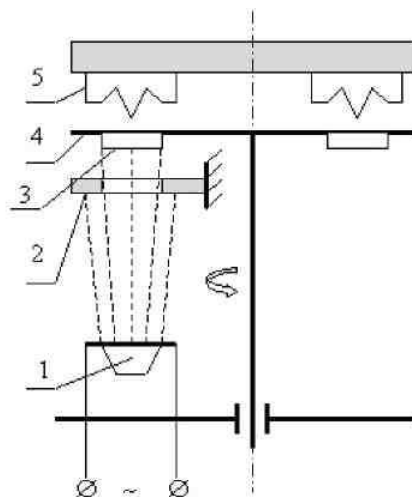


Рисунок 2.3 – Схема установки термовакuumного напилювання карусельного типу

1 – випарник; 2 – коригувальна діафрагма; 3 – підложкодержателі з підкладкою;
4 – диск каруселі; 5 – нагрівач підкладки.

2.2.2 Розпилення шляхом іонного бомбардування

Термічне вакуумне напилювання має кілька недоліків і обмежень, серед яких основні такі:

1. При напилюванні сплавів різна швидкість випаровування компонентів призводить до зміни складу плівки порівняно з вихідним матеріалом у випарнику.

2. Напилювання плівок з тугоплавких матеріалів (наприклад, W, Mo, Si₂, Al₂O₃) вимагає високих температур на випарнику, що призводить до "забруднення" потоку матеріалом випарника.

3. Нерівномірність товщини плівки змушує використовувати механізми переміщення підкладок і коригувальні діафрагми.

4. Інерційність процесу вимагає встановлення заслінки з електромагнітним приводом у робочій камері.

Деякі недоліки обумовлені необхідністю високотемпературного нагрівання речовини, інші – високим вакуумом у робочій камері [14].

Процес іонного бомбардування є "холодним", оскільки атомарний потік утворюється шляхом бомбардування мішені іонами інертного газу, які надають атомам енергію для подолання зв'язку з сусідніми атомами. Для цього в камері підтримується тиск газу близько 1 Па, що значно вищий, ніж у камері термовакuumного напилювання.

Це призводить до розсіювання атомного потоку з мішені та покращення рівномірності товщини осадженої плівки, з точністю до $\pm 1\%$, без необхідності використання додаткових пристроїв.

Катодне розпилення є однією з форм іонного бомбардування. Це простий, але водночас ефективний процес, що зберігає основні характеристики цієї технології і є зручним для дослідження загальних процесів розпилення. Схема робочої камери установки катодного розпилення представлена на рис. 2.4 (слайд 01.02).

На рис. 2.4 також показано, що живлення здійснюється постійною напругою, при цьому нижній електрод з підкладками заземлений і знаходиться під вищим потенціалом, ніж катод-мішень. Змінне навантаження використовується для регулювання струму розряду [15].

Розряд складається з двох зон: темного катодного простору та світної області. Падіння напруги відбувається в темному катодному просторі, де заряджені частинки набирають енергію для бомбардування катод-мішені, що викликає звільнення атомів і електронів. Електрони іонізують молекули аргону, утворюючи іони, що прискорюються до мішені, а атоми матеріалу досягають підкладки через зіткнення з молекулами і іонами аргону.

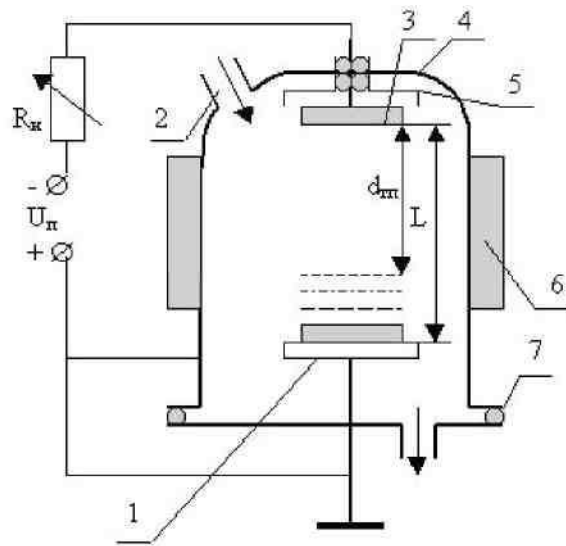


Рисунок 2.4 – Схема робочої камери установки катодного розпилення

1 – анод з розміщеними на ньому підкладками; 2 – голчастий натикач, що забезпечує безперервну подачу аргону; 3 – катод – мішень із матеріалу, що підлягає розпиленню й осадженню; 4 – вакуумний ковпак з нержавіючої сталі; 5 – екран, що охоплює катод з невеликим зазором і запобігаючий паразитним розрядам на стінки камери; 6 – постійний електромагніт, що втримує електрони в межах розрядного стовпа; 7 – герметизуюча прокладка.

На рисунку 2.5 (а) наведена вольт-амперна характеристика розряду.

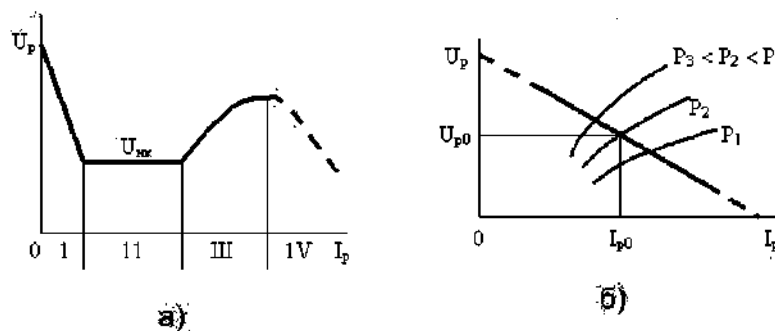


Рисунок 2.5 – Вольт-амперні характеристики самостійного тліючого заряду:

а) – області ВАХ при різних режимах;

б) – робоча область (область III) при різних тисках аргону.

При подачі постійної напруги в кілька кіловольт відбувається пробій міжелектродного проміжку, що супроводжується швидким зростанням струму і зниженням напруги в розряді (область запалювання розряду I). Зі збільшенням струму розряду через зменшення опору площа катодів-мішені, що покривається розрядом, збільшується, при цьому щільність розрядного струму і напруга залишаються стабільними, а швидкість розпилення є низькою (область нормально тліючого розряду II). В області III вся поверхня мішені покрита розрядом, і

збільшення струму розряду призводить до підвищення щільності струму, напруги та швидкості розпилення. Ця область (аномально тліючий розряд) є робочою в процесах катодного розпилення [16].

Для запобігання переходу в область дугового розряду (область IV) використовуються інтенсивне водяне охолодження мішені та обмеження потужності джерела живлення. На рисунку 2.5 (б) виділена робоча область III на ВАХ. Крутість характеристики в цій області залежить від тиску робочого газу, в даному випадку аргону. Робоча точка, що визначає режими обробки, характеризується тиском газу (P) , струмом (I_p) і напругою (U_p) розряду, і розташована на навантажувальній характеристиці джерела живлення.

Установка катодного розпилення є одним із типів обладнання для процесу осадження матеріалів на підкладку за допомогою іонного бомбардування. Вона використовує електричний розряд для розпилення матеріалу з катода (мішені) на підкладку. Процес катодного розпилення є "холодним" і здійснюється при порівняно низьких температурах. Ось опис основних етапів роботи установки катодного розпилення:

Отже, робота установки катодного розпилення містить такі етапи.

1. Створення робочого середовища

- У камері установки підтримується вакуум або низький тиск інертного газу (зазвичай аргон).
- Газ подається в робочу камеру до досягнення потрібного рівня тиску, зазвичай в межах 0,1–1 Па.

2. Подача напруги

- На катод (мішень) подається висока постійна напруга (десятки кіловольт), що створює потужний електричний розряд між катодом і анодом.
- Мішень (катод) може бути виготовлена з матеріалу, який планується осаджувати на підкладку, наприклад, алюмінію, титану, кремнію тощо.

3. Бомбардування катода іонами

- Іонізований газ (зазвичай аргон) прискорюється в електричному полі і, потрапляючи на катод, викликає зіткнення з його поверхнею.

- Під впливом цих іонів з поверхні катода вириваються атоми матеріалу, які потім рухаються до підкладки.

4. Переміщення атомів до підкладки

- Звільнені з мішені атоми матеріалу рухаються до підкладки, що розташована в іншій частині робочої камери. Вони можуть взаємодіяти з молекулами газу (аргону) в процесі руху, що може призвести до часткового нагріву підкладки.

- Атоми осідають на підкладці, де утворюють тонкий плівковий матеріал.

5. Робота підкладки

- Підкладка може бути нерухомою або рухатися, що дозволяє рівномірно покрити її поверхню матеріалом.

- Для досягнення рівномірності осадження інколи використовуються механізми, які обертають або переміщують підкладку, а також коригувальні діафрагми для рівномірного розподілу матеріалу.

6. Регулювання процесу

- Процес катодного розпилення контролюється за допомогою налаштування напруги, струму та тиску газу в камері.

- Для підтримки стабільності розряду і запобігання переходу в дуговий розряд (що може спричинити пошкодження установки) використовуються обмеження по струму та напрузі, а також охолодження мішені.

7. Формування плівки

- Поступове осадження атомів на підкладці призводить до утворення тонкої плівки. Її характеристики (товщина, однорідність, структура) залежать від параметрів процесу, таких як напруга, струм, тиск газу та швидкість руху підкладки.

8. Завершення процесу

- Коли на підкладці досягається необхідна товщина плівки, подача струму і напруги припиняється.

- Підкладка може бути охолоджена, і камера розряду поступово повертається в атмосферу.

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ТА ЇХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Опис установки синтезу тонкоплівкових структур

Установка є високовакуумною системою ВУП–5 з паромасляною відкачкою. Всі фланцеві з'єднання виконані з нержавіючої сталі. Відкачка камери для напилювання здійснюється за допомогою форвакуумного насоса та дифузійного паромасляного насоса НВДМ-160, які забезпечують досягнення вакууму на рівні 10^{-7} Па на попередньому етапі.

Завантаження зразка здійснюється через шлюз. Шлюзова камера може бути оснащена системою іонного очищення, яка використовується для попереднього травлення поверхні зразків перед напилюванням в аргонівій плазмі. Це дозволяє видалити окисли, залишки органічних сполук та покращити адгезію плівок. Також є можливість використання інших газів, включаючи агресивні, за умови відповідного доопрацювання вакуумної конструкції.

Шлюзова камера обладнана лінійним магнітним маніпулятором, вікном для швидкого завантаження та широкодіапазонним вакуумметром. Вакуумна відкачка камери здійснюється за допомогою промасляного насоса з швидкістю відкачки 700 л/с. Також в камері передбачено підключення до магістралі чистого газу для розкриття [12].

Конструкція фланця швидкого завантаження шлюзової камери дозволяє встановлювати герметичний бокс, що продувається інертним газом, для уникнення контакту зразків з атмосферним повітрям під час завантаження в установку. Камера напилювання оснащена стаціонарною системою прогріву з максимальним температурним режимом до 150°C . Шлюз та камера напилювання мають окремі системи відкачки, з'єднані шибєрним клапаном.

Камера напилювання обладнана оглядовим вікном для контролю завантаження підкладки та можливістю візуального спостереження за процесом плавлення мішені через дзеркало, що знаходиться всередині камери. Система

автоматизації технологічного процесу забезпечує автоматичне керування процесом напилювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Конструкція установки гарантує однорідність напилених плівок не гірше 5% для зразків діаметром 150 мм. Відкрита архітектура установки дає змогу компонувати її з внутрішніми вузлами та агрегатами, а також додатковим аналітичним обладнанням на етапі формування замовлення, з можливістю подальшого доповнення установки під час експлуатації.

Схема функціональна установки синтезу органічних тонкоплівкових структур представлена на рис. 3.1 (слайд 02.00).

Установка складається з вакуумної камери "1", в якій здійснюється напилення барвника та знімання спектру за допомогою спектрометра "20".

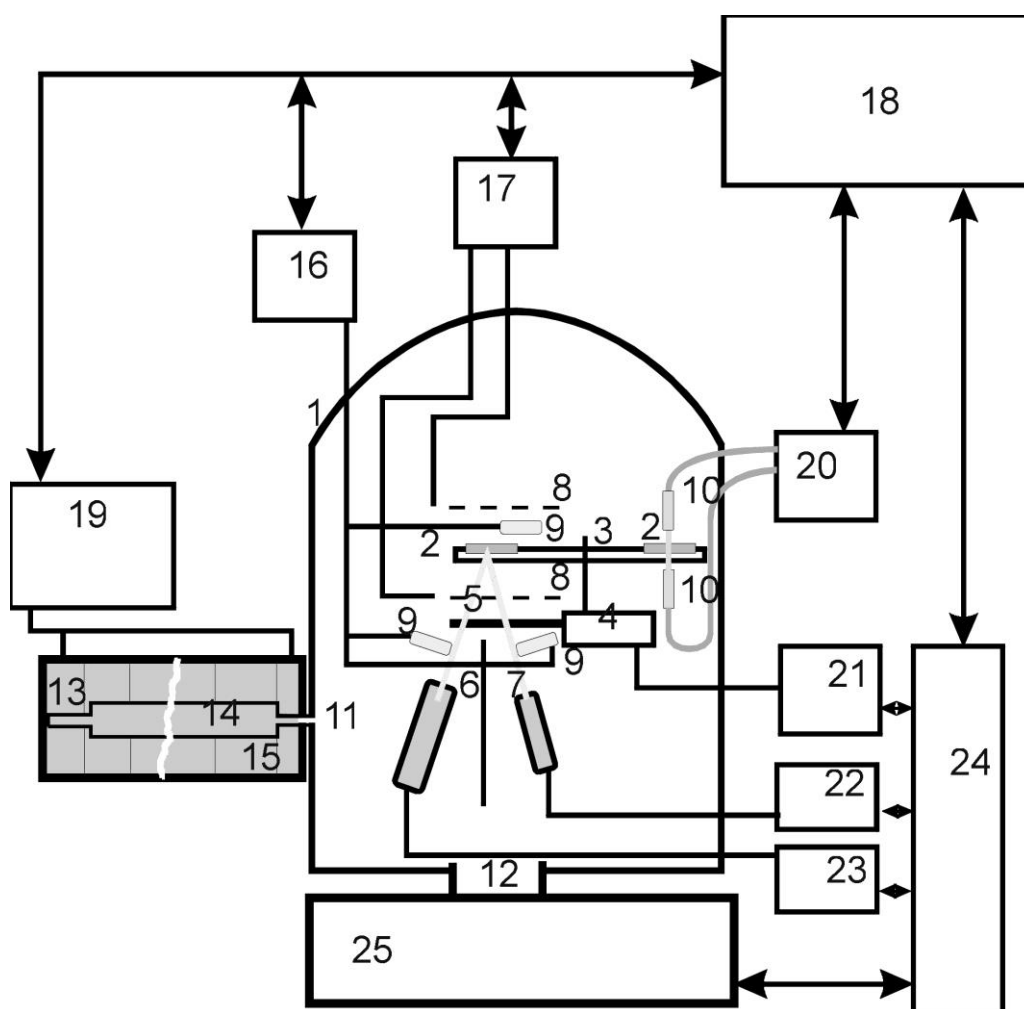


Рисунок 3.1 – Функціональна схема установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Повітря з вакуумної камери відкачується за допомогою вакуумної установки "25", що включає форвакуумний насос і насос високого вакууму. Спектрометр підключений до вакуумної установки через світловоди "10". У вакуумній камері розташований випаровувач барвника "7", що є металевою пластинкою. Барвник у кристалічному стані закладається в випаровувач, де під впливом високої напруги він розплавляється і випаровується. Орієнтуючі електроди "8" забезпечують необхідний напрямок випаровування. Барвник осідає на скляну пластину-підкладку (або інший матеріал, що використовується). Підкладка (диск) приводиться в рух двигунами системи транспортування "4". Контролери системи транспортування "21", випаровувача барвника та кварцових датчиків "9" контролюють рівномірне нанесення барвника та потрібну товщину шару. Заслонки "5" призначені для контролю початку та закінчення процесу напилення барвника та полімеру на підкладку (у нашому експерименті не використовуються) [8].

Багатозонна піч "15" використовується для розігріву полімеру, який розпилюється як підкладка. До неї підключений терморегулятор "19". У печі знаходяться субліматор діпараксилілена "13" та активатор параксилілена "14". Виведення активованого діпараксилілену здійснюється через з'єднання "11". Контролер випаровувача-активатора "23", як і інші контролери, підключений до аналогово-цифрового пристрою та цифро-аналогового перетворювача "24". Високовольтне джерело струму є основним для забезпечення роботи установки. Керуючий комп'ютер "18" використовується для зчитування результатів експерименту (спектра барвника) та інших необхідних параметрів для проведення дослідження.

Електронна стійка керування включає такі основні компоненти: кнопку аварійного відключення установки, блок живлення робочого насоса, блок розподілу електроживлення, персональний комп'ютер з рідкокристалічним дисплеєм, клавіатурою та маніпулятором (миша), блок керування нагрівачами, а також блоки керування електронно-променевим випарником.

Блоки керування електронно-променевим випарником складаються з таких компонентів: виносного блоку керування розжаренням катода, блоку пересування позицій променя, силового блоку живлення та блоку керування фокусуванням променя.

3.1.1 Розробка методів осадження плівок та конструювання установки

Експерименти проводились на вакуумному приладі ВУП-5. Згідно з попередніми дослідженнями, не всі органічні барвники зберігають свої властивості в плівці — вони руйнуються під час напилення. Для вивчення процесу випаровування була розроблена програма, що відстежує тиск у камері, швидкість росту плівки, температуру та струм випаровувача. Виявлено, що при напиленні деяких барвників спостерігається газовиділення, що свідчить про деградацію органічної речовини при певній температурі випаровувача [7].

Установка, використана в даній роботі, зображена на рис. 3.2. Випаровувач розташовувався під ковпаком універсального вакуумного посту ВУП-5. Вакуумна система (рис. 3.2) включає механічний форвакуумний та дифузійний насоси, електромагнітні соленоїдальні клапани для перемикання каналів системи, а також три датчики для контролю та моніторингу вакууму.

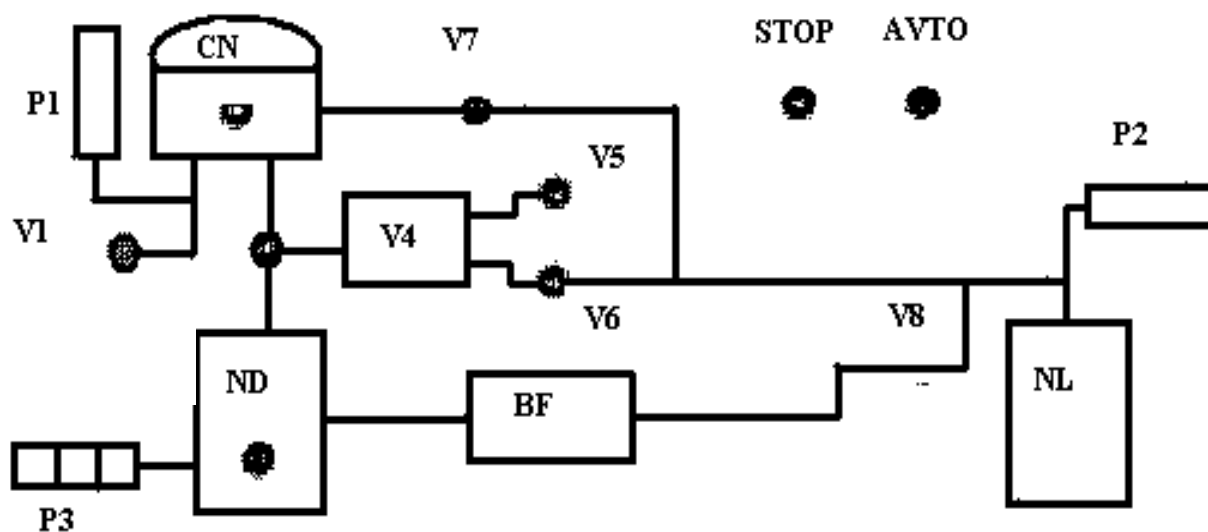


Рисунок 3.2 – Схема вакуумної системи

Позначення рисунку 3.2:

BF – бустерна ємність для відкачування повітря дифузійним насосом, яка допомагає подолати стрибки тиску при роботі ND;

V1, V4, V5, V6, V7, V8 – клапани системи, використовують для зв'язку окремих незалежних частин. Клапан V1 слугує для накачки повітря в камеру CN після проведення дослідів. Клапан V4 відчиняє затворку між дифузійним насосом

та камерою CN, оскільки різниця тисків по різні боки велика, то клапан V5 та клапан V6 допомагають відкрити клапан V4;

NL – форвакуумний насос. Створює вакуум низького порядку (близько 10^{-4} Па);

ND – дифузійний насос НВДМ-160, призначений для отримання вакууму порядку 10^{-7} Па. Ємність заповнена маслом, під час відкачки перебуває у стані кипіння ($t \approx 150^{\circ}\text{C}$);

CN – камера, з якої проводиться відкачка повітря, місце проведення досліду;

P1, P2 – термопари; P1, P2, P3, P4 – датчики; P3 – іонізаційний.

Відкривається клапан V7, і відкачка з камери CN здійснюється форвакуумним насосом. Потім відкривається клапан V8, і повітря відкачується через лінію дифузійного насосу. Після цього відкривається клапан V4, і дифузійний насос створює вакуум більш високого порядку, ніж той, що утворився внаслідок роботи форвакуумного насосу NL.

Для вимірювання товщини плівок під час експерименту використовувався кварцовий датчик — прилад, який визначає товщину тонкої плівки за зміною частоти коливань кварцової пластинки. Він складається з кварцової пластинки, включеної в електричне коло. Прилад працює на резонансній частоті 8 МГц. Зсув частоти на кілька герц вказує на збільшення товщини плівки на один адсорбційний шар.

3.2 Вибір датчика товщини плівки

Лостіс і Сауербрей першими вивчали можливість застосування кварцових кристалічних резонаторів для вимірювання малих кількостей осаджуваної речовини. Датчики з кристалічними резонаторами для визначення товщини плівки мають досить просту конструкцію. (слайд 03.01). Кристалічні резонатори мають високу чутливість та стійкість до механічних ударів і вібрацій, що робить їх ідеальними для контролю тонких плівок [13]. Вони використовують п'єзоелектричні властивості кварцу: резонатор у вигляді тонкої пластини з електричними контактами включається в схему генератора, і під впливом змінного електричного поля виникають коливання пластини

по товщині. Резонансна частота цих коливань, по формулі 3.1, обернено пропорційна товщині пластини d_q :

$$f = \frac{c_t}{2 \cdot d_q}, \quad (3.1)$$

де c_t – швидкість поширення пружних хвиль у напрямку товщини пластини. Робочі поверхні пластини не є вузловими.

При виготовленні кварцових пластин важливо враховувати температурну залежність резонансної частоти. Температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) кварцу пов'язаний з пружними постійними і містить як позитивні, так і негативні компоненти, величини яких залежать від орієнтації коливань щодо кристалографічних осей монокристала. Оскільки зміна частоти через температурні флуктуації впливає на точність вимірювання маси, кварцові пластинки вирізаються з монокристала так, щоб різні члени в виразі для ТКЧ компенсували один одного. Цій вимозі відповідає зріз, площина якого становить кут приблизно 35° із площиною c , x , як показано на рис. 3.3. Орієнтація такого зрізу називається АТ-зрізом, і саме вона використовується в усіх датчиках товщини. Температурна залежність ТКЧ для кількох АТ-зрізів з трохи різною орієнтацією була вивчена Фелпсом. На рис. 3.4 показана ця залежність для зрізу,

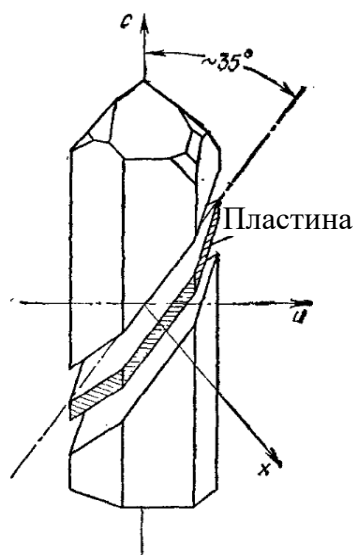


Рисунок 3.3 – Кристал кварцу з пластиною, вирізаною під кутом АТ-зрізу

зробленого під кутом $35^\circ 20'$. ТКЧ дорівнює нулю при температурі близько 30°C і залишається в межах $\pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ в діапазоні температур $\pm 30^\circ\text{C}$. Зміна кута зрізу на всього $10'$ зміщує температуру, при якій ТКЧ дорівнює нулю, на 50°C і звужує інтервал малих значень ТКЧ. Зазвичай кути зрізу вибираються в межах від $35^\circ 10'$ до $35^\circ 20'$. Залежність резонансної частоти коливань пластини, вирізаної під кутом АТ-зрізу, від товщини пластини визначається за формулою 3.2:

$$f_0 = \frac{N}{d_q}, \quad (3.2)$$

де $N = 1,67 \cdot 10^6$ Гц·мм

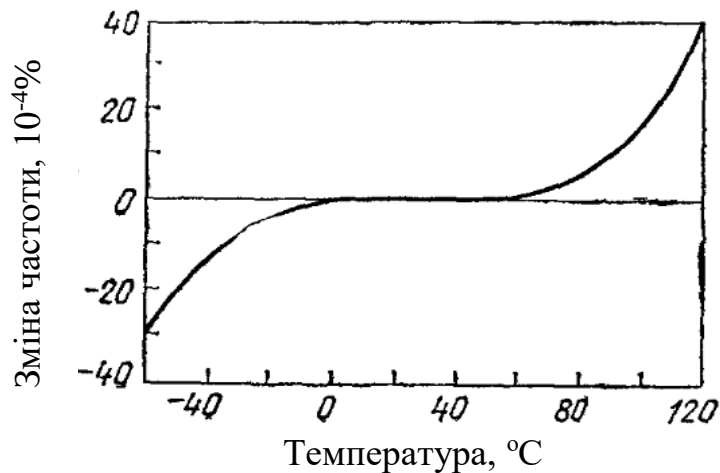


Рисунок 3.4 – Залежність частоти від температури для пластини кварцового кристалу, вирізаної під кутом АТ-зрізу 35°20′

Можна припустити, що при осадженні невеликої додаткової маси ΔM на одну або обидві сторони пластини, робочі поверхні кристала залишаються в пучності коливань, тобто осаджена речовина не накопичує енергію пружної деформації за час одного коливального циклу. Отже, осаджена речовина впливає на резонансну частоту лише через свою масу, а її властивості, такі як густина та пружні постійні, не мають значного впливу. Залежність частоти коливань від кількості осадженої речовини можна отримати, продиференціювавши рівняння 3.2 по d_q і виразивши приріст товщини кварцової пластини Δd_q через масу осадженої речовини ΔM та товщину плівки df . Інший підхід для вирішення цієї задачі запропонував Стокбридж, використавши метод збурювань для аналізу поведінки пластин резонатора і отримавши той самий результат (формула 3.3):

$$\Delta f = -\frac{K \cdot f_0^2 \cdot \Delta M}{N \cdot \rho_q \cdot A_m} = -\frac{K \cdot N \cdot \Delta M}{\rho_q \cdot d_q^2 \cdot A_m}, \quad (3.3)$$

де K – постійна, близька до одиниці, величина яка залежить від розподілу осадженої плівки по площі A_m датчика; ρ_q – густина кварцу (2,65 г·см⁻³).

Як Ат зазвичай беруть всю площу поверхні кристалічної пластини. Однак часто електроди покривають лише частину цієї поверхні. У такому випадку Ат визначається як площа електродів, оскільки було доведено, що поза електродами

амплітуда коливань дуже мала, і осадження речовини на цих ділянках вносить лише незначний внесок у загальну зміну частоти Δf , що складає близько 1% [4].

Коефіцієнт пропорційності в рівнянні 3.3 між зсувом частоти і масою осадженої речовини на одиницю площі називається чутливістю кристала до визначення маси (формула 3.4):

$$C_f = \frac{f_0^2}{N \cdot \rho_q} = \frac{N}{\rho_q \cdot d_q^2} [\Gamma_{\text{ц}} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^2] \quad (3.4)$$

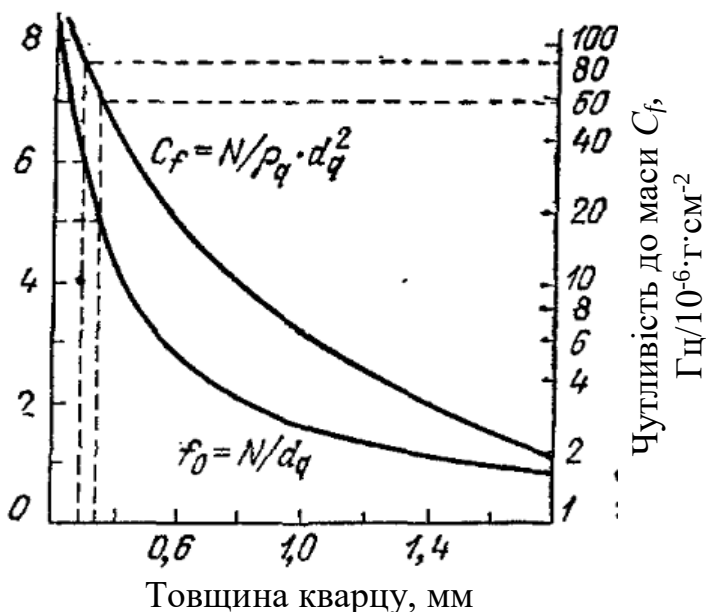


Рисунок 3.5 – Залежність резонансної частоти і чутливості до маси від товщини пластини, вирізаної під кутом АТ-зрізу

З рис. 3.5 видно, що тонші кристали з вищою резонансною частотою мають більшу чутливість. Тому для досягнення високої чутливості пластини слід робити максимально тонкими, наскільки це дозволяє їхня механічна міцність. Однак існує ще одне обмеження на товщину пластини, пов'язане з тим, що лінійна залежність між Δf і ΔM зберігається тільки до того моменту, поки товщина осадженого шару значно менша за товщину пластини. Граничні значення, при яких лінійність ще не дає суттєвих похибок, становлять Δf_{max} від 0,5% до 5% від початкової частоти f_0 . Хоча максимально можливий діапазон зміни частоти збільшується зі зменшенням товщини кристала, маса, що призводить до цього граничного значення Δf_{max} , більша для менш чутливих (товстіших) кристалів. Це добре видно на рисунку 3.6, де показана залежність максимальної зміни частоти

та максимальної кількості осадженої речовини від товщини кварцової пластини. Оптимальними є кристали товщиною близько 0,3 мм з початковими частотами 5–6 МГц, оскільки вони найкраще відповідають вимогам щодо високої чутливості та можливості вимірювати масу в широкому діапазоні. Ці області товщин та максимальної зміни частоти позначені на рисунках 3.5 та 3.6 пунктирними лініями. Рівняння 3.3, що зв'язує частоту з масою, неодноразово було перевірене шляхом мікрозважування.

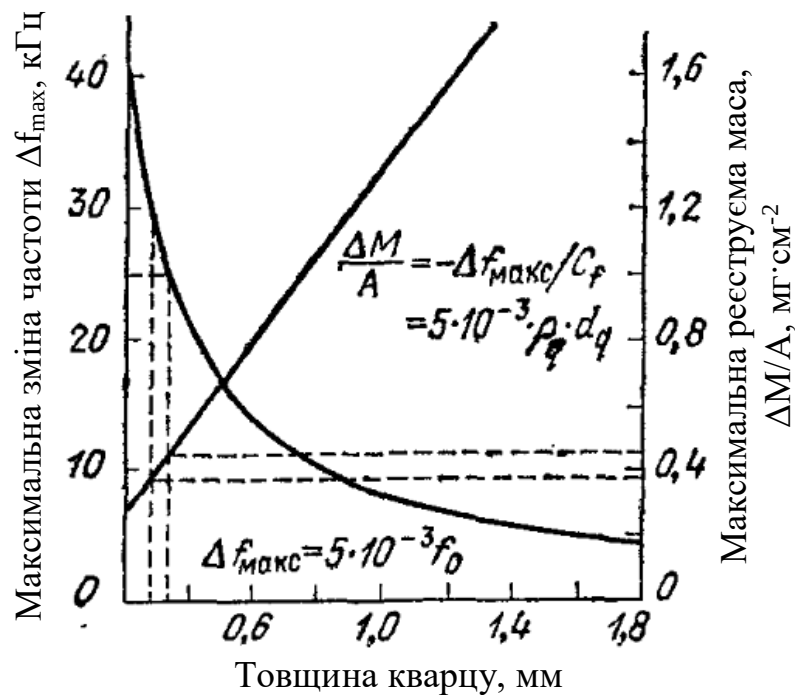


Рисунок 3.6 – Залежність максимальної зміни частоти і величини максимальної реєструємої маси від товщини пластини, вирізаної під кутом АТ-зрізу

Ешбах і Круїдхоф експериментально визначили чутливість C_f , яка виявилася рівною 0,4% від теоретично розрахованого значення за параметрами кварцу, згідно з рівнянням 3.6. Це свідчить про те, що калібрування датчика не є обов'язковим. Однак, як зазначили Нідермайер і його колеги, важливо завжди враховувати температуру кристалу. Також був досліджений інтервал лінійної зміни частоти. Емпіричні значення максимального зсуву частоти (Δf_{max}) для пластинок з резонансною частотою 5 МГц знаходилися в межах від 50 до 100 кГц, що відповідає максимальному осадженню речовини в межах 1–2 $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$. Відповідне значення максимальної товщини $d = \Delta M \cdot 10^8 / \rho \cdot A_m$ (А) змінюється від

5000 А до 50 000 А в залежності від густини ρ речовини плівки. Відсутність нелінійного члена в рівнянні залежності частоти від маси може бути результатом ігнорування членів другого порядку в аналізі Стокбріджа або неправильності припущення, що осаджена плівка не накопичує енергії. У першому випадку відхилення від нелінійності не залежить від властивостей осадженої речовини, а в другому – величина цього відхилення варіюється в залежності від механічних властивостей матеріалу. Якщо для конкретного кристала відома нелінійна частина залежності частоти від маси, можна збільшити межу вимірювання товщини до кількох мікрон. В такому разі можливе калібрування кварцової пластини за допомогою інших методів вимірювання товщини, оскільки нанесений шар можна видалити хімічним травленням і використовувати кристал повторно. Однак коли товщина плівки наближається до товщини кристала, осаджена плівка починає накопичувати пружну енергію, що спричиняє зміни в коливаннях – вони стають нерегулярними (частота «стрибає») або припиняються зовсім. У зв'язку з цими обмеженнями та високою вартістю кварцових пластин, розширення діапазону вимірювання товщини через додаткове калібрування зазвичай не є доцільним. (слайд 03.01).

Кристали, що застосовуються в датчиках, зазвичай мають форму круглих або квадратних пластин діаметром 13–14 мм. Вони встановлюються в тримачі, які забезпечують фіксацію їхнього положення і дозволяють зручно знімати та знову монтувати. На рисунку 3.7 показано два типи тримачів для кристалів. Для формування електричного поля на обидві поверхні пластини наносяться тонкі плівки золота або іноді срібла [10]. У конструкції, зображеній на рис. 3.7(а), металізується вся поверхня пластини, тоді як в конструкції на рис. 3.7(б) покрита металом тільки центральна частина пластини у вигляді кілець діаметром 6-8 мм. В цьому випадку контакт з краями пластини забезпечується за допомогою випарованого свинцю. В деяких конструкціях металізується лише одна сторона пластини, на яку осаджується речовина, а зворотна сторона просто притискається до поверхні металевого тримача.

Лангер і Патон розробили конструкцію тримача з матеріалів, що дозволяють проводити випалювання всього перетворювача при температурі 450°C . Важливо зазначити, що частотні характеристики кварцових кристалів, нагрітих до 400°C , повністю відновлюються після охолодження. Завдяки здатності до знегазування, ці кристали можуть використовуватися в умовах надвисокого вакууму. Дослідження показали, що за відсутності адсорбції та десорбції на поверхні кристала частота коливань не залежить від тиску в діапазоні високого та надвисокого вакууму.

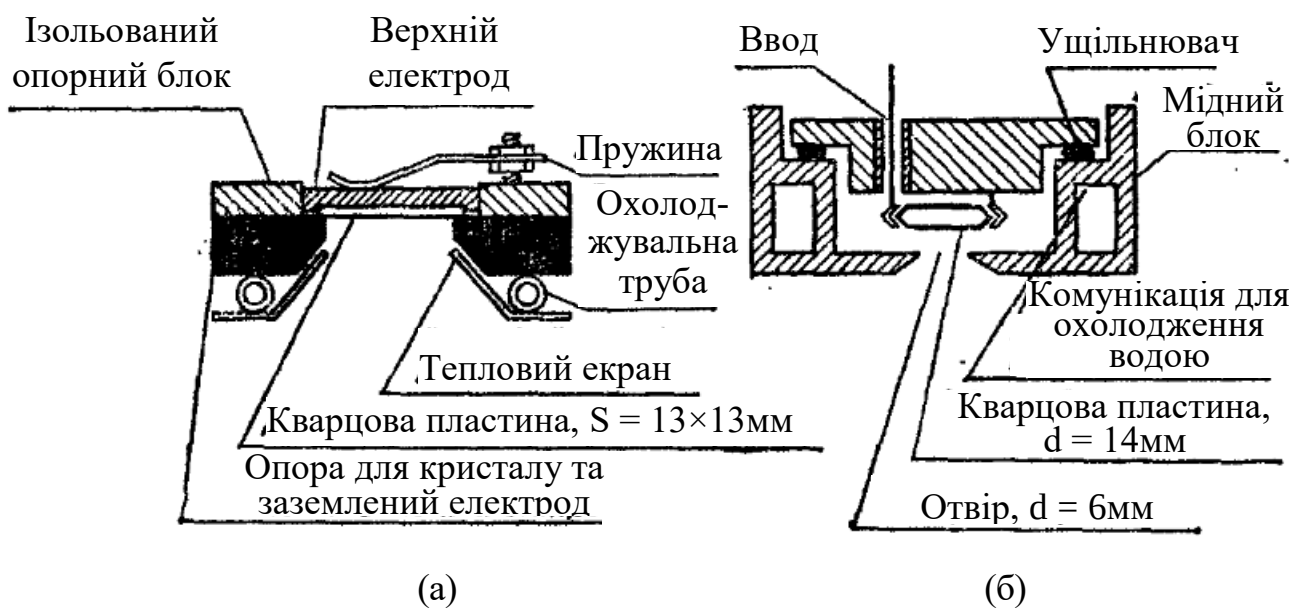


Рисунок 3.7 – Конструкції тримачів кварцових резонаторів, запропоновані:

а – Берідтом і Лавом; б – Пулкером

Хоча пластини, вирізані в напрямку АТ-зрізу, мають найменший температурний коефіцієнт частоти, все ж необхідно вжити заходів для мінімізації зміни температури кристала через випромінювання від випарника та виділення теплоти конденсації. Тому кристалотримач зазвичай охолоджується водою і має радіаційний екран, що оточує кристал, за винятком робочої поверхні. Тепло, яке може проникати через відкриту поверхню, все одно спричиняє підвищення температури кристала на кілька градусів Цельсія, що призводить до зміщення частоти на $10\text{--}100$ Гц або відповідної зміни маси від 10^{-7} до 10^{-8} г/см². Цей ефект можна зменшити, використовуючи вхідний отвір з малим діаметром (рис. 3.7(б)), однак при точних вимірюваннях його не можна ігнорувати. Берндт рекомендує на

час, коли датчик відкритий для випарника та пари осаджуваної речовини, тримати заслінку перед підкладкою закритою. Це дозволяє обмежити основні зміни температури датчика до того, як розпочнеться осадження речовини на підкладці.

Основними приладами для роботи датчика є генератор і частотомір. Для вимірювання малих змін частоти на рівні резонансної частоти f_0 потрібні точні й дорогі прилади з точністю до сьомого знака. Зазвичай використовується генератор порівняння, що містить другий кристал. Сигнал від цього генератора та сигнал від детектора подаються на змішувач, де виникає сигнал проміжної частоти. Потім цей сигнал і сигнал від генератора з регульованою частотою подаються на другий змішувач. Схему приладу показано на рис. 3.8 (слайд 03.02). Перевага цього приладу в тому, що він працює в області частот з максимальною чутливістю, незалежно від товщини плівки, осадженої на кристалі. Вихідний сигнал знаходиться в звуковому діапазоні і керує перерахунковою схемою [6].

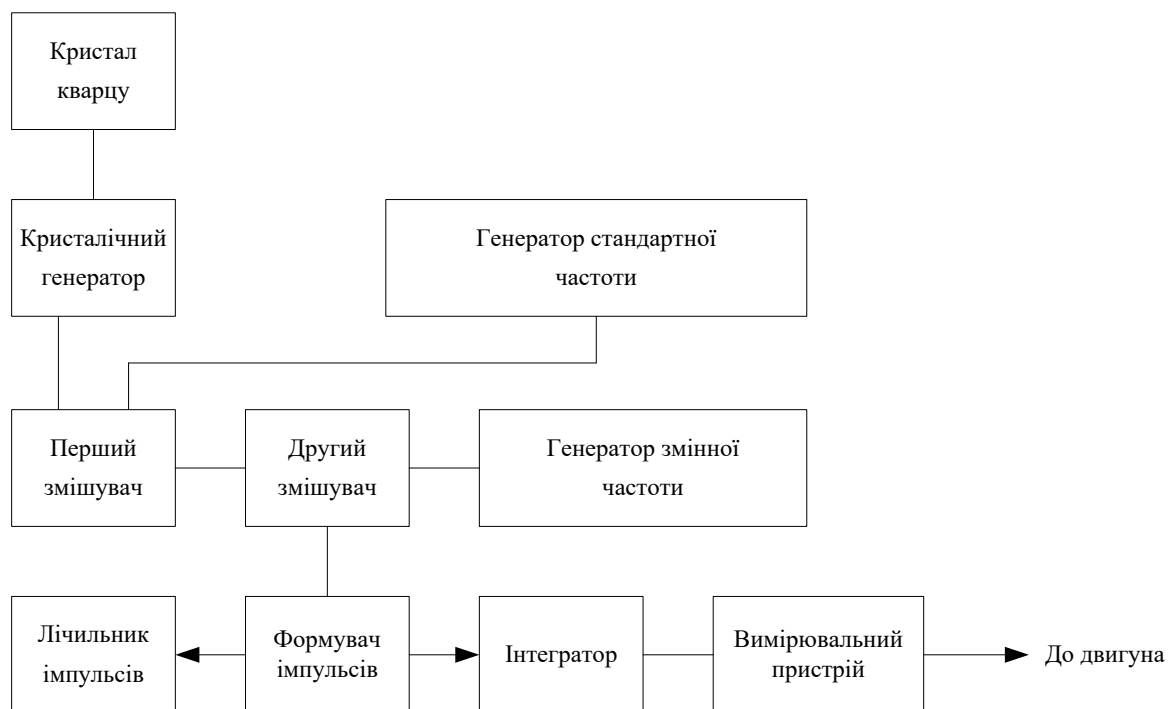


Рисунок 3.8 – Блок-схема датчика з кристалом кварцу

За допомогою цифрових або аналогових систем реєстрації можна вимірювати частоту з точністю $\pm 10^{-4}\%$. У цифрових системах вихідний сигнал можна подавати на цифродрукуючий пристрій для безперервного запису

показників, а швидкість осадження визначати шляхом порівняння послідовних вимірів. Також можна додати електронну схему для диференціювання, що дозволить реєструвати швидкість осадження і товщину плівки на окремих індикаторах. У аналогових системах змінний сигнал частоти перетворюється на постійний і подається на вихідний прилад. Також можна налаштувати систему автоматичного припинення осадження: коли сигнал досягає заданого рівня, заслінка автоматично закриває підкладку [13].

У реальних конструкціях датчиків на основі кварцових кристалів точність вимірювань залежить від стабільності електричної схеми. Дослідження Стокбріджа показали, що тиск газу та адсорбція мають мінімальний ефект на резонансну частоту кристала з практичної точки зору. Наприклад, якби можна було реєструвати зміну частоти в 1 Гц для кристала з резонансною частотою 5 МГц, то чутливість датчика становила б $2 \cdot 10^{-8} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Однак, відхилення частоти в схемах зазвичай складає від 10 до 100 Гц·год⁻¹, що обмежує межу чутливості до 10^{-7} – $10^{-6} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. У таких умовах точність вимірювання товщини та швидкості осадження становить $\pm 2\%$. Хілек і Нідермайер досягли точності $\pm 1\%$ при вимірюванні мас в межах 10^{-7} – $10^{-6} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, завдяки спеціальному аналізу температурної залежності частоти. Уорнер і Стокбрідж розробили систему, яка дозволяє вимірювати частоту з точністю до $10^{-8}\%$ і підтримує температуру кристала з точністю до $\pm 0,1^\circ\text{C}$ або $\pm 0,01^\circ\text{C}$, що дозволяє реєструвати зміни маси в межах від 10^{-10} до $10^{-18} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$.

3.2.1 Датчик кварцовий QS/QSM

Призначення: Кварцові датчики QS/QSM (рис. 3.9) розроблені для застосування в системах кварцового контролю товщини плівок, що наносяться у вакуумі. Ці датчики використовують змінні кварцові пластини-резонатори з резонансною частотою 4 МГц, 5 МГц, 6 МГц або 8 МГц, що дозволяє точно вимірювати товщину тонких плівок під час їхнього осадження. Вони є важливим елементом у процесах вакуумного напилювання, осадження або інших технологіях, де необхідно здійснювати моніторинг товщини плівки в реальному



Рисунок 3.9 – Датчик кварцовий QS/QSM

часі. Завдяки високій чутливості та стабільності ці датчики забезпечують точність вимірювань навіть при мінімальних змінах товщини, що робить їх незамінними в різних галузях, таких як виробництво електронних компонентів, покриття, оптика та інші [15].

Датчики оснащені системою водяного охолодження та комплектуються магнітним захистом, фітінгами, фланцями і трубками для охолодження, що дозволяє їх використовувати в різних сферах застосування. Застосовуються в таких процесах, як магнетронне напилювання, електронно-променеве випаровування з іонним асистуванням, іонно-променеве напилювання, електронно-променеве та термічне випаровування, а також в умовах надвисокого та високого вакууму.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірюваних товщин плівок – від 1 нм до 5 мкм;

Діапазон вимірюваних частот – від 4 до 10 МГц;

Діапазон робочих температур – від 0 до 300°C.

3.3 Обґрунтування вибору мікроконтролера

ATmega103 — це 8-ми розрядний CMOS мікроконтролер з низьким енергоспоживанням, побудований на базі архітектури AVR RISC (слайд 04.00). Завдяки здатності виконувати високопродуктивні інструкції за один такт, ATmega103 досягає продуктивності, близької до 1 MIPS/МГц, що дозволяє розробникам оптимізувати енергоспоживання в залежності від вимог до обчислювальної потужності [15].

Ядро AVR, побудоване на вдосконаленій RISC архітектурі, включає потужний набір інструкцій та 32 регістри загального призначення. Всі 32 регістри безпосередньо з'єднані з арифметико-логічним пристроєм (АЛП), що дозволяє

здійснювати доступ до двох незалежних регістрів при виконанні однієї інструкції за один такт. Завдяки цьому архітектура забезпечує високу ефективність коду та значне збільшення пропускної здатності, до 10 разів в порівнянні зі стандартними CISC мікроконтролерами.

ATmega103 оснащений 128 Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою програмування в системі, 4 Кбайт EEPROM, 4 Кбайт SRAM, а також 32 лінії вводу/виводу (I/O), з яких 8 є вихідними, а 8 — вхідними. Він також має 32 загальних робочих регістри, контролер реального часу (RTC), чотири універсальні таймери/лічильники з режимами порівняння та ШИМ, UART, програмований таймер з функцією стеження та вбудованим тактовим генератором, SPI-послідовний порт, а також три програмовані режими економії енергоспоживання.

У режимі очікування "Idle Mode" зупиняється робота процесора (CPU), але зберігається функціонування SRAM, таймерів/лічильників, SPI-порту та системи переривань. Режим "Power Down" зберігає вміст регістрів, але зупиняє тактовий генератор і відключає інші функції мікроконтролера до наступного зовнішнього переривання або апаратної ініціалізації. У режимі "Power Save" тактовий генератор таймера продовжує працювати, що дозволяє зберігати контроль часу, в той час як інші функції мікроконтролера вимикаються.

Пристрій виготовлений із використанням технології енергонезалежної пам'яті з високою щільністю, розробленої компанією Atmel. Вбудована Flash-пам'ять дозволяє перепрограмувати програмний код безпосередньо в системі за допомогою послідовного інтерфейсу або стандартного програматора. Завдяки поєднанню вдосконаленого 8-розрядного RISC CPU і Flash-пам'яті з підтримкою внутрісистемного програмування на одному кристалі, мікроконтролер ATmega103 забезпечує високу продуктивність, гнучкість та енергоефективність, що робить його ідеальним рішенням для багатьох вбудованих систем управління.

AVR ATmega103 підтримує повний набір програмних інструментів для розробки, включаючи компілятори C, макроасемблери, відлагоджувачі-симулятори, внутрішні емулятори та набори для прототипування. Структурну схему мікроконтролера ATmega103 можна побачити на рисунку 3.10.

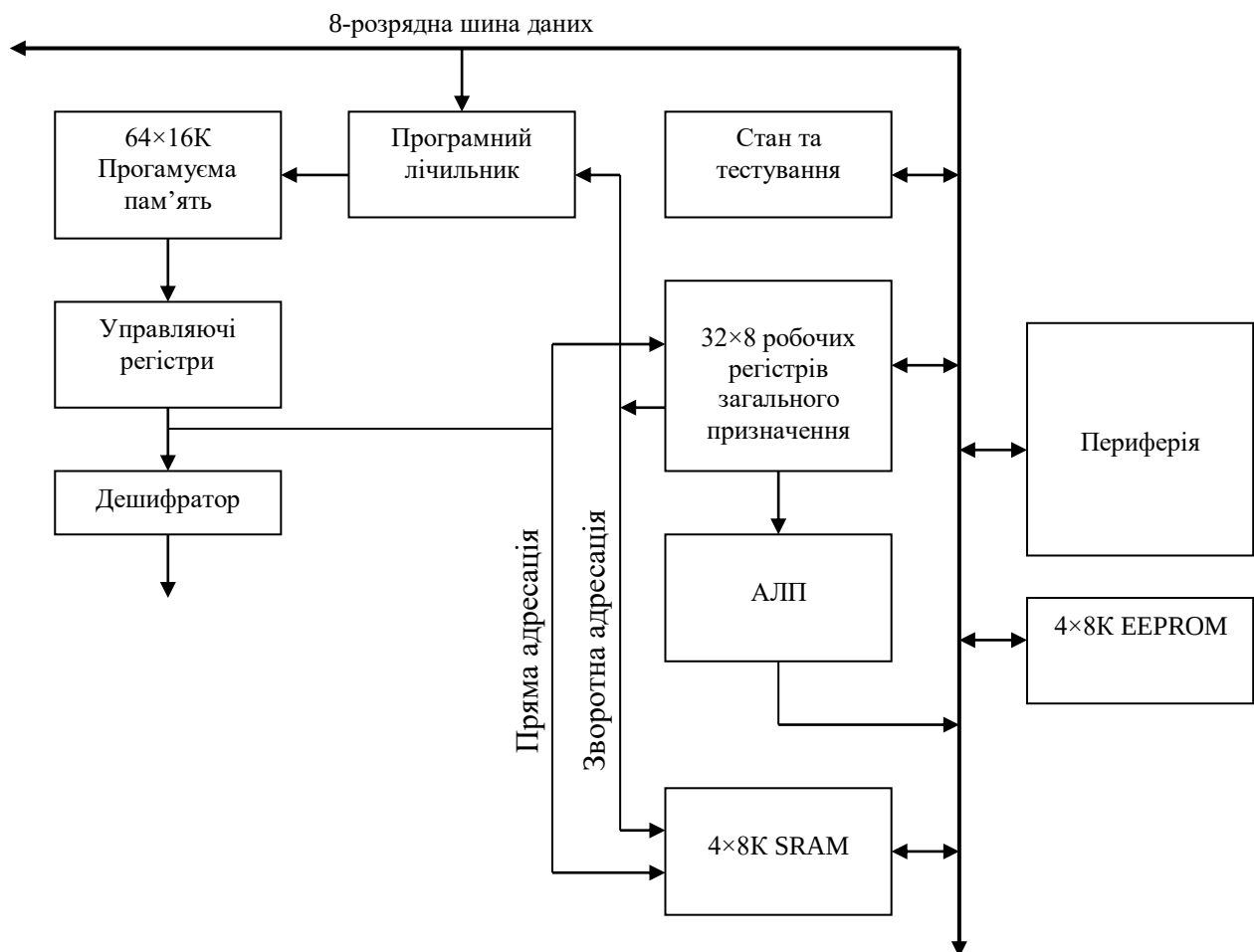


Рисунок 3.10 – Структурна схема мікроконтролера ATmega103

Мікроконтролер AVR ATmega103 є потужним та багатофункціональним пристроєм, який має ряд переваг і недоліків, що впливають на вибір його для конкретних застосувань [10].

Переваги AVR ATmega103:

1. Висока продуктивність і ефективність:

- ATmega103 використовує RISC-архітектуру, що дозволяє виконувати інструкції за один такт, що значно покращує швидкодію мікроконтролера.
- Завдяки цьому досягається висока продуктивність (1 MIPS/MHz), що забезпечує гарну ефективність при низькому споживанні енергії.

2. Великий обсяг пам'яті:

- Мікроконтролер має 128 Кбайт Flash-пам'яті для зберігання програмного коду, що є значним обсягом для багатьох додатків.

- Додатково є 4 Кбайт EEPROM для збереження налаштувань або інших даних, які повинні зберігатися між перезавантаженнями.

- 4 Кбайт SRAM для зберігання змінних даних.

3. Гнучкість і масштабованість:

- Наявність 32 ліній вводу/виводу, які можна налаштувати на вхід чи вихід, дає можливість підключати різноманітні периферійні пристрої.

- Кілька таймерів, лічильників, ШІМ виходів дозволяють гнучко налаштовувати різні режими роботи мікроконтролера для різних завдань.

4. Підтримка низького енергоспоживання:

- Мікроконтролер має кілька режимів економії енергії (наприклад, Power Down та Power Save), що дозволяє значно знижувати споживання енергії при неактивному режимі роботи.

- Це робить ATmega103 ідеальним для застосувань, де важлива тривала автономна робота.

5. Інтерфейси зв'язку:

- UART, SPI і I2C інтерфейси дають можливість легко інтегрувати мікроконтролер в системи з різними периферійними пристроями та іншими мікроконтролерами.

6. Підтримка внутрішнього програмування:

- Вбудована підтримка внутрішньосистемного програмування Flash-пам'яті через послідовний інтерфейс дозволяє легко перепрограмувати мікроконтролер без необхідності використання окремих програматорів.

Недоліки AVR ATmega103:

1. Обмежена швидкість роботи в порівнянні з сучасними мікроконтролерами:

- Хоча ATmega103 забезпечує хорошу продуктивність для багатьох завдань, його тактова частота (до 16 МГц) і архітектура можуть бути обмеженням для більш складних або високообчислювальних задач, порівняно з більш сучасними мікроконтролерами.

2. Не надто велика кількість вбудованих апаратних периферій:

- Мікроконтролер має обмежену кількість апаратних інтерфейсів (наприклад, обмежену кількість PWM каналів і відсутність вбудованих цифрових/аналогових перетворювачів), що може бути недостатньо для деяких високопродуктивних систем.

3. Немає вбудованої підтримки для високошвидкісних інтерфейсів:

- ATmega103 не підтримує інтерфейси високої швидкості, такі як USB або Ethernet, що може обмежити його використання в складніших системах з високими вимогами до пропускну здатності.

4. Обмежена кількість оперативної пам'яті (SRAM):

- Хоча ATmega103 має 4 Кбайт SRAM, цього може бути недостатньо для складних застосунків, які потребують великих обсягів оперативної пам'яті для збереження даних у процесі роботи.

5. Відсутність підтримки сучасних комунікаційних інтерфейсів:

- Для нових стандартів, таких як Bluetooth або Wi-Fi, потрібно використовувати зовнішні модулі, оскільки ATmega103 не має вбудованої підтримки цих протоколів.

6. Обмежена підтримка для сучасних стандартів низького енергоспоживання:

- Хоча мікроконтролер має режими економії енергії, він може бути не таким ефективним, як більш нові мікроконтролери, спеціально оптимізовані для застосувань, де критично важливе енергозбереження.

Висновок:

AVR ATmega103 є дуже потужним і універсальним мікроконтролером, що має велику кількість функцій для використання в різноманітних вбудованих системах, таких як системи управління, прилади вимірювання та інші. Однак, його обмеження по швидкості, пам'яті та апаратних можливостях можуть бути важливими при розробці більш складних або високошвидкісних систем. Для середніх і простих задач цей мікроконтролер залишається хорошим вибором завдяки своїй гнучкості, низькому енергоспоживанню та хорошій підтримці розробки.

Принципова схема мікроконтролера представлена на слайді 05.00.

4 РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Кореляційно-регресійний аналіз результатів експерименту

Метою будь-якого дослідження є отримання результатів, які можуть бути використані в майбутньому, тобто для прогнозування поведінки або розвитку досліджуваного явища. Для цього необхідно вивчити явище в контексті його взаємозв'язку з іншими факторами або величинами. Часто це потребує виділення певних змінних, які впливають на об'єкт дослідження, а також оцінки ступеня їхнього впливу. Важливим етапом є визначення якості цього впливу, а також характеристики зв'язку між досліджуваним явищем і чинниками, які на нього впливають. Цей зв'язок може бути як якісним, так і кількісним, що дозволяє зрозуміти його природу і прогнозувати можливі зміни в системі.

Існує два основних типи зв'язків. Якщо значення залежної змінної можна визначити безпосередньо після того, як відомі значення незалежних змінних, то такий зв'язок називають динамічним або функціональним. Це означає, що існує певний закон або функція, за якою значення залежної змінної обчислюються залежно від $x_1, x_2, \dots, x_k$, $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$.

Коли значення незалежних змінних дозволяють лише встановити загальну «середню» тенденцію в поведінці залежної змінної, такий зв'язок називається кореляційним. У цьому випадку не можна точно визначити залежність, але можна оцінити ймовірні варіації залежної змінної на основі незалежних величин. Завдання, яке полягає в знаходженні математичної форми цього кореляційного зв'язку, вирішується за допомогою регресійного аналізу. У кореляційному аналізі залежна змінна розглядається як випадкова величина, а незалежні змінні можуть бути або безпосередньо контролювані, або впливати на результат через певні проміжні механізми. Кореляційний аналіз дозволяє вивчати спільний розподіл всіх змінних, а також оцінювати точність передбачень або оцінок одних величин на основі інших.

Під час проведення експерименту отримані значення товщини плівки та відповідне положення заслінки (таблиця 4.1) (слайд 06.00).

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані

i	x _i	y _i	i	x _i	y _i	i	x _i	y _i
1	157	335	15	120	256	29	178	193
2	148	349	16	225	314	30	102	245
3	166	345	17	233	436	31	292	424
4	246	429	18	222	428	32	99	175
5	223	456	19	273	479	33	154	188
6	212	357	20	65	313	34	183	324
7	62	219	21	201	338	35	142	241
8	264	394	22	134	199	36	80	179
9	188	362	23	166	234	37	108	280
10	257	415	24	299	499	38	237	371
11	122	163	25	223	337	39	292	336
12	278	489	26	237	307	40	168	250
13	64	182	27	181	345	-	-	-
14	70	159	28	195	217	-	-	-

Нанісши пари (x_i, y_i) на координатну площину, ми отримаємо кореляційне поле (рисунок 4.1). За допомогою методів кореляційно-регресійного аналізу визначимо, чи існують функціональні зв'язки між статистичними даними.

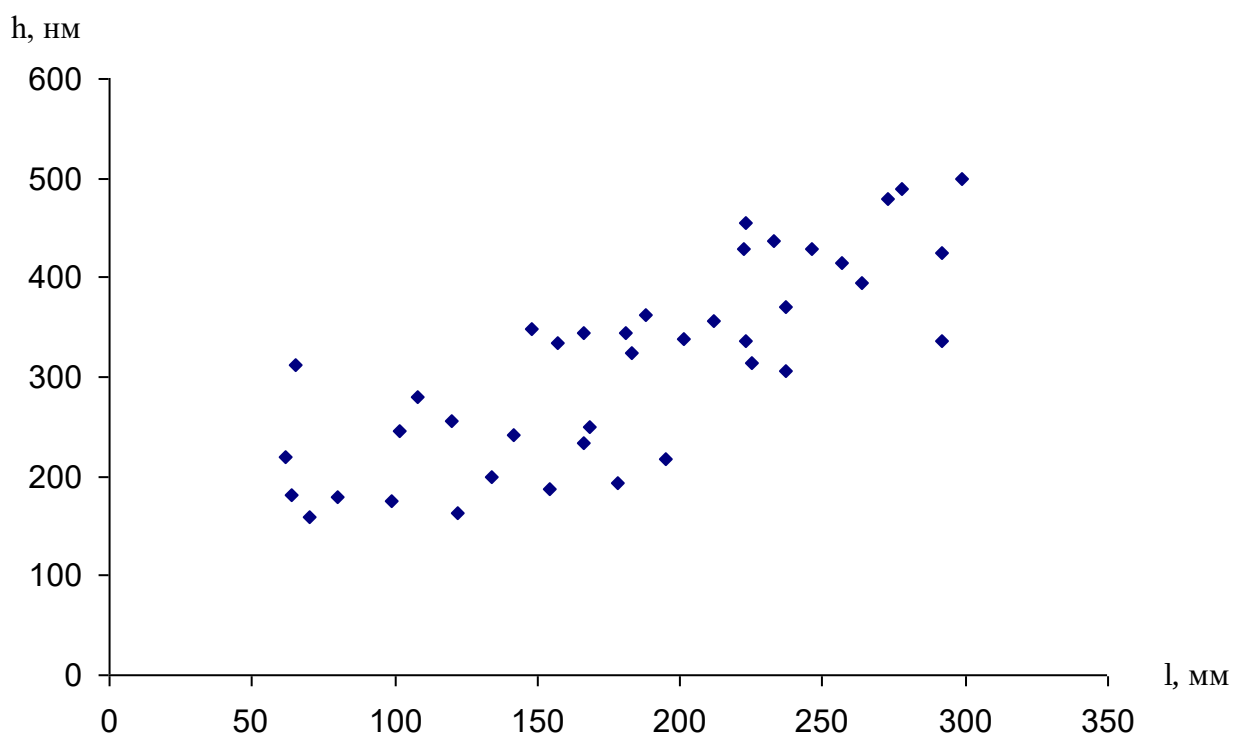


Рисунок 4.1 – Кореляційне поле статистичних даних

Описуємо математичну постановку задачі, припускаючи, що досліджується одна залежна змінна y у взаємозв'язку з однією незалежною змінною x (це так звана задача парної регресії).

Нехай залежність між x і y має вигляд (4.1):

$$y = a_0 + a_1 x + \varepsilon, \quad (4.1)$$

де ε – випадкова величина з математичним сподіванням 0 і дисперсією s^2 ;

a_0, a_1 – постійні коефіцієнти, називані параметрами моделі.

У цьому випадку рівняння регресії перетворюється в рівняння прямої (4.2):

$$\bar{y}(x) = M(y/x) = a_0 + a_1 \cdot x. \quad (4.2)$$

Припустимо, що незалежній змінній додали значення $x_1, x_2, \dots, x_n$, у результаті чого залежна змінна прийняла значення $y_1, y_2, \dots, y_n$. У припущенні лінійної залежності одержуємо n рівностей (4.3):

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.3)$$

Потрібно за значеннями пар (x_i, y_i) оцінити невідомі a_0, a_1 .

Як відомо, кожна задача оцінювання зв'язана з певним критерієм якості.

Таким критерієм є критерій найменших квадратів: $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \min$.

Запишемо цю суму інакше, так, щоб була видна залежність від a_0, a_1 (4.4):

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [\bar{y}(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2. \quad (4.4)$$

Необхідно відшукати такі значення невідомих параметрів a_0, a_1 , щоб функція прийняла найменше значення (4.5):

$$Q(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^n [y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i]^2 \quad (4.5)$$

Знаходимо частки похідні функції Q і прирівнюємо їх до нуля, у результаті чого приходимо до системи лінійних рівнянь (4.6):

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) \cdot x_i = 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

Після перетворень одержуємо систему (4.7):

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i, \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i. \end{cases} \quad (4.7)$$

Позначимо вибіркові середні:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i, \quad \overline{x^2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2.$$

$$\bar{x} = \frac{1}{40} \cdot \sum_{i=1}^{40} x_i = 182, \quad \bar{y} = \frac{1}{40} \cdot \sum_{i=1}^{40} y_i = 314,$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{40} \cdot \sum_{i=1}^{40} x_i \cdot y_i = 62382, \quad \overline{x^2} = \frac{1}{40} \cdot \sum_{i=1}^{40} x_i^2 = 37674.$$

У цих позначеннях після розподілу кожного рівняння системи на n вона прийме вид (4.8):

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \bar{x} = \bar{y}, \\ a_0 \cdot \bar{x} + a_1 \overline{x^2} = \overline{xy}, \end{cases} \quad (4.8)$$

а її рішення (шукані оцінки коефіцієнтів рівняння регресії) буде (4.9) [17]:

$$\begin{aligned} \hat{a}_0 &= \frac{\overline{x^2} \cdot \bar{y} - \overline{xy} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}, \\ \hat{a}_1 &= \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\hat{a}_0 = \frac{37674 \cdot 314 - 62382 \cdot 182}{37674 - 182^2} = 106,9,$$

$$\hat{a}_1 = \frac{62382 - 182 \cdot 314}{37674 - 182^2} = 1,14.$$

Пряма регресії має вигляд (рисунок 4.2) обчислюється рівнянням (4.10):

$$\hat{\bar{y}}(x) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x = \bar{y} - \hat{a}_1 \cdot \bar{x} + \hat{a}_1 \cdot x = \bar{y} + \hat{a}_1 (x - \bar{x}). \quad (4.10)$$

$$\hat{y}(x) = 106,9 + 1,14 \cdot x.$$

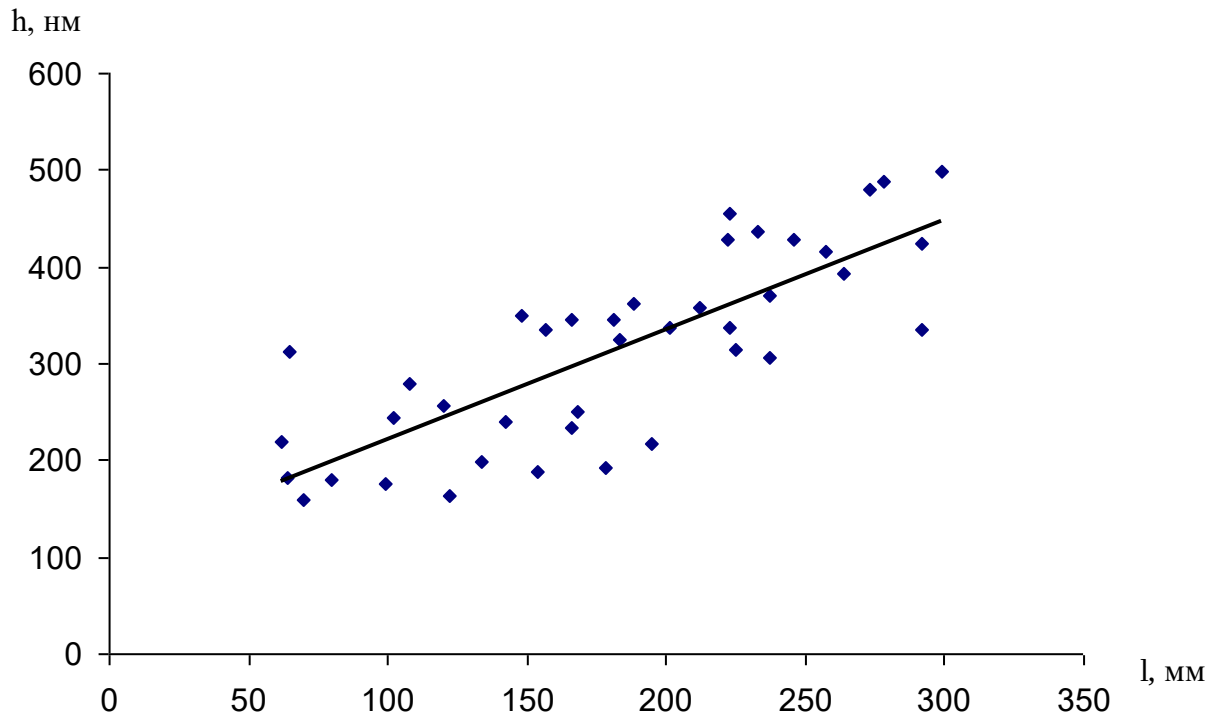


Рисунок 4.2 – Кореляційне поле статистичних даних і пряма регресії

Для вимірювання тісноти зв'язку при лінійній залежності використовується коефіцієнт кореляції $\bar{r}$ (4.11):

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - (1/n) \cdot (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - (1/n) \cdot (\sum_{i=1}^n x_i)^2) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i^2 - (1/n) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)^2)}}. \quad (4.11)$$

Значення $\bar{r}$ коливається від мінус 1 до плюс 1 і характеризує не тільки тісноту, але і напрям зв'язку. Додатне значення $\bar{r}$ означає прямий зв'язок, від'ємне – зворотній.

Якщо значення $\bar{r}$ близьке до 1, то існує тісний лінійний зв'язок між ознаками x_i , y_i . Якщо $\bar{r}$ близьке до 0, то кореляція слабка.

$$\bar{r} = \frac{62382 - 182 \cdot 314}{\sqrt{4678} \cdot \sqrt{9596}} = 0,796$$

Значення $\bar{r}$ близьке до одиниці, тобто вибір лінійної моделі виправданий.

Для визначення істотності тобто не випадковості коефіцієнта кореляції було використано критерій Стюдента [17]. Фактичне значення критерію Стюдента обчислюється за формулою (4.12):

$$t_{теор} = \frac{\bar{r}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\bar{r}^2}} \geq t_{кр}(k; \alpha), \quad (4.12)$$

де n – кількість вимірів; $\bar{r}$ – значення коефіцієнта кореляції за модулем; $k=n-2$ – число ступенів вільності; α – рівень істотності.

Якщо обчислене значення критерію Стюдента не менше, ніж критичне значення $t_{кр}(k; \alpha)$ [17], то знайдений коефіцієнт кореляції істотно оцінює зв'язок між змінними x та y .

$$t_{теор} = \frac{0,796\sqrt{40-2}}{\sqrt{1-0,796^2}} = 8,11$$

Порівнюємо з табличним значенням критичних точок розподілу Стюдента [17], для рівня істотності $\alpha=0,05$ визначаємо, що $t_{кр}(38;0,05)=2,0244$.

Умова виконується: $t_{теор} = 8,11 > t_{кр} = 2,0244$.

Визначимо істотність рівняння регресії, використовуючи критерій Фішера [17]. Для підтвердження істотності лінії регресії повинно виконуватись нерівність:

$$F_{теор} > F_{табл}(k_1; k_2; \alpha),$$

де n – кількість вимірів; $k_1=n-1$; $k_2=n-2$ – ступені свободи; $\alpha=0,05$ – рівень істотності;

$F_{табл}$ – табличне значення критерію Фішера.[17]

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{n-2}{n-1}$$

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{\sum_{i=1}^{40} y_i^2 - \frac{1}{40} \cdot \left(\sum_{i=1}^{40} y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^{40} (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{40-2}{40-1} = 2,13$$

$$F_{теор} = 2,13 > F_{табл}(39;38;0,05) = 1,7$$

Таким чином, рівняння регресії описує результати вимірювань в 1,7 рази точніше за середнє значення, що свідчить про адекватність моделі до експериментальних даних. Істотність зв'язку, виявлена в кореляційно-регресійному аналізі, підтверджена.

4.2 Визначення передаточної функції

Для розробки високоефективної системи керування необхідно мати математичну модель, що описує об'єкт керування. Для об'єктів, де відсутня залежність змінних стану та керування від просторових координат (лінійні багатовимірні системи з зосередженими параметрами), зазвичай використовуються системи лінійних звичайних диференціальних рівнянь або їх аналоги в просторі Лапласа. Розглянемо багатовимірну лінійну систему, яка має m входів керування, l збурень та k виходів.

Модель лінійної системи з зосередженими параметрами в часовій області:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Df(t), \\ x(0) &= x_0, \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}$$

де $u(t)$ – вектор керувань (входів), $u \in R^m$; $x(t)$ – вектор стану системи, $x \in R^n$; $f(t)$ – вектор збурювань, $f \in R^l$;

$y(t)$ – вектор виходів, $y \in R^k$; A – матриця розмірності $n \times n$; B – матриця розмірності $n \times m$; D – матриця розмірності $n \times l$; C – матриця розмірності $k \times n$.

Застосовуючи перетворення Лапласа до системи, одержимо еквівалентну модель у комплексній області:

$$\begin{aligned}y(s) &= C\Phi(s)x_0 + C\Phi(s)Bu(s) + C\Phi(s)Df(s) \quad \text{або} \\ y(s) &= W_{y0}(s)x_0 + W_{yu}(s)u(s) + W_{yf}(s)f(s)\end{aligned}$$

Частотне або часове представлення системи вибирається залежно від зручності, оскільки для сталих матриць A , B , C і D ці два підходи є еквівалентними. Для побудови таких моделей існують два основні методи: перший — це використання фундаментальних фізичних законів збереження (речовини, енергії тощо), а другий — відновлення параметрів моделей на основі емпіричних даних. Практично ж найчастіше застосовується саме другий метод.

Для створення математичної моделі об'єкта керування був застосований метод відновлення параметрів моделі на основі емпіричних даних. Для цього з

використанням експериментальної установки були отримані дані, які дозволили дослідити об'єкт керування та побудувати його модель. Експериментальні дані включають вимірювання товщини нанесеного шару, h , у певні моменти часу. Отримані результати були апроксимовані за допомогою програмного середовища MatLab. Для побудови перехідного процесу були використані значення товщини h та часу t , представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення h та t для побудови перехідного процесу

t, c	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
h, nm	25	30	41	55	70	99	127	150	180	211
t, c	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57
h, nm	246	262	284	313	331	357	375	401	424	440

На рисунку 4.3 товщина плівки, виміряна в нанометрах, відкладена по осі ординат, а час, в секундах, по осі абсцис. Експериментальні значення, отримані в дискретні моменти часу, позначені точками на графіку. Нормований перехідний процес показаний на рисунку 4.4.

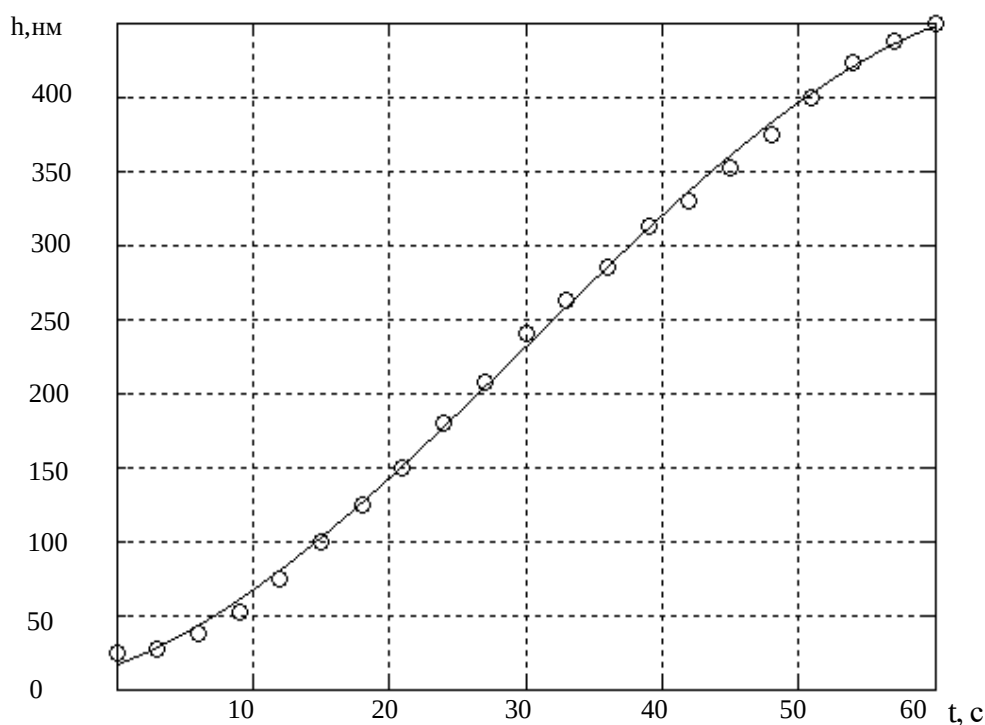


Рисунок 4.3 – Експериментальний перехідний процес

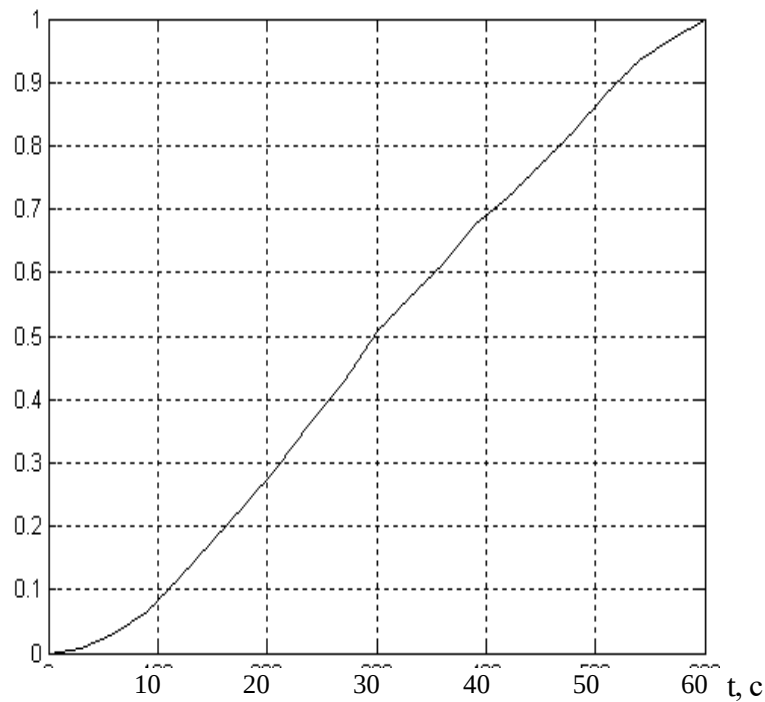


Рисунок 4.4 – Нормований перехідний процес

Структура апроксимуючого вираження для передаточної функції об'єкта може бути обрана в загальному випадку у вигляді:

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)^q} \quad (4.13)$$

Коефіцієнт підсилення об'єкта керування k можна знайти за графіком перехідного процесу. Постійні часу передаточної функції можуть бути знайдені методом площ і геометричним методом.

Коефіцієнт підсилення може бути визначений з наступного співвідношення:

$$y_{\infty}(h) = k \cdot c, \quad \text{де } c = 20, \text{ а } y_{\infty}(h) \text{ – усталене значення виходу (товщина плівки).}$$

$$\text{Звідси одержуємо,} \quad k = \frac{450}{20} = 22,5.$$

4.2.1 Побудова моделі ланки першого порядку геометричним методом

Ланка першого порядку з запізнюванням визначається за (4.2) [16]:

$$W(p) = \frac{k e^{-p\tau}}{T p + 1} \quad (4.14)$$

Для визначення величини запізнювання та постійної часу скористаємося графіком перехідного процесу (рис. 4.3). Щоб знайти постійну часу, потрібно провести пряму, паралельну осі абсцис на рівні $0,63k_c = 283,5$ (рис. 4.5).

Постійна часу $T = 37,22$ с. $T_1 = T - \tau$, где $\tau = 35$ с $\Rightarrow T_1 = 2,22$ с. Побудуємо перехідний процес для такої ланки і подивимося наскільки він збігається з експериментальним.

Таким чином, передаточна функція об'єкта в даному випадку має наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{22,5 e^{-35p}}{2,22p + 1} \quad (4.15)$$

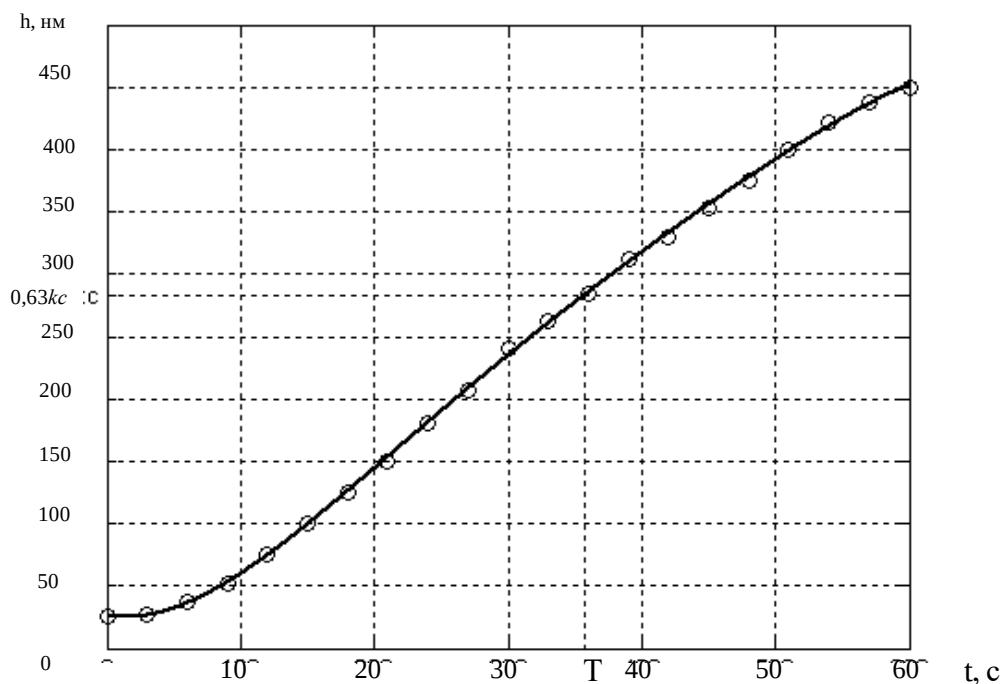


Рисунок 4.5 – Визначення постійної часу по графіку перехідного процесу

4.2.2 Побудова моделі ланки другого порядку з використанням методом площ

При $q = 1$ і $\tau = 0$ одержуємо об'єкт другого порядку. Розрахуємо постійні часу T_1 і T_2 за допомогою методу площ:

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (4.16)$$

Перехідний процес, отриманий за передаточною функцією першого порядку наведено на рис. 4.6.

Для визначення параметрів передаточної функції методом площ необхідно побудувати графіки функцій:

- 1) $\delta(t) = 1 - h(t)$;
- 2) $\delta_2(t) = t \cdot \delta(t)$.

Тоді можна визначити площі під графіками даних функцій (S_1 і S_2 відповідно). Результати обчислень представлені нижче.

$$S_1 = 0,522, S_2 = 0,547.$$

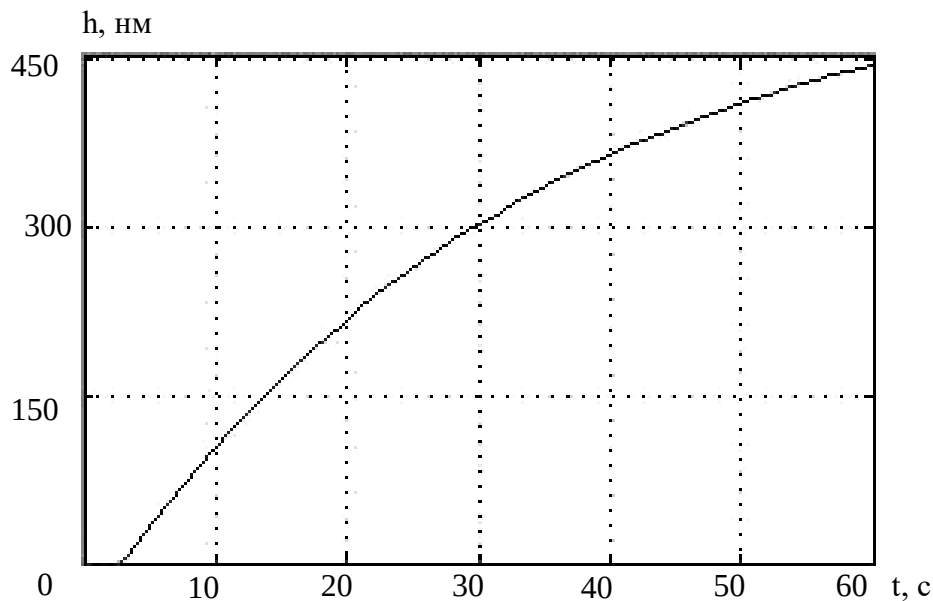


Рисунок 4.6 – Перехідний процес, отриманий за передаточною функцією першого порядку

Графіки даних функцій приведені на рис. 4.7 і 4.8 відповідно.

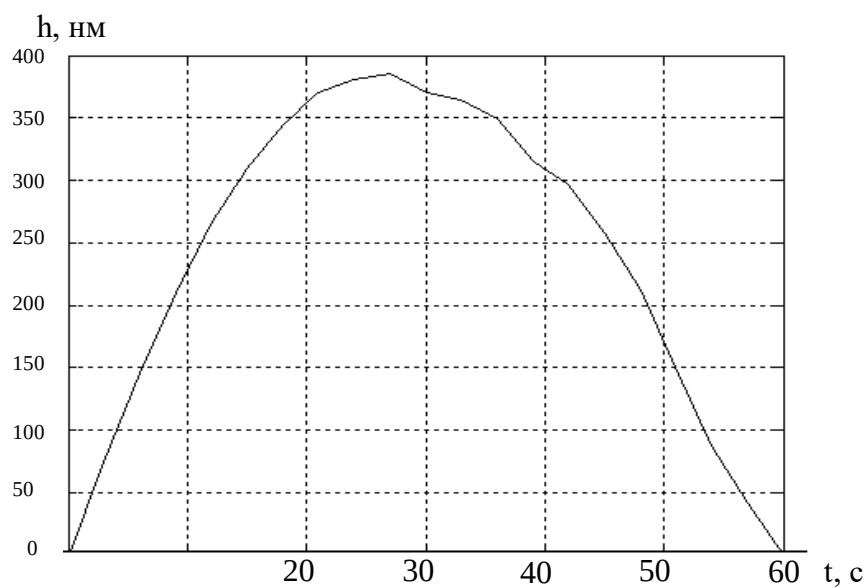


Рисунок 4.8 – Графік функції $\delta_2(t)$

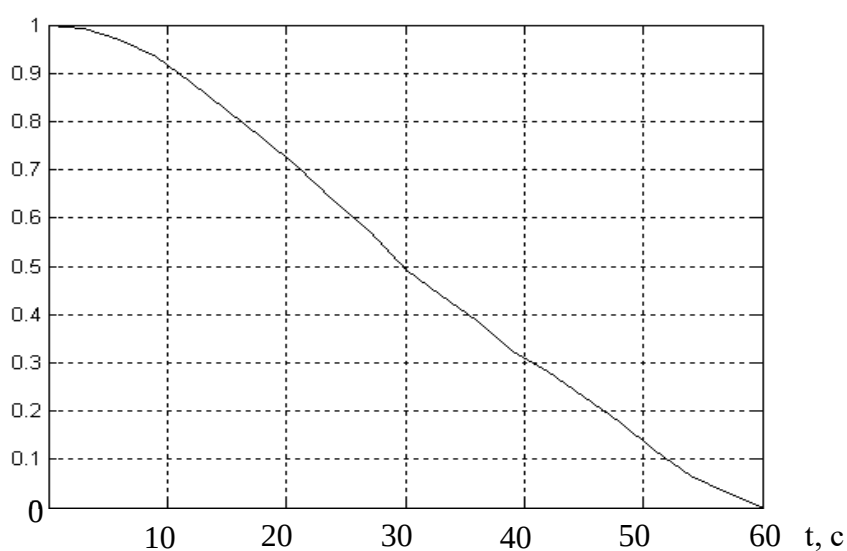


Рисунок 4.7 – Графік функції $\delta(t)$

Тепер необхідно перевірити співвідношення S_2 / S_1^2 . Якщо $(S_2 / S_1^2) < 0,75$, то метод площ застосовувати не можна, необхідно використовувати метод грубих площ. Отже, застосуємо метод грубих площ.

Для цього потрібно знайти точку перегину графіка перехідного процесу. Точка перегину має координати: $t = 9\text{с}$, $y(t_n) = 0,09$.

Було взято точку t правіше точки перегину ($t > t_n$):

$$T_1 = \varepsilon(t)^{-1} \int_t^{\infty} \varepsilon(\tau) d\tau, \quad (4.17)$$

де $I_n = \int_t^{\infty} \varepsilon(\tau) d\tau$ – площа кривої після точки перегину (межі інтегрування: від $9(t_n)$ до $60(\infty)$), причому, $\varepsilon(\tau) = k \cdot \delta(t)$, де $\delta(t) = 1 - h(t)$, отже: $T_1 = \frac{1}{k \cdot \delta(t_n)} \cdot I_n$.

$$T_2 = S_1 - T_1.$$

Таким чином, реалізуючи даний алгоритм, отримані наступні результати:

$$T_1 = 0,5 \text{с}, T_2 = 0,022 \text{с}.$$

Передаточна функція визначається за формулою:

$$W(p) = \frac{22,5}{(0,5p + 1)(0,022p + 1)} \quad (4.18)$$

Графік перехідного процесу для такої ланки наведений на рис. 4.9

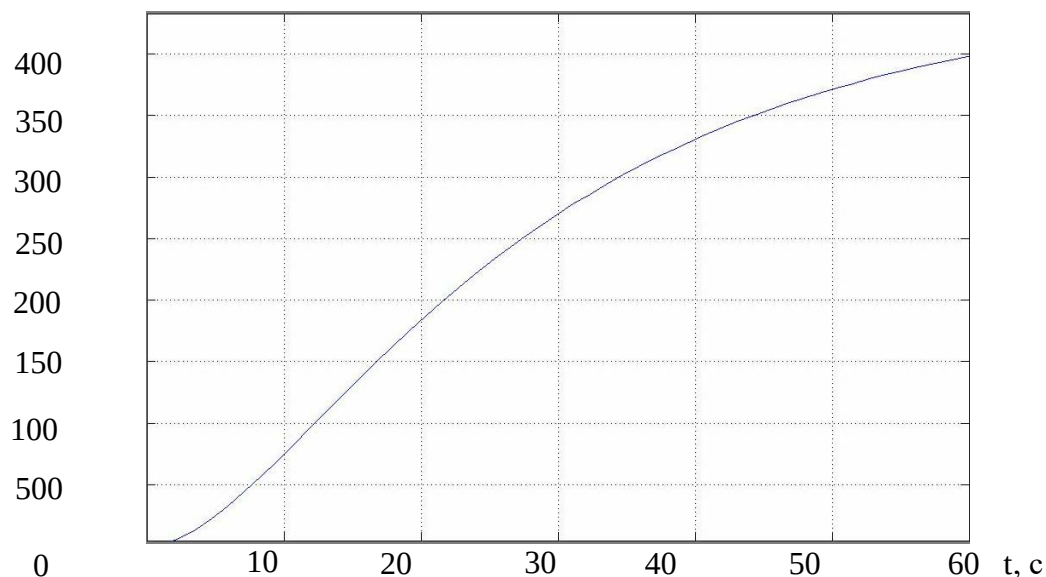


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу для ланки другого порядку, розрахованого за методом площ

4.3 Вибір апроксимуючої моделі

Для вибору кращої апроксимуючої моделі об'єкта керування серед знайдених моделей порівнюємо теоретичні й експериментальні перехідні процеси [17]. Для оцінки якості отриманих передаточних функцій, що описують об'єкт керування, обчислимо оцінку χ^2 за формулою:

$$\chi^2 = \frac{1}{k} \sqrt{\sum_1^6 (y_i - y_{i_real})^2} \quad (4.19)$$

Розрахунок похибок:

k = 22,5;

y_real = [24,44 60 93,33 125,5 154,44 180];

y1 = [32 72 101 122 136 146];

y2 = [31,1 73,3 106,67 131,11 148,89 160];

tmp = 0;

for i = 1:6

tmp = tmp + (y_real(i) - y1(i))²;

end

x1 = sqrt(tmp)/k

tmp = 0;

for i = 1:6

tmp = tmp + (y_real(i) - y2(i))²;

end

x2 = sqrt(tmp)/k

x1 = 0,5181

x2 = 0,0871

x1 – відповідає оцінці ланки з запізнюванням; x2 – відповідає аперіодичній ланці другого порядку, розрахованій методом площ.

Оскільки найменша оцінка x2 вийшла для аперіодичної ланки другого порядку, розрахованого методом площ, то цю ланку було прийнято як модель розроблюваної системи. Передаточна функція об'єкта керування має вигляд:

$$W(p) = \frac{22,5}{(0,5p + 1)(0,022p + 1)}.$$

4.4 Дослідження динаміки системи автоматичного регулювання

У цій схемі використовується принцип регулювання за відхиленням фактичного значення вихідної величини об'єкта від її заданого значення. Для реалізації цього принципу система автоматичного регулювання (САР) повинна бути замкнутою. Головною особливістю та перевагою цієї схеми є те, що САР реагує на відхилення фактичного значення регульованої величини від заданого значення, незалежно від причин, що викликали ці відхилення [16].

4.4.1 Розробка схеми електричної структурної системи

Схема електрична структурна САР представлена на рис. 4.10.

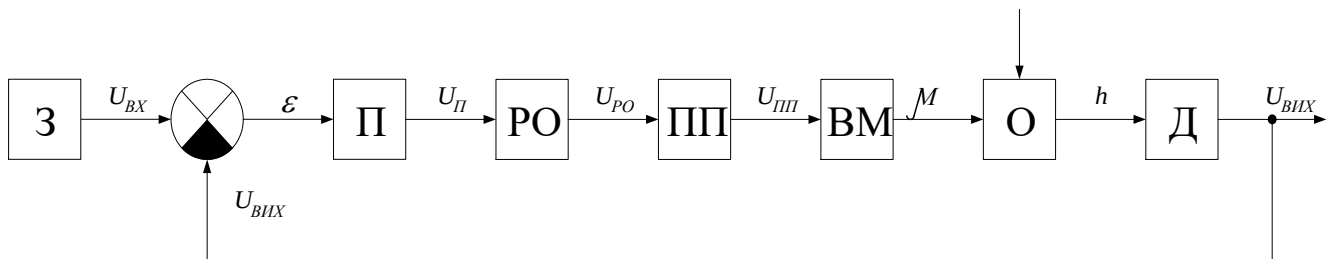


Рисунок 4.10 – Функціональна схема САР

П – підсилювач; ПП – підсилювач потужності; О – об'єкт регулювання; З – задаючий пристрій; РО – регульований орган (мікроконтролер ATmega103); ВМ – виконавчий механізм – вакуумний кроковий двигун VSS/VSH; Д – кварцовий датчик; μ – положення заслінки; $U_{ВІХ}$ – вихідна напруга датчика; $U_{ВХ}$ – задаюче діяння (напруга); $U_{П}$ – вихідна напруга підсилювача; $U_{ПП}$ – вихідна напруга підсилювача потужності; $U_{РО}$ – вихідна напруга мікроконтролера ATmega103; h – товщина органічної плівки; ε – вхідний сигнал елемента порівняння.

Рівняння елементів системи:

- підсилювач:

$$U_{П} = k_{П} \cdot \varepsilon;$$

- регулювальний орган:

$$U_{РО} = k_{РО} \cdot U_{П};$$

- підсилювач потужності:

$$U_{ПП} = k_{ПП} \cdot U_{РО};$$

- елемент порівняння:

$$\varepsilon = U_{BX} - U_{ВИХ}.$$

Вихідні дані:

$$T_{B1} = 0,035\text{с}; T_{B2} = 0,20\text{с}; T_D = 0,75\text{с}; k_D = 0,5; k_{PO} = 0,25; k_{ПП} = 3; k_B = 22,5; k_{П} = 2.$$

При створенні структурної схеми САР були застосовані диференціальні рівняння елементів схеми. Ці рівняння були перетворені у передаточні функції відповідних елементів системи. Передаточна функція елемента — це відношення Лапласового зображення вихідної величини до Лапласового зображення вхідної величини при нульових початкових умовах.

В результаті аналізу математичної моделі передаточна функція об'єкту регулювання разом з виконавчим механізмом (кроковим двигуном) має вигляд:

$$W_B(p) = \frac{k_B}{(T_{B1}p + 1)(T_{B2}p + 1)}$$

Рівняння кварцевого датчика:

$$T_D \cdot \frac{dU_{ВИХ}}{dt} + U_{ВИХ} = k_D \cdot h$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$T_D \cdot p \cdot \overline{U_{ВИХ}} + \overline{U_{ВИХ}} = k_D \cdot \bar{h}$$

Передаточна функція іонізаційного датчика:

$$W_D(p) = \frac{\overline{U_{ВИХ}}}{\bar{h}} = \frac{k_D}{T_D \cdot p + 1}$$

Рівняння підсилювача потужності:

$$U_{ПП} = k_{ПП} \cdot U_{PO}$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$\overline{U_{ПП}} = k_{ПП} \cdot \overline{U_{PO}}$$

Передаточна функція підсилювача потужності:

$$W_{ПП}(p) = \frac{\overline{U_{ПП}}}{\overline{U_{PO}}} = k_{ПП}$$

Рівняння регулювального органу (мікроконтролер ATmega103):

$$U_{PO} = k_{PO} \cdot U_{П}$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$\overline{U_{PO}} = k_{PO} \cdot \overline{U_{II}}$$

Передаточна функція регулювального органу:

$$W_{PO}(p) = \frac{\overline{U_{PO}}}{\overline{U_{II}}} = k_{PO}$$

Рівняння підсилювача:

$$U_{II} = k_{II} \cdot \varepsilon$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$\overline{U_{II}} = k_{II} \cdot \overline{\varepsilon}$$

Передаточна функція підсилювача:

$$W_{II}(p) = \frac{\overline{U_{II}}}{\overline{\varepsilon}} = k_{II}$$

Рівняння елемента порівняння:

$$\varepsilon = U_{BX} - U_{ВНХ}$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$\overline{\varepsilon} = \overline{U_{BX}} - \overline{U_{ВНХ}}$$

Структурна схема САР наведена на рис. 4.11 (слайд 07.00).

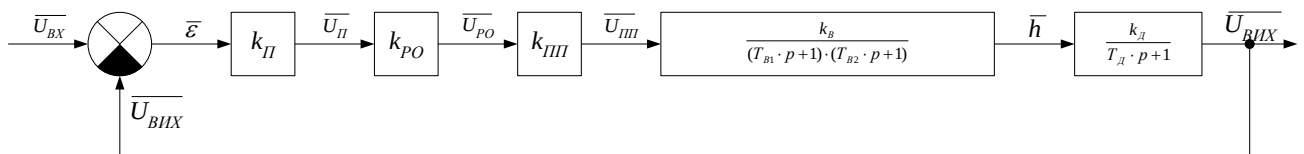


Рисунок 4.11 – Структурна схема системи автоматичного регулювання

При послідовному з'єднанні елементів системи передаточна функція системи дорівнює добутку передаточних функцій всіх її елементів (слайд 07.01).

$$W_p(p) = W_{II}(p) \cdot W_{PO}(p) \cdot W_{III}(p) \cdot W_B(p) \cdot W_D(p) = \frac{k_{II} \cdot k_{PO} \cdot k_{III} \cdot k_B \cdot k_D}{(T_{B1} \cdot p + 1) \cdot (T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_D \cdot p + 1)}$$

Введемо позначення:

$$K = k_{II} \cdot k_{PO} \cdot k_{III} \cdot k_B \cdot k_D$$

Тоді, після деяких змін для спрощення виду формули, передаточна функція розімкненої системи матиме вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_0 p + 1)}$$

Передаточна функція замкнутої системи, з врахуванням того, що $W_{33}(p) = 1$, розраховується за формулою

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_0 p + 1) + k}$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_2 T_0 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) p^2 + (T_1 + T_2 + T_0) p + 1 + k = 0$$

Підставивши відповідні значення сталих часу та коефіцієнтів підсилення, отримаємо

$$0,00092 p^3 + 0,151 p^2 + 0,95 p + 6 = 0$$

4.4.2 Побудова АФЧХ розімкнутої системи

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), виділити дійсну $P(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення:

$$\begin{aligned} W_p(j\omega) &= \frac{k}{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1)} = \frac{k}{T_1 T_2 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)(j\omega)^2 + (T_1 + T_2 + T_0)j\omega + 1} = \\ &= \frac{k}{-j T_1 T_2 T_0 \omega^3 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) \omega^2 + j(T_1 + T_2 + T_0) \omega + 1} = \\ &= \frac{k}{1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) \omega^2 + j((T_1 + T_2 + T_0) \omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)} = \\ &= \frac{k((1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) \omega^2) - j((T_1 + T_2 + T_0) \omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3))}{(1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) \omega^2)^2 + ((T_1 + T_2 + T_0) \omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)^2} \end{aligned}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \frac{k(1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) \omega^2)}{(1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) \omega^2)^2 + ((T_1 + T_2 + T_0) \omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)^2} = \\ &= \frac{5(1 - 0,151 \omega^2)}{(1 - 0,151 \omega^2)^2 + (0,95 \omega - 0,00092 \omega^3)^2} \end{aligned}$$

$$Q(\omega) = \frac{k(-j((T_1 + T_2 + T_0)\omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3))}{(1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2)^2 + ((T_1 + T_2 + T_0)\omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)^2} =$$

$$= \frac{5(-j(0,95\omega - 0,00092\omega^3))}{(1 - 0,151\omega^2)^2 + (0,95\omega - 0,00092\omega^3)^2}$$

Далі побудуємо графік АФЧХ (рис. 4.12)

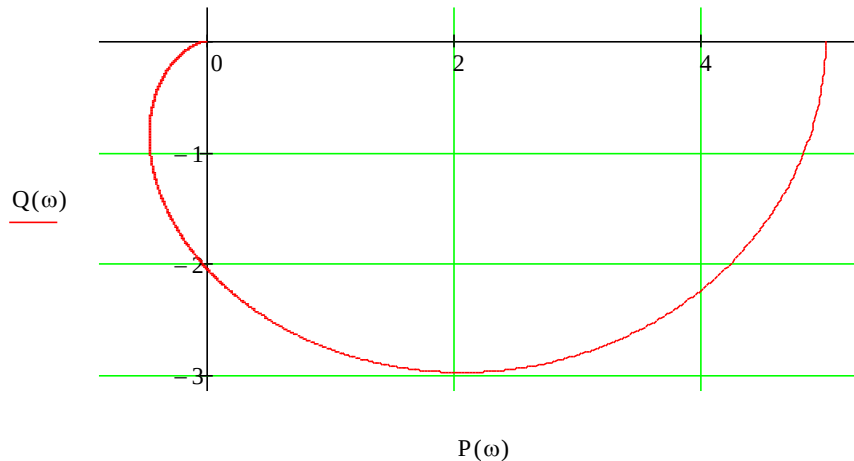


Рисунок 4.12 – АФЧХ розімкнутої системи

4.4.3 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи

Для побудови ЛАЧХ асимптотичним методом передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,194} = 5,163 \text{ с}^{-1}, \quad \omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,00633} = 158,1 \text{ с}^{-1}, \quad \omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{0,75} = 1,33 \text{ с}^{-1}$$

належать аперіодичним ланкам

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот в логарифмічному масштабі (рис. 4.13). Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_0$ являє собою пряму з нахилом 0 дБ/дек, так як система не містить інтегруючої динамічної ланки. Ця пряма або її продовження при $\omega=1$ повинна мати ординату, яка дорівнює $20 \lg k = 14$ дБ ($k = 5$ – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи) [18].

Після кожної із спрягаючих нахил характеристики $L(\omega)$ змінюється порівняно з попереднім значенням на - 20 дБ/дек, так як дані частоти належать аперіодичним динамічним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших ω_2 , має нахил - 60 дБ/дек.

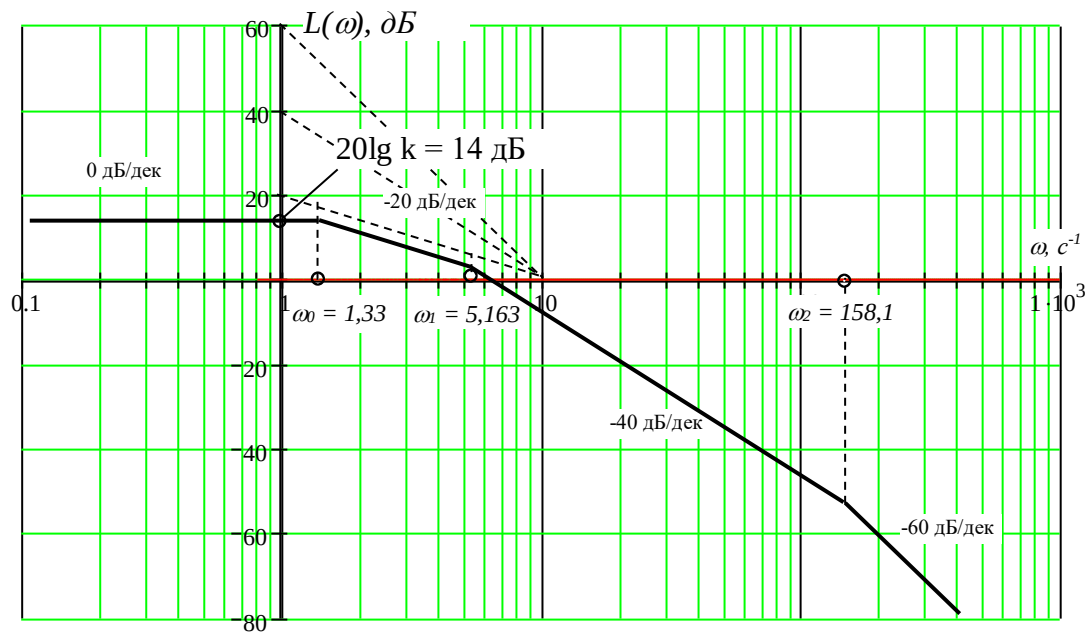


Рисунок 4.13 – ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$

4.4.4 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок (рис. 4.14):

$$\phi(\omega) = (-\arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2) - \arctg(\omega T_0)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (9)$$

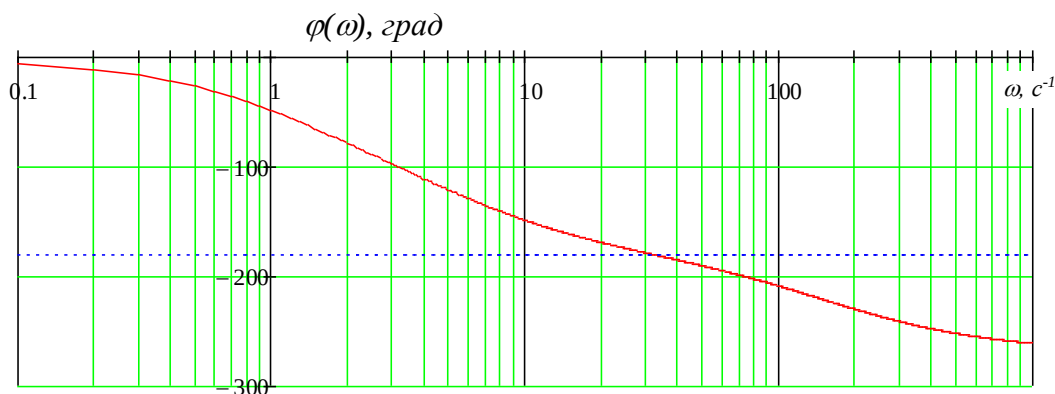


Рисунок 4.14 – ЛФЧХ розімкнутої системи $\varphi(\omega)$

4.4.5. Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

Для цього необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення $P_s(\omega)$:

$$W_s(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_0 p + 1) + k} = \frac{k}{T_1 T_2 T_0 (p)^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)(p)^2 + (T_1 + T_2 + T_0)p + k};$$

Підставимо $p = j\omega$, отримаємо:

$$\begin{aligned} W_s(\omega) &= \frac{k}{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1) + k} = \\ &= \frac{k}{T_1 T_2 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)(j\omega)^2 + (T_1 + T_2 + T_0)j\omega + k + 1} = \\ &= \frac{k}{-jT_1 T_2 T_0 \omega^3 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2 + j(T_1 + T_2 + T_0)\omega + k + 1} = \\ &= \frac{k}{(k + 1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2) + j((T_1 + T_2 + T_0)\omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)} = \\ &= \frac{k((k + 1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2) - j((T_1 + T_2 + T_0)\omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3))}{(k + 1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2)^2 + ((T_1 + T_2 + T_0)\omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)^2} \end{aligned}$$

Виділимо дійсну частину:

$$\begin{aligned} P_s(\omega) &= \frac{k(k + 1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2)}{(k + 1 - (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0)\omega^2)^2 + ((T_1 + T_2 + T_0)\omega - T_1 T_2 T_0 \omega^3)^2} = \\ &= \frac{5(5 + 1 - 0,151\omega^2)}{(5 + 1 - 0,151\omega^2)^2 + (0,95\omega - 0,00092\omega^3)^2} \end{aligned}$$

Побудуємо графік дійсної частотної характеристики замкнутої системи (рис. 4.15).

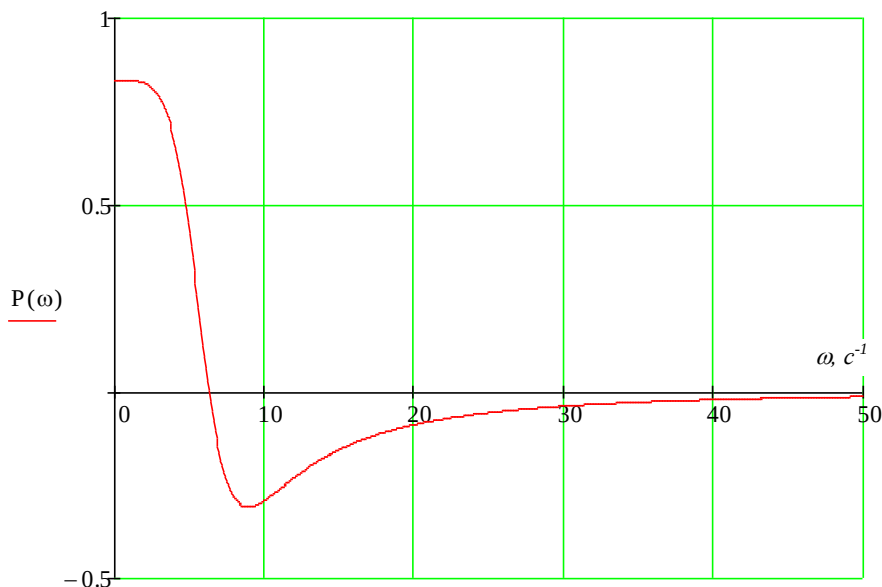


Рисунок 4.15 – Дійсна частотна характеристика замкнутої системи

4.4.6. Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості

Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначають за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи [18]. Розімкнута система автоматичного регулювання стійка в тому разі, коли складається тільки із стійких динамічних ланок (має не більше однієї інтегруючої ланки). Якщо розімкнута система автоматичного керування є стійкою, то для стійкості замкнутої системи необхідно і достатньо, щоб АФХ розімкнутої системи не охоплювала точку з координатами $(-1, j0)$ при зміні частоти від 0 до ∞ (рис. 4.16).

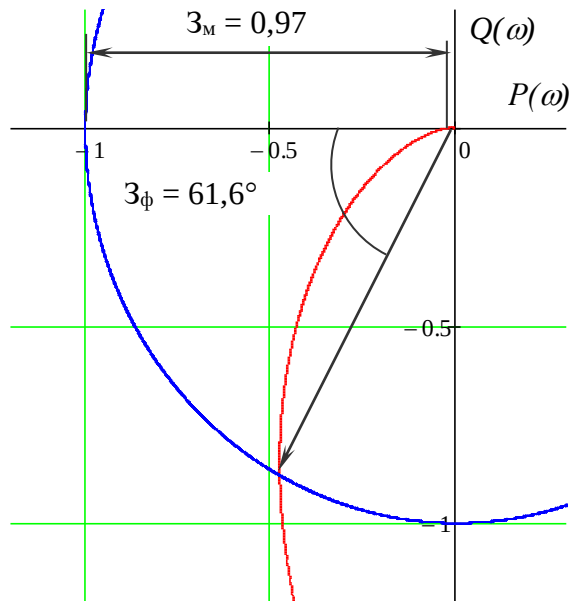


Рисунок 4.16 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Таким чином маємо: за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем $Z_M = 0,97$; за фазою – $Z_\phi = 61,6^\circ$.

Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру k_2 , тому що його легко змінювати шляхом зміни жорсткості пружини:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_2 T_0 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) p^2 + (T_1 + T_2 + T_0) p + 1 + k_2 \cdot k_0 = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно k_1 :

$$K(p) = - \frac{T_1 T_2 T_0 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_0 + T_2 T_0) p^2 + (T_1 + T_2 + T_0) p + 1}{k_0}$$

Підставивши $p = j\omega$ та виділивши дійсну і уявну частини даного виразу, отримаємо:

$$K(\omega) = - \frac{(-jT_1T_2T_0\omega^3 - (T_1T_2 + T_1T_0 + T_2T_0)\omega^2 + j(T_1 + T_2 + T_0)\omega + 1)}{k_0} =$$

$$= \frac{((T_1T_2 + T_1T_0 + T_2T_0)\omega^2 - 1)}{k_0} + j \frac{(T_1T_2T_0\omega^3 - (T_1 + T_2 + T_0)\omega)}{k_0}$$

$$P(\omega) = \frac{((T_1T_2 + T_1T_0 + T_2T_0)\omega^2 - 1)}{k_0}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_1T_2T_0\omega^3 - (T_1 + T_2 + T_0)\omega)}{k_0}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру k_2 при зміні частоти від $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 4.17).

Оскільки у стійкій системі всі корені містяться ліворуч від уявної вісі, при обході її від $-\infty$ до $+\infty$ ділянка стійкості також буде ліворуч від добутої кривої. Для зручності відшукування ділянки стійкості можна нанести на криву (рис. 9) штриховку зліва при русі від $-\infty$ до $+\infty$. З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_2 , яке в даному випадку дорівнює $k_{2кр} = 311$. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача $k_2 = 10$ входить в зону стійкості, а значить для подальших розрахунків можна залишити задане значення цього параметра [16].

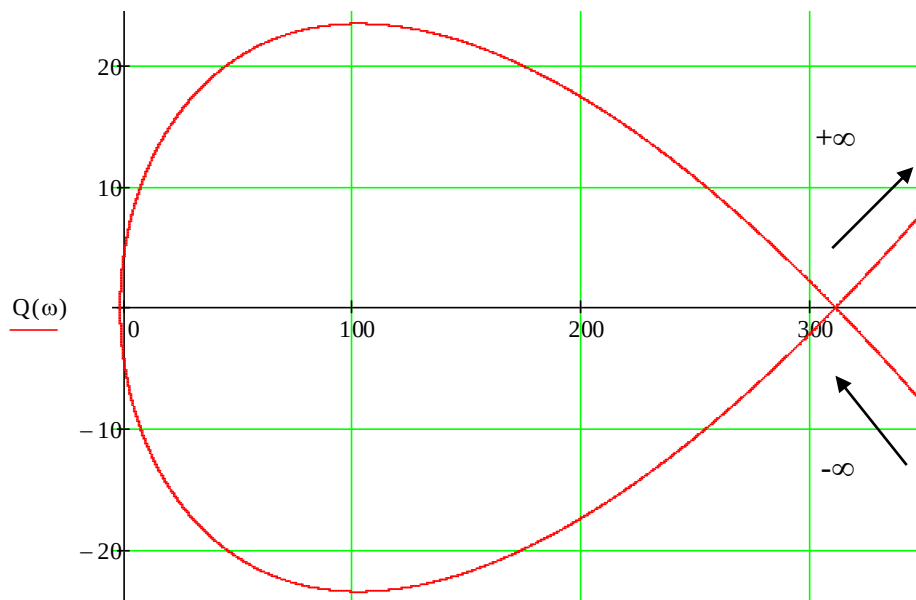


Рисунок 4.17 – D-розбиття в площині параметру k_2

4.4.7. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої САР полягає в визначенні запасу стійкості (по модулю і фазі), та частоти зрізу. Для визначення цих величин будуємо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, при чому виконуємо їх взаємне розміщення (рис. 4.18).

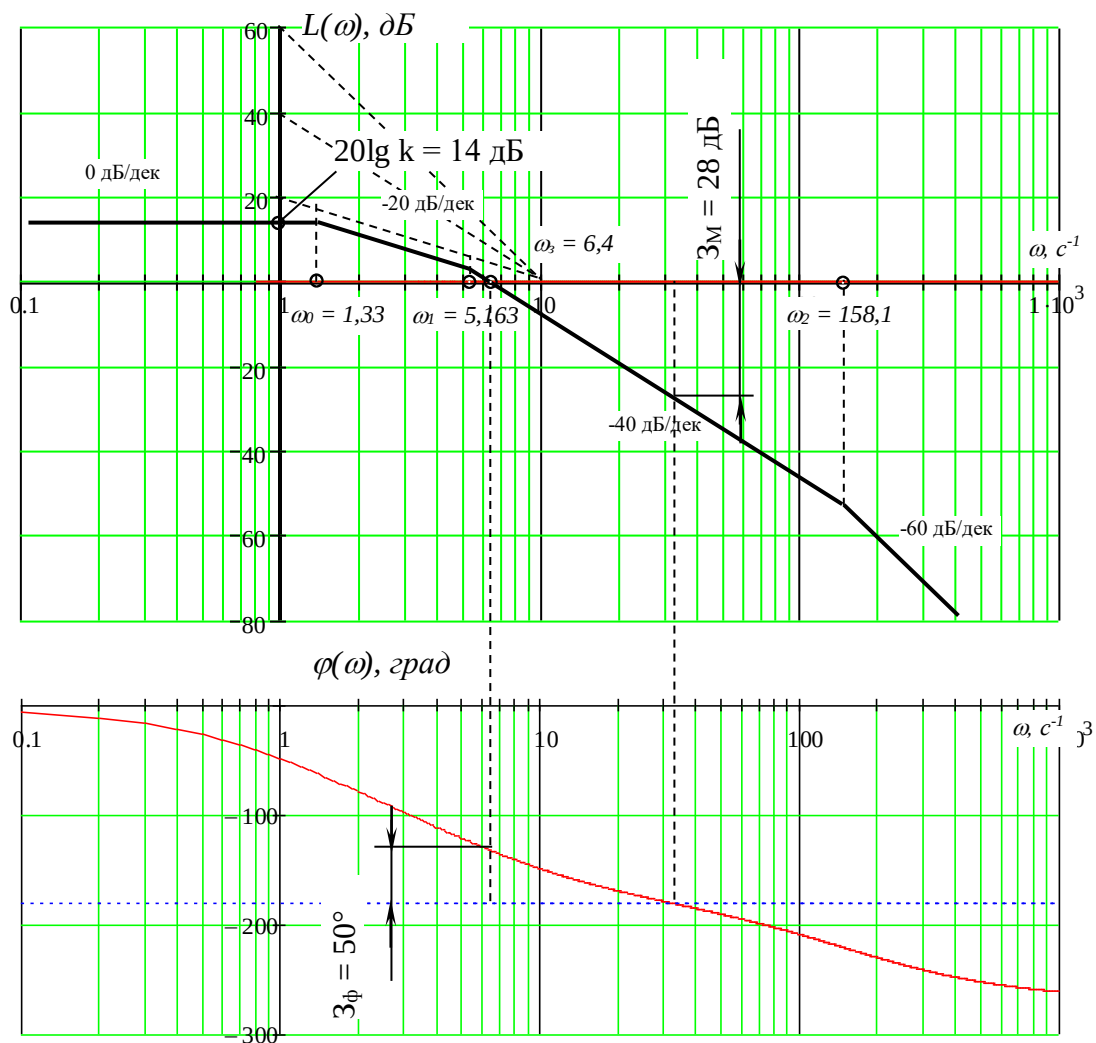


Рисунок 4.18 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР

по ЛАЧХ розімкненої системи

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_z = 6,4 c^{-1}$, звідки можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови, $t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} = 0,98 c$; запас стійкості по амплітуді $z_A \approx 28 dB$, запас стійкості по фазі $z_A \approx 50^\circ$

4.4.8. Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Регульована величина в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega \quad (10)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо наступний графік (рис. 4.19)

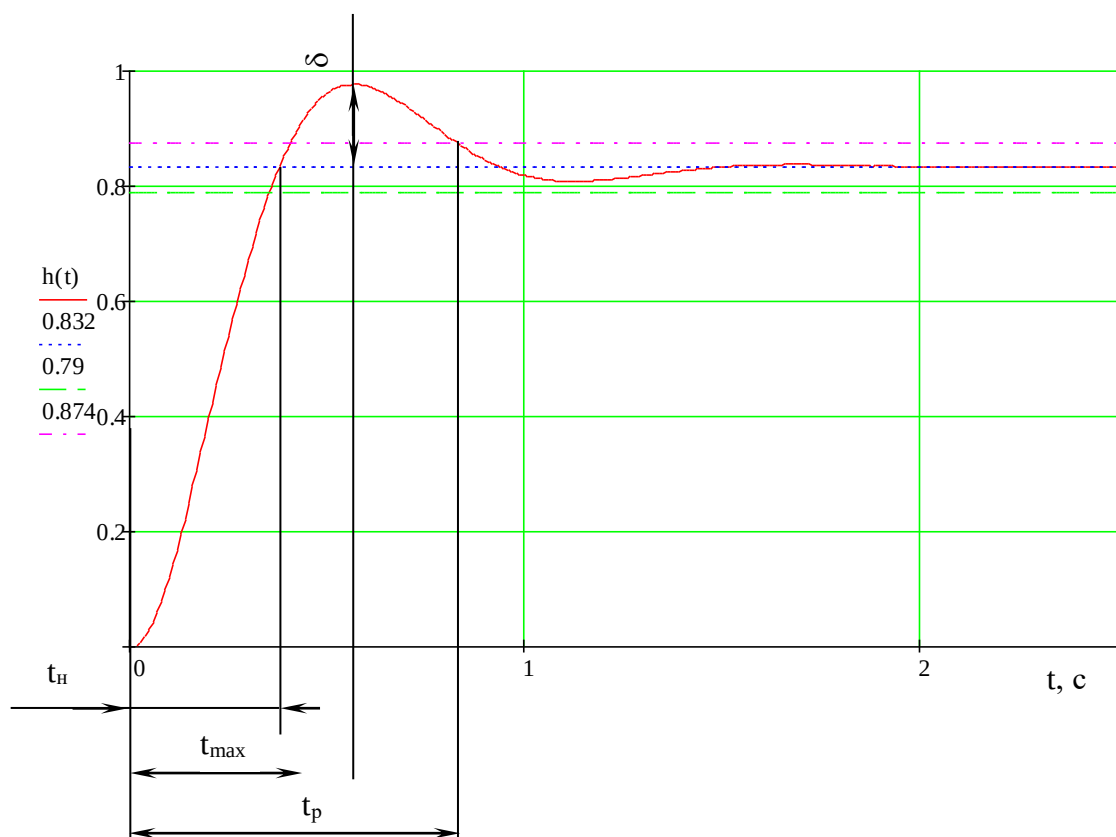


Рисунок 4.19 – Графік перехідного процесу вихідної системи

По графіку можна зробити висновок, що перехідний процес – аперіодичний.

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_p \approx 0,84$ с – це час від початку дії вхідного діяння до входження системи в зону 2Δ , він залежить від швидкодії динамічних ланок та від їх кількості в головному контурі; через те, що до системи ставляться жорсткі вимоги, то даний параметр, як вимога до САР для її синтезу, приймемо за значенням, визначеним з ЛАЧХ, зменшеним на 30 %, отримаємо $t_p = 0,69$ с ;

- перерегулювання $\delta = 17,4$ %;
- кількість коливань перехідного процесу $n = 1$;
- час досягнення першого максимуму $t_{\max 1} = 0,57$ с;
- час наростання перехідного процесу $t_n = 0,38$ с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;
- перехідний процес аперіодичний.

Згідно вимог до системи, час регулювання для проведення її синтезу приймається зменшеним на 30 % від отриманого, тобто $t_p = 0,69$ с.

4.4.9. Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї

Вимоги до синтезуємої САР: час регулювання $t_p = 0,69$ с; максимальне перерегулювання $\delta = 30\%$; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше 30° . Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ виконується в кілька етапів.

Побудова в області низьких частот аналогічна до побудови ЛАЧХ незмінної системи. Тобто проводиться асимптота з нахилом -20 дБ/дек через точку з координатами $20 \lg k = 14$ дБ.

Побудова в області середніх частот – це найбільш відповідальна асимптота. В даному діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перерегулювання та тривалістю перехідного процесу. З міркувань наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією) нахил середньо частотної

асимптоти бажаної ЛАЧХ вибирається -20 дБ/дек. Вибір частоти зрізу ω_z (частота, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) виконують на підставі нерівності $\omega_{z\min} \leq \omega_z \leq \omega_{z\max}$. Для того, щоб задовольнити вимоги до якості системи, необхідно, щоб ω_z була менше частоти зрізу $\omega_{z\max}$, яка визначається за максимальним прискоренням координати і величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того дана частота ω_z повинна бути більше $\omega_{z\min}$, яка вибирається за заданим значенням максимального пере регулювання δ_m та тривалістю регулювання t_p . По заданому значенню δ_m за допомогою кривої $\delta = f(P_{z\max})$ номограми [18] визначаємо відповідне значення $P_{z\max}$. Потім по значенню $P_{z\max}$ за допомогою кривої $t_p = f(P_{z\max})$ визначаємо значення $\frac{3\pi}{t_p}$. Цю величину прирівнюємо до заданого значення $t_p = 0,69$ с і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу $\omega_{z\min} = 13,6$ с⁻¹.

Вибрану частоту зрізу $\omega_z = 14$ с⁻¹ (дещо збільшену), наносимо на графік (рис. 4.20). Потім будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку ω_z на осі абсцис з нахилом -20 дБ/дек.

По відомому значенню $P_{z\max} = 1,2$ дійсної частотної характеристики знаходимо мінімальне значення $P_{z\min}$, використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики $P_{z\min} = 1 - P_{z\max} = -0,2$.

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості знаходять по номограмам $L(\omega) = f(\varphi)$ при P_z дорівнює константі – це колові діаграми, P_z – значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Отже по номограмі знаходимо лінії, які відповідають $P_{z\max} = 1,2$ і $P_{z\min} = -0,2$. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді знайдемо, провівши до цих кривих горизонтальні дотичні і прочитавши відповіді на осі ординат, $L_1 = 15$ дБ, $L_2 = -15$ дБ, тобто середньочастотну асимптоту треба продовжити ліворуч і праворуч до ординат L_1 та L_2 і лише після цього спрягати з сусідніми ділянками [18]. В даному випадку для спрощення спряження середньочастотної асимптоти з низькочастотною, а значить і для спрощення

схеми коректуючого пристрою, підвищимо коефіцієнт підсилення системи, збільшивши значення k_2 до 18. В цьому випадку $20 \lg k = 19$ дБ а система не втратить стійкість.

Запас стійкості по фазі γ знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих $P_{\text{зmax}} = 1,2$ і $P_{\text{зmin}} = -0,2$ і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії -180° . В даному випадку $\gamma = 45^\circ$ [16], [18].

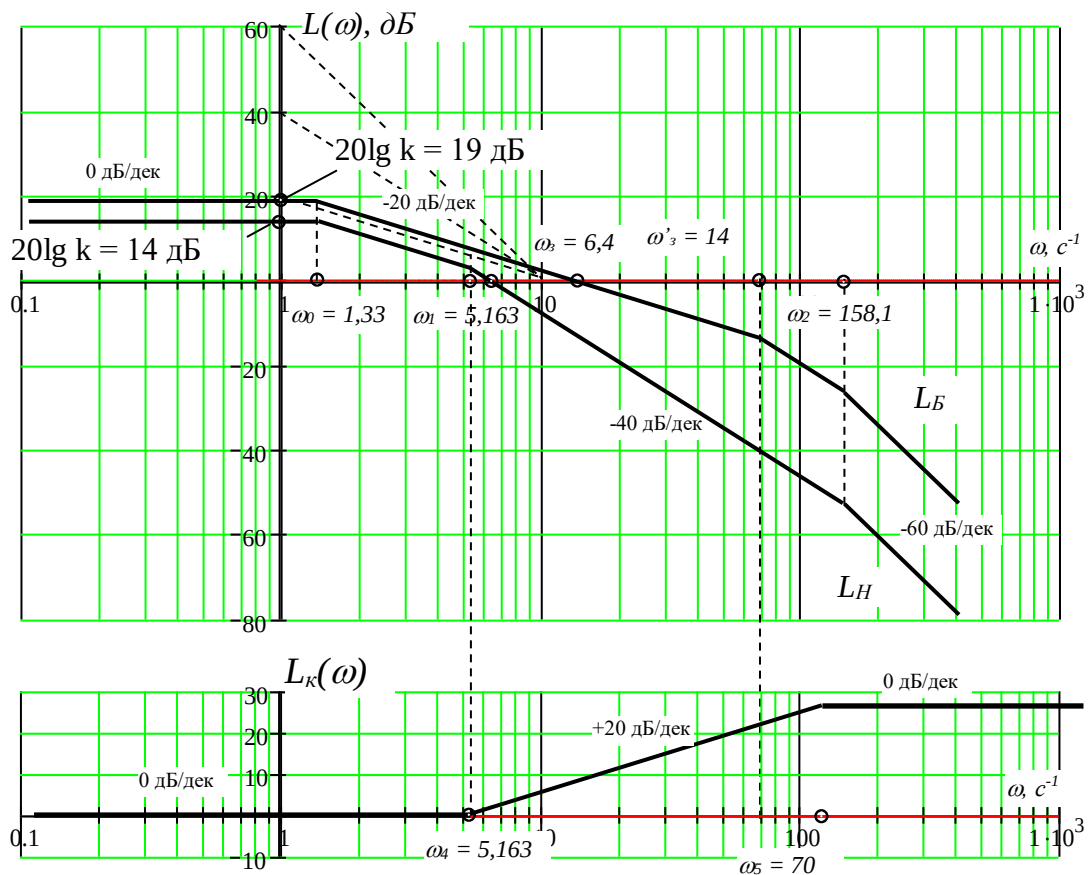


Рисунок 4.20 – Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ корегуючого пристрою

4.4.10. Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначаємо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ $L_k = L_6(\omega) - L_H(\omega)$ (рис. 4.20). За виглядом ЛАЧХ коректуючого пристрою обираємо схему коректуючого пристрою [16]:

Передаюча функція такого чотирьохполюсника у загальному вигляді:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{k(T_4 p + 1)}{(T_5 p + 1)}$$

$$\text{де } T_4 = 1/\omega_4 = 1/5,163 = 0,19 \text{ с;}$$

$$T_5 = 1/\omega_5 = 1/70 = 0,014 \text{ с}$$

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу, матимемо передаючу функцію коректуючого пристрою:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{1 \cdot (0,19p + 1)}{(0,0014p + 1)}$$

Обчислюємо параметри R_1 , R_2 , C схеми коректуючої ланки за допомогою формул:

$$k = \frac{R_2}{R_2 + R_1}; T_4 = R_1 C; T_5 = k \cdot T_4 = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2}$$

Для отримання номіналів елементів коректуючого пристрою задавши $C = 2 \times 10^{-6} = 2 \text{ мкФ}$, отримано такі значення опорів:

$$R_1 = T_4 / C = 0,19 / 2 \times 10^{-6} = 0,095 \times 10^6 = 95 \text{ кОм.}$$

$$\text{Далі, через те, що } k = T_5 / T_4 = 0,0014 / 0,19 = 0,0074 \text{ і } k = \frac{R_2}{R_2 + R_1},$$

$$R_2 = \frac{k R_1}{1 - k} = \frac{0,0074 \cdot 0,095 \times 10^6}{1 - 0,0074} = 7,1 \times 10^3 \approx 7,1 \text{ кОм.}$$

Вибираємо номінали резисторів зі стандартного ряду опорів $R_1 = 100 \text{ кОм}$, $R_2 = 7,5 \text{ кОм}$.

Вибрана коректуюча ланка є активним чотириполіусником. Для забезпечення $k = 1$ необхідно прийняти $R_{зв.3} = R_1 + R_2 = 107,5$ кОм, приймемо зі стандартного ряду опорів $R_{зв.3} = 100$ кОм.

Звичайно, слід відмітити, що такий коректуючий пристрій можливо застосувати у разі реалізації системи регулювання тиску з використанням електронних засобів вимірювання та обробки технологічної інформації.

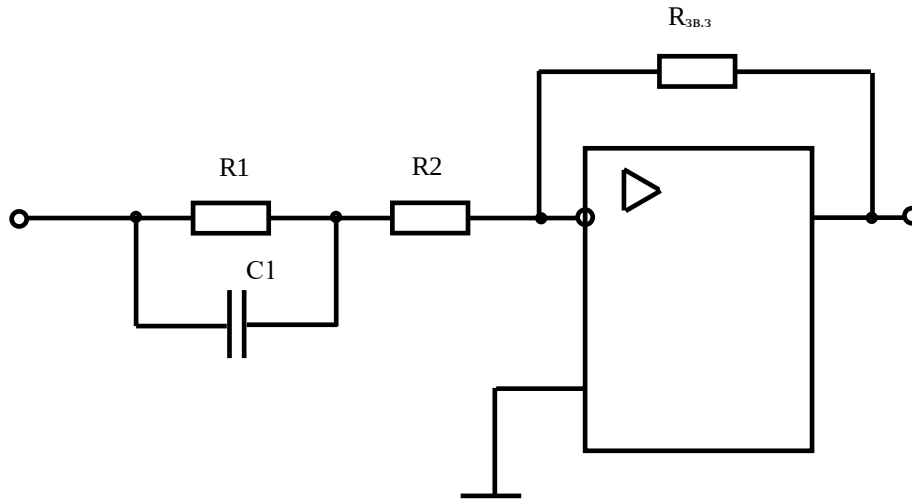


Рисунок 4.21 – Схема коректуючого пристрою

4.4.11. Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k(T_4 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)(T_5 p + 1) + k \cdot (T_4 p + 1)} \quad (12)$$

Провівши заміну $p = j\omega$, виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики. Дану операцію доцільно здійснити засобами математичного редактора Matcad, для чого слід записавши значення коефіцієнтів підсилення, сталих часу динамічних ланок та вираз передаточної функції в робочій області екрана, ввести наступний вираз:

$$P(\omega) := \text{Re}(W(\omega)).$$

Це дасть змогу побудувати дійсну частотну характеристику скоректованої системи (рис. 4.22).

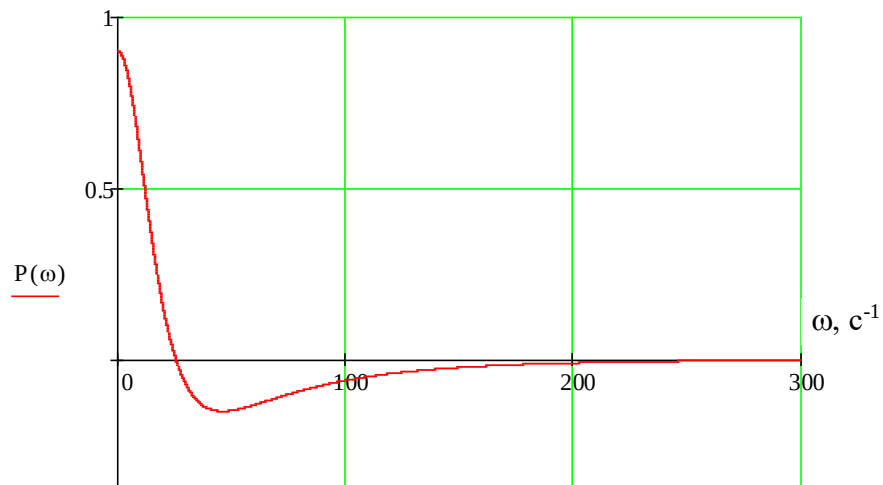


Рисунок 4.22 – Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР (рис. 4.23).

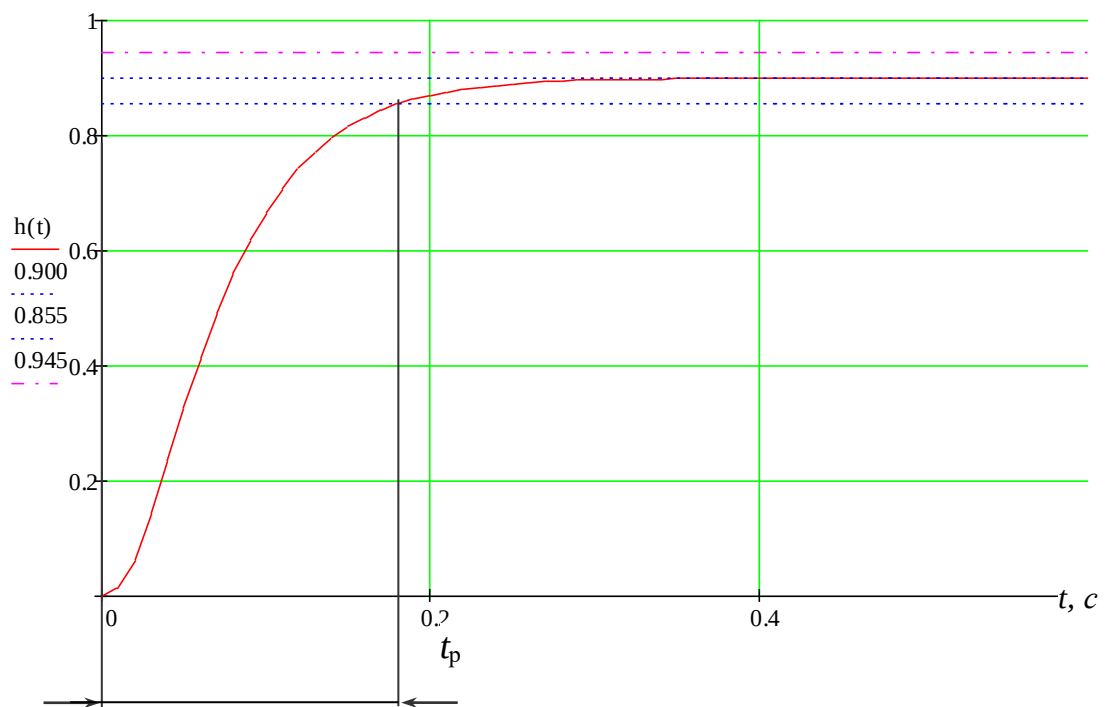


Рисунок 4.23 - Графік перехідного процесу системи, скоректованої шляхом синтезу

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_p = 0,18$ с;
- перерегулювання $\delta = 0$ %;
- час наростання перехідного процесу (на рис. 17 не наведено) $t_n = 0,35$ с;
- перехідний процес монотонний (на відміну від перехідного процесу вихідної системи).

5 ОПИС ОРГАНІЗАЦІЇ РОБІТ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УСТАНОВКИ СИНТЕЗУ ТОНКОПЛІВКОВИХ СТРУКТУР

Номінальне значення кліматичних факторів при експлуатації установки повинні відповідати ГОСТ 15.150 – 76, тобто:

- відносна вологість повітря від 45 до 80%;
- температура навколишнього середовища від 15 до 35⁰С;
- атмосферний тиск від 84,0 до 106,7кПа.

Поблизу установки не повинно бути джерел вібрації чи інтенсивного пиловиділення. Запилення повітря в робочій зоні не має перевищувати 6 мг/м³. Для належної роботи необхідно регулярно проводити профілактику для очищення пристроїв програмного управління та вакуумної системи від пилу, залежно від рівня запиленості — не рідше ніж раз на місяць.

Вологе повітря, пил і бруд знижують опір ізоляції, порушуючи роботу приладів. Агресивні гази викликають окислення контактів, а сильні магнітні поля в місцях розташування датчиків і з'єднувальних ліній ускладнюють їх роботу. У приміщеннях з підвищеною вологістю та пилом важливо забезпечити герметичність і правильно підігнати ущільнення [19].

Особливу увагу слід приділити заземленню приладів, оскільки погане заземлення може спричинити помилки у показах вторинних приладів. Не рекомендується використовувати водопровідні та опалювальні системи як заземлення. Розрахунок захисного заземлення наведений у розділі охорони праці.

Основна лінія живлення силових пристроїв піддається коливанням напруги та перешкодам від струмів високої частоти. Для стабільної роботи приладів рекомендується використовувати КВП-лінії та розподільчі трансформатори з заземленою вторинною обмоткою для усунення наводок. Це важливо для приладів з високоомними входами та тих, що живляться стабілізованими джерелами. Розподільчий трансформатор повинен мати запас потужності, щоб уникнути зниження напруги і спотворення струму. Підключення трансформатора має здійснюватися через рубильник і запобіжники. Не можна використовувати

автотрансформатор, оскільки він не захищає від перешкод і може призвести до подачі повної напруги на прилад при обриві обмотки.

Напруга до установки подається дротом з водонепроникною прорезиненою ізоляцією діаметром не менше 1 мм. Для захисту від пошкоджень дроти прокладаються в металевих шлангах або трубах, які заземлюються. Вводи до шафи герметизуються ущільнюючими втулками. Стикування дротів слід уникати, а при з'єднанні — пропаювати. Після прокладки перевіряється опір ізоляції, який має бути не менше 10 МОм. Для з'єднання датчиків з приладами дроти прокладаються в сталевих трубках окремо від мережевих проводів.

Під час технічних оглядів та профілактичних робіт, що включають зняття кожухів та кришок, під якими знаходяться рухомі елементи, установка повинна бути відключена від мережі за допомогою вимикача вводу. Не дозволяється працювати на обладнанні з знятими кришками клемних коробок електроапаратури.

Установка повинна бути захищена від прямого впливу теплового випромінювання. У приміщеннях, де знаходиться установка, не повинні працювати зварювальні апарати та інші джерела сильних електромагнітних полів.

Зварювальні апарати та механізми з електродвигунами з високими пусковими струмами не повинні підключатися до електричної мережі, що забезпечує живлення установок для синтезу органічних тонкоплівкових структур.

Установка транспортується в упаковці або з частковим захистом вразливих частин вологозахисним матеріалом. Під час транспортування окремо пакуються вакуумна система, піч, ЕОМ та датчики. Зберігання в транспортній тарі можливе в неопалюваному приміщенні, короточасне перебування на відкритому повітрі дозволяється, але постійне зберігання на вулиці заборонене [20].

Гарантійний строк транспортування без упаковки не перевищує 5 днів. Після переконсервування установка повинна зберігатися в сухому приміщенні. Під час розпакування слід уникати пошкодження деталей і перевірити комплектність згідно з пакувальним листом.

Установка повинна бути встановлена на рівний фундамент і закріплена за допомогою чотирьох регульованих гвинтів або сталевих клинів, виготовлених

споживачем згідно з інструкцією. Точність роботи установки залежить від правильності її монтажу, який перевіряється за допомогою рівня в повздовжньому та поперечному напрямках.

Перед підключенням установки до електромережі потрібно перевірити відповідність напруги мережі та електрообладнання. Усі перемикачі, що мають фіксоване положення "0", повинні бути переведені в це положення перед увімкненням живлення.

Перевірку блоків потрібно проводити перед монтажем, під час профілактичного ремонту та при виявленні пошкоджень. Перевіряються: похибка показань, похибка запису, чутливість, робота механізму, сигналізація про обрив, час проходження шкали, рівень перешкод на вході підсилювача та нагрів деталей. Перевірка має проводитись при температурі $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, напрузі живлення в межах $\pm 3\%$ від номінальної, частоті $50 \pm 0,5$ Гц та відсутності сторонніх магнітних полів.

За умов правильної експлуатації автоматичні електронні прилади можуть працювати надійно та безперервно протягом тривалого часу. Під час використання приладів важливо забезпечити стабільність умов, що є нормальними для їх роботи, протягом усього терміну служби. Не можна допускати перевищення допустимих меж коливань напруги живлення мережі.

При температурі понад 35°C необхідно покращити вентиляцію приміщення. За низьких температур потрібно забезпечити належне опалення. У запилених приміщеннях з підвищеною вологістю важливо контролювати стан ущільнювачів, а при використанні хімічних сушників — стежити за їх ефективністю.

Під час експлуатації вторинних вимірювальних приладів потрібно контролювати їх чутливість, спостерігаючи за коливаннями стрілки приладу при наближенні до встановленого значення. Регулярно проводиться огляд та планово-попереджувальний ремонт приладів. Під час огляду блоки знімаються з установки, очищаються від пилу та бруду за допомогою ганчірки та продувкою повітрям. Також перевіряється стан електропроводки та надійність затискачів.

ВИСНОВКИ

Метою цієї магістерської роботи була оптимізація процесів нанесення полімерних плівок. Описано основні принципи та технології нанесення полімерних плівок, а також методи осадження тонких плівок у вакуумних умовах. Зокрема, розглянуто використання камер термічного вакуумного напилення та катодного розпилення для осадження плівок. Аналіз основних методів осадження показав, що найбільш ефективним для надвисокого вакууму є метод катодного розпилення, який використовується в установці електронно-променевого напилення. Цей метод дозволяє досягти високої якості плівок при мінімальних втратах матеріалу та є оптимальним для нанесення тонких полімерних плівок з точними властивостями.

У роботі також розглянуто та детально проаналізовано метод вимірювання товщини плівки за допомогою кварцового датчика. Цей метод є високоточним і дозволяє визначати товщину плівки з точністю до сьомого знака, при цьому забезпечуючи похибку вимірювання на рівні 2%. Кварцові датчики використовуються для контролю товщини плівок у реальному часі, що є важливим для забезпечення стабільності та точності процесу нанесення плівок. Такий підхід дозволяє досягти високої точності при виготовленні тонких плівок, що має велике значення для застосувань у сферах, де потрібна висока якість матеріалів.

У роботі також розглянуто заміну старого контролера товщини плівки на новий, більш продуктивний контролер на базі процесора ATmega103. Цей сучасний контролер має низку важливих переваг, які роблять його оптимальним вибором для застосування в промисловому виробництві. Однією з основних переваг є використання сучасних мікросхем, що забезпечує високу ефективність і надійність роботи. ATmega103 характеризується низькою вартістю при збереженні високої функціональності, що робить його доступним і економічно вигідним рішенням для підприємств, особливо в умовах складної економічної ситуації в галузі важкого машинобудування. Це дозволяє значно знизити витрати на обладнання без втрати якості контролю за товщиною плівки, що є критичним для виробничих процесів, де необхідна висока точність і стабільність. Розроблена принципова електрична схема

мікропроцесорної системи автоматичного регулювання, яка включає в себе низку ключових мікросхем, таких як оперативно запам'ятовуючий пристрій K155PY7, постійно запам'ятовуючий пристрій K541PT1, порт вводу-виводу KP580BB79, дешифратор K155ИД1, буферний регістр KP580ИР82/83 та інші компоненти. Ці елементи забезпечують належну обробку інформації, керування та взаємодію між різними частинами системи. Вихідний сигнал від контролера безпосередньо регулює положення заслінки, забезпечуючи точне управління процесом. Використання сучасних мікросхем дозволяє підвищити надійність і точність системи, а також знизити витрати на обслуговування завдяки високій інтеграції і стабільності роботи кожного компонента. Така схема дозволяє ефективно автоматизувати контроль і регулювання в складних технічних системах.

Було проведено кореляційно-регресивний аналіз статистичних даних для визначення взаємозв'язку між товщиною плівки та положенням заслінки. В результаті аналізу було встановлено функціональну залежність між цими параметрами. Обчислено рівняння регресії, яке дозволяє точно моделювати зміну товщини плівки в залежності від положення заслінки. Також визначено коефіцієнт кореляції, що показує ступінь зв'язку між цими величинами. Істотність отриманого функціонального зв'язку була перевірена за допомогою статистичних критеріїв Стюдента та Фішера, що підтвердило надійність і значущість отриманих результатів. Такий підхід дозволяє не тільки описати, але й передбачити поведінку процесу, що робить його більш точним і керованим в умовах виробництва.

Була розроблена структурна та функціональна схема системи автоматичного регулювання товщини плівки, що забезпечує точність і стабільність процесу нанесення. В процесі розробки було визначено ключові параметри, які впливають на ефективність роботи системи, а також виконано вдосконалення її характеристик шляхом синтезу коректуючого пристрою. Це дозволило значно покращити якісні показники стійкості системи, зокрема її здатність до компенсування відхилень і мінімізації впливу зовнішніх збурень на точність контролю товщини плівки. Оптимізовані параметри системи гарантують більш стабільну роботу приладів, знижуючи ймовірність помилок і забезпечуючи високий рівень точності в процесі виробництва.

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

- CISC (Complex Instruction Set Computing) — концепція проектування процесорів;
- AVR – сімейство восьмибітних мікроконтролерів Atmel;
- CPU(céntral prócessing únit) – центральний процесор;
- EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – електрично стираємий перепрограмуємий постійний запам’ятовуючий пристрій;
- RTC (Real Time Clock) – Контролер реального часу;
- SRAM (Static Random Access Memory) – статична оперативна пам’ять з довільним доступом;
- UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – Універсальний асинхронний приймач-передавач;
- SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс;
- RISC (Reduced Instruction Set Computing) — обчислення із скороченим набором команд;
- CMOS (Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor) – комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник;
- АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;
- ЛАЧХ – логарифмічна амплітудна частотна характеристика;
- АЛП – арифметико-логічний пристрій;
- ВАХ – вольт-амперна характеристика;
- ВУП – вакуумний універсальний пост;
- ЛФЧХ – логарифмічна фазова частотна характеристика;
- САР – Система автоматичного регулювання;
- ТКЧ – температурний коефіцієнт частоти;
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки. Том 2 Навч. посібник у 2 т. - Львів: Видавництво Національного університету Львівська політехніка, 2010. - 884 с.
2. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки. Том 1 Навч. посібник у 2 т. - Львів: Видавництво Національного університету Львівська політехніка, 2010. — Т. 1. - 888 с.
3. Калинушкін Є.П. та інш. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання Навч. посібник / Є.П. Калинушкін, Н.М. Федоркова, Ю.П. Синиціна, О.А. Балакін, М.М. Горуля, П.Т. Савченко, К.Д. Підгорна, В.О. Мілаков, Р.Ю. Чигиринський. - Дніпропетровськ : НМетАУ, 2009. — 175 с.
4. Антонюк В.С., Тимчик Г.С., Бондаренко Ю.Ю. та ін. Покриття у приладобудуванні Монографія. — Київ : НТТУ «КПІ»; Політехніка, 2016. - 360 с.
5. Червоний І.Ф. (ред.) Конструкції агрегатів кольорової металургії Запоріжжя: ЗДІА, 2012. — 230 с.
6. Сігарьов Є.М., Сігарьов М.К., Стороженко С.А. Металургія кольорових металів та сплавів Навчальний посібник. — Кам'янське: ДДТУ, 2016. — 203 с.
7. Прокопів В.В. Фізика і технологія тонких плівок. Том 1 Навчальний посібник. — Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. — 92 с.
8. Прокопів В.В. Фізика і технологія тонких плівок. Том 2 Навчальний посібник. — Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. — 84 с.
9. Заячук Д.М. Нанотехнології і наноструктури Львів: Вид-во “Львівська політехніка”, 2009. — 584 с.
10. Юшко В.Л., Русалін С.М., Биков Л.Ф., Юшко Д.В. Експлуатація та технічне обслуговування технологічних об'єктів нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних підприємств Дніпропетровськ, УДХТУ, 2008. — 290 с.

11. Андреев А.О., Павленко В.М., Сисоев Ю.О. Технологія машинобудування. Основи отримання вакуумно-дугових покриттів Підручник. — Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2018. — 288 с.: іл.
12. Блецкан Д.І., Горват А.А., Кабацій В.М. Електричні вимірювання Підручник для студентів вищих навчальних закладів. — За редакцією професора Д. І. Блецкана. — Ужгород: ВАТ Видавництво Закарпаття, 2008. — 400 с.: іл.
13. Бабіченко А.К. та ін. Основи вимірювань та автоматизації технологічних процесів За заг. ред. А.К.Бабіченко: Підручник - Х.: Вид-во ТОВ "С.А.М. 2009 р. - 616 с.
14. Головка Д.Б. та ін. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин Головка Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. — Навч. посібник. — К.: Либідь, 2004. — 328 с.
15. Гуржій А.М., Поворознюк Н.І. Електричні і радіотехнічні вимірювання Посібник для пед. працівників та учнів проф.-техн. навч. закл. — Київ: Навчальна книга, 2002. — 287 с.
16. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. — К.: Вища шк., 1993. — 319с.
17. Основи наукових досліджень. Методичні вказівки до вивчення кореляційно-регресійного аналізу.Т.Ф. Шмельова, Р.В. Жесан, В.О. Зубенко — Кіровоград: КДТУ, 2003 — 46с.
18. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин. ч.1. - Київ: “Вища школа”, 1993. — 320 с.
19. Босов Є.П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва. — Кіровоград: КНТУ, 2007. — 112с.
20. Жидецький В. Ц., Джигерей В. С., Мельников О. В., Основи охорони праці. — Львів: Афіша, 2000. — 352с.
21. Законодавство України про охорону праці. Збірник нормативних документів у 4-х томах. — К.: Основа, 1995.