Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики

Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою АВП
д.т.н., професор
_____С.І. Осадчий
“___“ _____2021 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за ступенем вищої освіти «Магістр»

на тему:

«Автоматизація регулювання товщини плівки в процесі осадження в умовах вакууму»
«Automation of film thickness adjustment in the process of deposition in vacuum conditions»

Виконав студент VI курсу групи АК-20М
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп’ютерно-інтегровані технології»
_____Т.О. Глущенко
«____»_____2021 р.

Керівник роботи
проф, канд.техн.наук
_____В.М. Каліч
«_____»_____2021 р.

Рецензент _____
_____
«_____»_____2021 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ 3

1 Призначення та область застосування установки електронно-променевого напилювання 6

1.1 Оптоелектроніка органічних молекулярних сполук 6

1.2 Установка електронно-променевого напилювання 11

2 Огляд існуючих методів нанесення органічних плівок 14

2.1 Фотолітографія 14

2.2 Осадження тонких плівок у вакуумі 18

2.2.1 Термічне вакуумне напилювання 18

2.2.2 Розпилення іонним бомбардуванням 23

3 Опис та обґрунтування проектних рішень та їх конструкцій 27

3.1 Опис установки синтезу органічних тонкоплівкових структур 27

3.1.1 Конструювання установки та розробка методів осадження плівок 30

3.2 Вибір датчика товщини 32

3.2.1 Датчик кварцовий QS/QSM 41

3.3 Мікроконтролер ATmega103 43

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу 51

4.1 Кореляційно-регресійний аналіз 51

4.2 Визначення передаточної функції 57

4.2.1 Побудова математичної моделі ланки першого порядку геометричним методом 61

4.2.2 Побудова моделі ланки другого порядку методом площ 62

4.3 Вибір найкращої апроксимуючої моделі 65
4.4 Дослідження системи автоматичного регулювання 66
4.5 Дослідження системи на стійкість 73
4.6 Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання по логарифмічній амплітудній частотній характеристиці розімкнутої системи 77
4.7 Синтез коректуючого пристрою системи 79
4.8 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої системи 83
5 Опис організації робіт, що пов’язані із застосуванням установки синтезу органічних тонкоплівкових структур 84
Висновки 89
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів 91
Список літератури 92
Додатки 94
Додаток А Охорона праці 94
Додаток Б Очікувані техніко-економічні показники 108

ВСТУП

Реалізація сучасних засобів автоматизації полягає в створенні універсальних, надійних і довговічних пристроїв, які тим або іншим чином допомагали б людині вирішувати поставлені перед нею завдання. Для високоточних виробництв дуже важливо мати хорошу точність позиціонування робочого органу. Як і будь-яка інша, мехатронна система складається з електромеханічної системи, яка є сукупністю електрорухового і перетворювального пристроїв, системи управління, механічної передачі і робочого органу, призначена для приведення робочого органу в рух і управління цим рухом по заданому алгоритму засобами мікро ЕОМ або мікроконтролера.

Властивості електромеханічної системи визначаються взаємозв'язаними характеристиками елементів і підсистем (механічною, електричною і магнітною), що утворюють її. Тому при етапному проектуванні електромеханічної системи особлива увага приділяється вибору електромеханічної елементної бази, електродвигунів інформаційних і силових напівпровідникових перетворювачів, статичних і динамічних характеристик, як силових виконавчих елементів, так і системи управління при дослідженні якості регулювання електромеханічної системи з використанням мікроконтролерів.

В будь-якому випадку, автоматизація знижує брак, покращує якість виробів, підвищує продуктивність праці, покращує якість технологічних показників виробництва, а також вивільнення обслуговуючого персоналу і полегшує умови його праці.

Інтенсивний розвиток методу випаровування і конденсації у вакуумі за останні 20 років обумовлений універсальністю технології, високою продуктивністю процесу нанесення покриттів, малою енергоємністю і інших переваг у порівнянні з традиційними методами одержання покриттів різного функціонального призначення. Одне з основних переваг нанесення органічних плівок у вакуумі – екологічно чиста технологія.

Вакуумна техніка в на сьогоднішній день застосовується в багатьох галузях промисловості. Перші області її промислового застосування - відкачка освітлювальних електроламп й електровакуумних приладів - як і раніше мають важливе значення, але з появою транзисторів електронна промисловість знайшла нове застосування вакуумному встаткуванню у виробництві високочистих матеріалів.

Металургія теж знайшла застосування вакуумній техніці: вакуумною плавкою метали очищаються від розчинених газів і летучих домішок; у тих випадках, коли потрібно виключити можливість окислювання й інших забруднень поверхні, у вакуумі проводять термообробку. Без вакуумної техніки було б неможливо виробництво в великих масштабах хімічно чистих і жароміцних металевих матеріалів. Плівки металів й інших речовин, напиляємі у вакуумі, знаходять застосування в самих різних галузях промисловості – від виробництва дитячих іграшок до технології оптичних приладів й електронних компонентів.

У хімічній промисловості молекулярна дистиляція при низьких температурах, що стала можливою завдяки зниженню тиску в перегінному кубі, дозволила одержувати речовини, які розкладаються при атмосферному тиску. У медицині, біології, харчовій промисловості так зване сублімаційне сушіння дозволяє збезводнювати при низьких температурах у вакуумі матеріали, які руйнуються при температурах, необхідних для сушіння іншими способами. Без вакуумної техніки не могла б існувати атомна промисловість, де вона застосовується, зокрема, для поділу ізотопів, обробки матеріалів і відкачки вакуумного встаткування.

Постійно зростаючі потреби народного господарства в покриттях різного призначення і різноманітність номенклатури продукції обумовили появу широкого класу спеціальних вакуумних установок, призначених для рішення конкретних виробничих задач – металізації рулонних і смугових матеріалів, нанесення захисних, зносостійких, декоративних покрить на металеві і неметалічні матеріали, виготовлення різних плівкових елементів виробів електронної техніки, дослідно-конструкторські роботи й дрібносерійне

експериментальне виробництво в напівпровідниковій техніці, мікросистемотехніці й нанотехнології та технології приладів мікроелектроніки.

Розвиток і удосконалювання вакуумного устаткування, зростання складності технологічних процесів нанесення покрить вимагають підготовки фахівців для обслуговування устаткування, ведення процесу нанесення різних покриттів із застосуванням сучасного устаткування, контролю і керування процесом нанесення органічних плівок.

Розробка систем електронно-променевого напилювання для осадження надчистих покриттів не просто нова область розвитку техніки, але й найважливіший напрямок аналітичного приладобудування.

В даній магістерській роботі пропонується вирішення актуальної задачі дослідження можливості вдосконалення системи стабілізації технологічного параметра установки синтезу органічних тонкоплівкових структур. Проте слід відмітити, що для отримання якісного продукту, зменшення кількості відбракованих виробів вирішення такої задачі не можливе без зв’язування особливостей роботи вказаної установки.

Об'єктом дослідження є процес нанесення полімерних плівок.

Предмет дослідження – система стабілізації технологічного параметра установки синтезу органічних тонкоплівкових структур.

В роботі основну увагу слід приділити стабілізації технологічного параметра, для чого необхідно розглянути значимість підтримування даного параметра, підходи до реалізації подібних систем, вибрати найкращий. Необхідно розробити функціональну та структурну схеми системи, визначити її показники якості, побудувавши перехідний процес, а у випадку невідповідності заданим значенням провести синтез коректуючого пристрою.

Також необхідно розглянути питання охорони праці, техніки безпеки при роботі на вказаному обладнанні, також обґрунтувати доцільність впровадження запропонованої системи, провівши техніко-економічні розрахунки.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАПИЛЮВАННЯ

1.1 Оптоелектроніка органічних молекулярних сполук

Тонкоплівкові матеріали для фотоніки та оптоелектроніки: фурилени, органічні барвники, металоорганічні комплекси, поліанілін, поліпараксилілен, фторопласт, поліетилен, нанокомпозити, полімер-барвник, полімер-елементоорганіка, полімер неорганічні сполуки, барвник-неорганічні, сполуки. Технології органічних плівок: фізичне осадження у вакуумі, хімічне осадження з газової фази, молекулярне нашарування з газової фази, адсорбція та полив з розчину.

Методики дослідження: оптична спектроскопія у інфрачервоному, видимому та ультрафіолетовому діапазонах, спектральна еліпсометрія, спектроскопія люмінесценції, математичне моделювання.

Області застосування:

- світловипромінюючі прилади;
- електролюмінісцентні екрани;
- органічна оптоелектроніка;
- оптичний запис інформації;
- сенсори;
- електрооптичні прилади;
- прилади нелінійної оптики;
- елементи оптичних комп’ютерів;
- захисні шари;
- консервуючі шари;
- сорбція іонів важких металів;
- захист навколишнього середовища;
- захист біомедичних приладів;

– перетворення енергії сонячного світла.

Технологія синтезу органічних тонкоплівкових нанокомпозитів та багатошарових структур.

Полі-n-ксиліленові покриття. Вихідні сполуки сублімуються при температурі 150°С і розкладаються на димери при t = 600°С. Полі-n-ксиліленові покриття наносяться з газової фази при низькому тиску (від 10 до 60Па) на попередньо охолоджені до температури нижче 250°С поверхні.

У випадку паперу та тканин покриття формуються на окремих волокнах, що забезпечує зберігання фактури і кольору матеріалів. Піролитична технологія використовується для герметизації радіоелектронних виробів в тому числі – виробів військово-морського та авіаційного призначення, медичної техніки, точної механіки та оптики. Обробка тканин, паперу та інших волокнистих матеріалів для надання їм водостійкості та масло-стійкості шляхом нанесення покриттів вигідно відрізняється невисоким вакуумом. Вихідні сполуки і кінцевий полімер є інертними і біологічно сумісними речовинами.

Особливості та переваги процесу:

– високий рівень суцільності і однорідності покриття у вузьких місцях, суцільність у зазорах, порах, на волокнах та гострих кромках;

– можливість капсулювання дисперсних матеріалів, порошків, тканин, паперу;

– виключення перегріву матеріалу, що покривається;

– відсутність розчинників;

– не потребується додаткового отвердження;

– екологічна чистота і пожежна безпечність, низька матеріалоємність.

Області застосування:

– електроізоляція і капсулювання вузлів в мікроелектроніці і оптоелектроніці;

– захист старовинних паперових документів, тканин, історичних об’єктів;

– захист біомедичних приладів;

– гідрофобізація металів, тканин, паперу;

– захист цінних паперів;

– виготовлення точних реплікантів поверхонь;

– вологозахист;

– капсулювання реакційноздатних речовин;

– виготовлення електретних приладів;

– виготовлення мембран.

Властивості покриття з полі-n-ксилілена наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Властивості покриття з полі-n-ксилілена

Властивості	полі-n-ксилілен	полі-n-хлор-ксилілен	полі-n-дихлор-ксилілен
Механічні:			
границя міцності при розтягуванні, МПа	45-60	70	75
модуль Юнга при 20^0С, МПа	2400	3200	2800
відносне подовження при розриві, %	10-200		
щільність, г/см^3	1,1	1,29	1,41
Термічні:			
Температура довготривалої (10 років) експлуатації, ^{0}С	62	80	100
- в інертному середовищі та склейці, ^{0}С	220		
Максимально припустима температура короткочасного нагрівання в повітрі, ^{0}С	270		
- в інертному середовищі та склейці, ^{0}С	320		
Холодостійкість, ^{0}С	-185		
Газопроникність при 23^0С:			
По азоту, (кисню), моль/Па·с·м	15,4 (78,4)	2,0 (14,4)	9,0 (64,0)
Вологопроникність, 10^{-12} г/Па·с·м	1,2	0,4	0,2
Вологопоглинання, %	Менше за 0,1		
Електричні властивості (23^0С)			
Діелектрична проникність (від 50 до 1000000Гц)	2,65	3,1	2,8
Тангенс кута діелектричних втрат (від 50 до 1000000Гц)	$2\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-3}$
Питомий об'ємний опір, Ом·см	$1{,}4\cdot10^{17}$	$9\cdot10^{16}$	$2\cdot10^{16}$
Питомий поверхневий опір, Ом	$1\cdot10^{13}$	$1\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{16}$
Електрична міцність (товщина 25мкм), МВ/м	240	190	180

Хімічні властивості:

– нерозчинні у всіх розчинниках при температурах від 150 до 200^{0}С;

– стійкі відносно дій луг та кислот (окрім 70% азотної кислоти).

Кожного місяця, згідно закону Мура швидкість та продуктивність роботи сучасних процесорів зростає від 10 до 15% в залежності від конкретного типу процесора та його елементної бази. Отже, поки що теоретично, а у не далекому майбутньому навіть і практично можливе досягнення сучасними процесорами крайньої межі своїх можливостей. Поки що цей процес майже не відчутний, але уникнути його фатальних наслідків не вдасться, якщо вже зараз не змінити концептуальних поглядів на побудову процесорів. Продовжуючи нарощувати потужність сучасних мікропроцесорів за рахунок збільшення швидкості функціонування їх основних складників – транзисторів та за рахунок збільшення їх кількості, сучасний промисловий комплекс зумовлює виникнення вищезгаданої проблеми. Вона очевидна, оскільки електричний струм, точніше електрони, з яких він складається не можуть забезпечити швидкості операцій більшою приблизно $10 \cdot 10^{10}$с. Беручи до уваги швидкість сучасних мікропроцесорів, яка складає $2 \cdot 10^{10}$с, робимо висновок, що критична межа може бути досягнута вже дуже скоро. Людство не зможе вирішити даної проблеми використовуючи сучасні апаратні засоби, тому необхідно знаходити нові неординарні перспективи розвитку сучасних інформаційних технологій. Одним з найкращих рішень є використання світла для переносу бітів інформації. На цьому принципі будуть побудовані перші оптичні процесори. Вони будуть мати ряд суттєвих переваг у порівнянні з електричними процесорами:

– паралелізм – промені світла знаходячись на дуже малих відстанях один від одного, або навіть перетинаючись не викликають перешкод, збоїв та втрат інформації через взаємний вплив;

– швидкість передачі – частота світла дорівнює $2 \cdot 10^{15}$Гц. Ця швидкість набагато більша за швидкість роботи сучасних процесорів, і хоча досягти її

вдасться не одразу, вже перші оптичні процесори зможуть скласти реальну конкуренцію найпотужнішим електронним мікропроцесором;

– стійкість до електромагнітних полів – дані поля в силу своєї природи просто не можуть впливати на світлові промені;

– відсутність проблеми дискретності електричного заряду – хоч аналогічна проблема і існує для фотонів, вона має іншу фізичну природу і не стоїть так гостро як проблема електричної дискретності.

Отже, можна сміливо зробити висновок про нові перспективи які відкриваються в зв'язку з використанням оптичних процесорів, а саме збільшення продуктивності, надійності обробки інформації і поява цілого ряду нових перспектив розвитку інформаційних технологій.

Існує два основні підходи до фізичної реалізації оптичних процесорів. Перший з них пов'язаний з використанням різноманітних голограм та супутніх технологій. Основа другого – безпосереднє використання Булевої алгебри, тобто відповідна обробка "0" та "1". Другий підхід значно ускладнений відсутністю оптичних елементів, які можуть реалізовувати Булеву алгебру. Виробництво цих елементів може бути розпочате лише після досягнення стабільності в процесі управління одного світлового променя іншим, що ще досить складно. Але коли вдасться подолати цю перепону можна буде реалізувати найпростіші логічні елементи і вже за допомогою них побудувати оптичні процесори. Шляхом реалізації цих елементів можуть виступати тонкі органічні плівки нанесені на відповідні матеріали. Як приклад можна розглядати дослід в результаті якого промінь світла що проходить крізь скло з нанесеною на нього тонкою плівкою керує інтенсивністю іншого променя світла, це дозволяє реалізувати примітивний логічний стан в якому наявність керованого світлового променя буде дорівнювати логічній "1", а відсутність – "0". Таким чином органічні плівки є одним з засобів реалізації майбутніх оптичних елементів. Тому розробка систем виробництва тонких плівок є надзвичайно важливим завданням, яке потребує якомога швидшої реалізації.

1.2 Установка електронно-променевого напилювання

Установка електронно-променевого напилювання призначена для напилювання тонких плівок різних матеріалів у надвисокому вакуумі на підкладку діаметром до 150мм або декількох підкладок меншого розміру.

Областю застосування установки електронно-променевого напилювання є фундаментальні й прикладні наукові дослідження, дослідно-конструкторські роботи й дрібносерійне експериментальне виробництво в напівпровідниковій техніці, мікросистемотехніку й нанотехнології й технології приладів мікроелектроніки.

Конструкція установки дозволяє послідовно наносити тонкі плівки п'яти різних матеріалів на зразки діаметром до 150мм (або на кілька зразків, поміщених на 150мм тримач). У базовій комплектації установка укомплектована шлюзом, електронно-променевим випарником із блоком живлення 3кВт.

Можливе використання тиглів – проставок, виконаних із графіту або кераміки. Завантаження напиляємих зразків здійснюються через технологічні фланці камери напилювання. Товщина й швидкість напилювання матеріалів прецизійно контролюються за допомогою водоохолоджуємого двохканального кварцового датчика. Базова модифікація установки дозволяє нагрівати зразки в камері напилювання до температури 200^0С. Можливе ведення обертання тримача зразків у процесі напилювання.

У якості маршового використовується іонно-розпилювальний насос продуктивністю 400л/сек. Модель має невеликий електронно-променевий випарник лінійного типу з п’ятьма тиглями ємністю 2,2$см^3$ кожний. Завантаження зразків здійснюється через вакуумні двері швидкого доступу, що і визначає граничний передопераційний вакуум у камері (не краще 1×10^{-9}мм.рт.ст.). Для забезпечення чистоти завантаження зразків передбачений бокс із інертною атмосферою, що приєднується до дверей швидкого доступу.

Для завантаження або вивантаження зразків існує можливість установки шлюзового пристрою. Слід зазначити дві істотних переваги використання шлюзового пристрою в установках електронно-променевого напилювання. По-перше, постійна підтримка низького тиску усередині камери напилювання збільшує продуктивність установки. Практика свідчить, що використовуваний у камері напилювання рівень тиску нижче 1×10^{-7}мм.рт.ст. після завантаження зразків у шлюзовий пристрій установлюється вже через 20 хвилин. По-друге, електронно-променевий випарник і безпосередньо мішені ізольовані від атмосфери. Це важливо, тому що на початку роботи випарника протягом перших 15 секунд його деталі неконтрольовано розігріваються до температур, достатніх для випару сконденсованої з атмосфери вологи, якщо перед цим вся камера установки розкривалася на атмосферу. Пари води попадають, у тому числі, і на поверхню оброблюваних зразків і впливають на контактний опір металізації.

Для контролю швидкості осадження металів використаються традиційні системи на основі кварцового резонатора. Така методика проста й надійна. Однак площа датчика становить не більше 1см^2, і при розміщенні в потік матеріалу він відображає точкову картину осадження. Структура факела матеріалу, що летить від випарника, складна й неоднорідна, причому твердження, що центр факела в будь-який момент часу збігається із центром зразка (зразків), невірно. Отже, точковий датчик не може повністю відстежити однорідність напилювання по поверхні пластини. Розумне рішення - розмістити декілька датчиків товщини по трикутнику, що описує зразки, (або квадрату). У результаті оператор завжди зможе визначити, у яку сторону для досягнення однорідного напилювання необхідно змістити промінь по поверхні мішені. У сучасних установках електронно-променевого випару досягається рівномірність покриття ±1% на діаметрі 1000мм.

Основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики установки електронно-променевого напилювання

Найменування параметра	Значення
Максимальний діаметр підкладки	150 мм
Максимальна температура нагрівання підкладки	не менш 200 ^{0}C
Температура прогріву камери напилювання	не менш 150 ^{0}C
Максимальний залишковий тиск у камері напилювання після прогріву 200^{o}C протягом 48 годин, з відключеними внутрішніми джерелами тепла й без подачі газів	не гірше 1×10^{-7} Па
Швидкість відкачки робочого насоса камери напилювання	700 л/сек
Кількість розпиляємих матеріалів	5
Неоднорідність напилювання (для діаметра 102 мм)	не більше 5 %
Максимальний обсяг осередку випарника	2,2 см^3
Відстань від випарника до зразка	150–300 мм

Основною метою магістерської роботи є дослідження можливості підвищення ефективності засобів автоматизації технологічного процесу нанесення органічних плівок, який проводиться на установці електронно-променевого напилювання.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ПЛІВОК

2.1 Фотолітографія

Процеси нарощування шарів різних матеріалів потрібні для формування вертикальної фізичної структури ІМС. Необхідні форма й розміри елементів й областей у кожному шарі структури забезпечуються процесом фотолітографії [21].

Фотолітографія – процес вибіркового травлення поверхневого шару з використанням захисної фотомаски. На рисунку 2.1 наведена структурна схема процесу фотолітографії. Окремі етапи на схемі містять у собі кілька операцій. Нижче як приклад наведений опис основних операцій при вибірковому травленні оксиду кремнію (SiO_2).

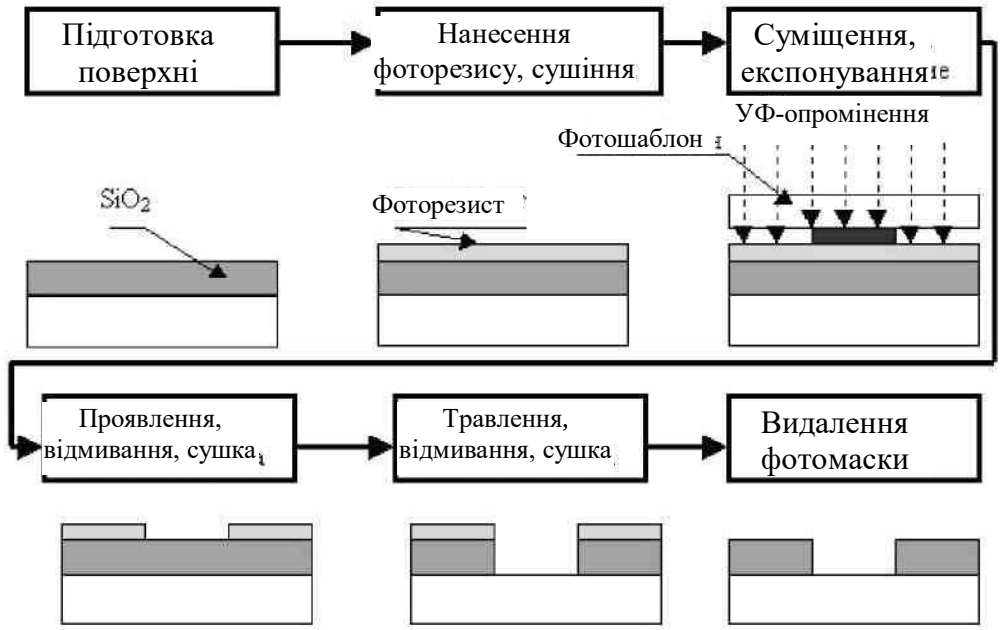


Рисунок 2.1 – Структурна схема процесу фотолітографії

Підготовка поверхні. Сировиною для виготовлення напівпровідникових пластин служить хімічно чистий кремній. Підготовка поверхні до нанесення фотошару полягає в її обробці парами органічного розчинника для розчинення жирових плівок, які перешкоджають наступному зчепленню фоторезисту з

поверхнею. Відмивання надчистою (деіонізованою) водою видаляють сліди розчинника; а також мікрочастинки, здатні згодом утворити "проколи" у тонкому (≈1 мкм) шарі фоторезисту.

Нанесення фотошару. При нанесенні фотошару використовується розчин світлочутливого полімеру в органічному розчиннику (фоторезист). Для одержання тонких шарів фоторезисту на поверхні пластини його в'язкість повинна бути дуже мала, що досягається високим змістом розчинника (80–95% по масі). У свою чергу, зі зменшенням товщини фотошару підвищується розв'язна здатність фотолітографічного процесу. Однак, при толщинах менш 0,5 мкм щільність дефектів ("проколів") у фотошарі різко зростає, і захисні властивості фотомаски знижуються [4].

Нанесення фотошару може бути виконано одним із двох способів: центрифугуванням або розпиленням аерозолю. У випадку використання центрифуги дозована кількість фоторезисту подається в центр пластини, притиснутої вакуумом до обертової платформи (центрифузі). Рідкий фоторезист розтікається від центра до периферії, а відцентрові сили рівномірно розподіляють його по поверхні пластини, скидаючи надлишки в спеціальний кожух. Товщина h нанесеної плівки залежить від швидкості обертання платформи ω, від в'язкості фоторезисту v і визначається співвідношенням (2.1):

$$h = k\sqrt{\frac{v}{\omega}}, \qquad (2.1)$$

де k – коефіцієнт, встановлюваний експериментально.

Швидкість обертання центрифуги близько 6000об/хв, товщина фотошару регулюються підбором відповідної в'язкості, тобто змістом розчинника. Для центрифугування характерні наступні недоліки:

- труднощі одержання рівномірних плівок через погану розтікаємість грузлого фоторезисту;

- напружений стан нанесеної плівки, що приводить на етапі прояву до релаксації ділянок фотомаски й зміні їхніх розмірів;

- наявність крайового стовщення як наслідок підвищення в'язкості в

процесі вирівнювання, що погіршує контакт фотошаблона з фотошаром;

- труднощі організації одночасної обробки декількох пластин.

При розпиленні аерозолі фоторезист подається з форсунки на пластини, що лежать на столі, що робить зворотно-поступальний рух. Необхідна товщина формується поступово. Окремі дрібні частки розтікаються й, зливаючись, утворять суцільний шар. При наступному проході частки приходять на частково просохлий шар, трохи розчиняючи його. Тому час обробки, що залежить від в'язкості, витрати й "факела" фоторезисту, від швидкості руху стола й відстані від форсунки до підкладки, установлюється експериментально. При реверсуванні стола крайні пластини одержать більшу дозу фоторезисту, чим центральні. Щоб уникнути стовщення шару на крайніх пластинах форсунці також повідомляється зворотно-поступальний вертикальний рух (синхронно з рухом стола). При гальмуванні стола наприкінці ходу форсунка піднімається нагору й щільність потоку часток у площині пластин знижується.

Розпилення аерозолі позбавлений недоліків центрифугування, допускає групову обробку пластин, але пред'являє більш тверді вимоги до чистоти (відсутність пилу) навколишньої атмосфери. Нанесення фоторезисту й наступне сушіння фотошару є досить відповідальними операціями, у значній мірі визначальний відсоток виходу придатних мікросхем. Пилоподібні частки з навколишнього повітря можуть проникати в шар що наноситься і створювати мікродефекти. Нанесення фотошару повинне виконуватися в умовах високої обезпиленості в робочих обсягах (боксах, скафандрах) першого класу з дотриманням наступної норми: в одному літрі повітря повинне втримуватися не більше чотирьох часток розміром не більше 0,5мкм.

При сушінні нанесеного шару в шарі можуть зберегтися пухирці розчинника, а при виході на поверхню шаруючи вони можуть утворити мікротріщини. Тому сушіння виконується за допомогою джерел інфрачервоного випромінювання, для якого фоторезист є прозорим, а, отже, поглинання випромінювання з виділенням тепла відбувається на границі "пластина–фоторезист". Отже, сушіння протікає від нижніх шарів фоторезисту до верхніх, забезпечуючи вільний випар розчинника. Щоб

уникнути передчасної полімеризації (задублення) фоторезисту й втрати їм чутливості температура сушіння повинна бути помірною (від 100 до 120^0C). Перераховані види дефектів фотошару (пилоподібні частки, мікропухирці й мікротріщини) зберігаються у фотомасці й успадковуються оксидною маскою, створюючи в ній мікроотвору. При використанні оксидної маски для вибірного легування домішка буде проникати через них, утворюючи леговані мікрообласті й, як наслідок, струми витоку й пробої в p-n-переходах. Якщо оксидна маска являє собою шар контактних вікон, то метал, проникаючи в мікроотвори, може привести до паразитних зв'язків між областями й короткими замиканнями.

Сполучення й експонування. Під сполученням перед експонуванням розуміється точна орієнтація фотошаблона щодо пластини, при якій елементи чергового топологічного шару (на фотошаблоні) займають положення щодо елементів попереднього шару (у пластині), запропоноване розроблювачем топології. Процес сполучення включає три етапи:

1 Попередня орієнтація по базовому зрізі, що забезпечує на границях модулів групової пластини найвигіднішу кристалографічну площину з погляду якості поділу пластини на окремі кристали;

2 Попереднє грубе сполучення по границях крайніх модулів, що має метою виключити розворот пластини й фотошаблона щодо вертикальної осі Z;

3 Точне сполучення, що виключає зсув малюнків фотошаблона й пластини по осях X й Y.

Проявка схованого зображення для негативних фоторезистів полягає в обробці фотошару органічним розчинником. При цьому ділянки, що не опромінювались, розчиняються, а опромінені ділянки, де при поглинанні ультрафіолетового випромінювання відбувається розрив міжатомних зв'язків і перебудова структури (фотополімеризація), зберігаються. У позитивних фоторезистах на ділянках, що опромінюються, відбувається руйнування структури (деструкція) з утворенням кислоти. Для перекладу її в розчинні шари застосовують розчин неорганічного з'єднання з лужними властивостями (KOH, NaOH й інші).

Після відмивання від слідів проявника й сушіння отриману фотомаску піддають тепловому задублюванню (від 120 до 180^0С в залежності від марки фоторезисту), у результаті чого остаточно формуються її захисні властивості.

При травленні в рідких травителях використаються водяні розчини неорганічних з'єднань (звичайно кислот). Хімічний склад і концентрація травителя в розчині підбирається так, щоб поверхневий шар розчинявся активно, а нижній не розчинявся. Із травленням у рідких травителях зв'язане не тільки явище підтравлювання під фотомаску, але й розкид величини підтравлювання в сукупності елементів одного шару. До моменту закінчення розчинення шару в "вікні" фотомаски бокове травлення виявляється приблизно рівним товщині шару, однак момент закінчення травлення залежить від розмірів елемента, що витравлює.

2.2 Осадження тонких плівок у вакуумі

Провідники на поверхні кристала напівпровідникової ІМС, а також пасивні елементи гібридно-плівкових мікросхем створюються на основі тонких плівок товщиною від 0,1 до 2мкм. Висока точність по товщині й хімічній чистоті для тонких плівок можуть бути досягнуті тільки при вирощуванні шару з атомарного (молекулярного) потоку. Такі умови можна створити у вакуумі або при нагріванні, випарі й конденсації матеріалу, або при бомбардуванні твердого зразка матеріалу (мішені) іонами інертного газу, розпилення його в атомарний (молекулярний) потік і конденсації на поверхні виробу [21].

Процеси першого роду одержали назву "термічне вакуумне напилювання" (ТВН), другого роду – "розпилення іонним бомбардуванням" (РІБ).

2.2.1 Термічне вакуумне напилювання

Схема комбінована загальна робочої камери установки термічного вакуумного напилювання наведена на рис. 2.2 (МР-151.21.0102.01.01.С6).

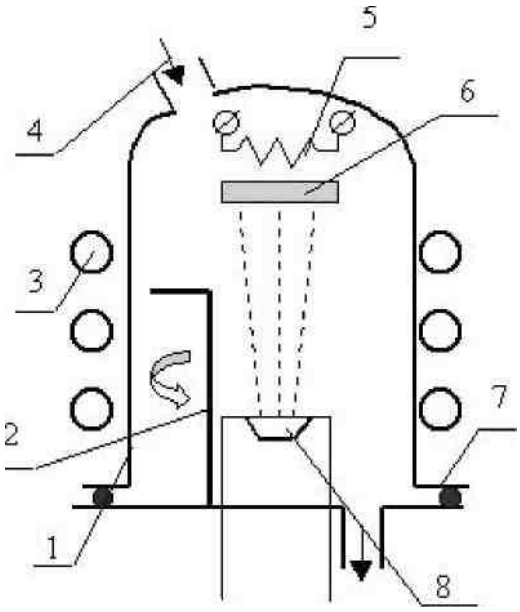


Рисунок 2.2 – Структурна схема робочої камери установки термічного вакуумного напилювання:

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).

Процес проведення операції вакуумного напилювання містить у собі виконання наступних дій. У верхньому положенні ковпака з підложкодержателя знімають оброблені підкладки й установлюють нові. Ковпак опускають і включають систему вакуумних насосів (спочатку для попереднього розрідження, потім високовакуумний). Для прискорення десорбції повітря із внутрішніх поверхонь і скорочення часу відкачки в трубопровід подають гарячу проточну воду. По досягненні тиску усередині камери порядку 10^{-4} Па (контроль по манометру) включають нагрівачі випарника й підкладок. По досягненні робочих температур (контроль за допомогою термопар) заслінку відводять убік і пари речовини досягають підкладки, де відбувається їхня конденсація й ріст плівки. Система автоматичного контролю за ростом плівки фіксує або товщину плівки (для діелектрика плівкових конденсаторів), або поверхневий опір (для

резисторів), або час напилювання (провідники й контакти, захисні покриття). Вироблюваний при цьому сигнал про закінчення напилювання після посилення впливає на соленоїд заслінки, перекриваючи нею потік пари. Далі відключають нагрівачі випарника й підкладок, виключають систему відкачки, а в трубопровід подають холодну проточну воду. Після остигання шару пристроїв через натікач плавно впускають атмосферне повітря. Вирівнювання тисків усередині й поза ковпаком дає можливість підняти його й почати наступний цикл обробки. Процес термічного вакуумного напилювання характеризується температурою на випарнику, тиском повітря в робочій камері, температурою нагрівання підкладок. Температура нагрівання речовини у випарнику повинна забезпечувати досить високу інтенсивність випару, щоб час напилювання плівки не перевищувало двох хвилин. У той же час надмірно висока інтенсивність приводить до утворення дрібнозернистої нестійкої структури в плівці. Інтенсивність випару зручно характеризувати пружністю пари (тиском пари в стані насичення) P_S. Пружність пари для даної речовини залежить тільки від температури, формула (2.2):

$$\lg P_S = A\frac{B}{T}, \qquad (2.2)$$

де А и В – коефіцієнти, що характеризують рід матеріалу;

Т – абсолютна температура речовини.

Оптимальною інтенсивністю випару прийнято вважати інтенсивність, при якій пружність пари становить 1,3Па [20]. Відповідної цієї пружності температура випару називається умовною й може бути обчислена з формули (2.2). Так, для алюмінію вона дорівнює 1150°С, для хрому – 1205°С, для міді – 1273°С, для золота – 1465°С. Низький тиск повітря P_0 у робочій камері необхідно для:

1 Забезпечення вільної дифузії атомів речовини випарника в обсяг робочої камери;

2 Прямолінійного руху атомів речовини без зіткнення з молекулами залишкового повітря й марного розсіювання матеріалу в обсязі камери;

3 Виключення хімічної взаємодії напиляємі речовини з молекулами повітря.

Перераховані умови забезпечуються при залишковому тиску P_0 такий вакуум порівняно легко досягається за допомогою форвакуумного механічного й високовакуумного дифузійного насосів, включених послідовно. Температура підкладки в процесі осадження впливає на структуру плівки, отже, і на стабільність її електрофізичних властивостей у процесі експлуатації. Атоми речовини надходять на підкладку з енергією к·Т (к =8,63×10^{-5}еВ/К – постійна Больцмана; Т – абсолютна температура) і швидкостями порядку 1000м/с. Частина енергії при цьому передається поверхневим атомам підкладки, а залишкова енергія дозволяє їм якийсь час мігрувати в поверхневому потенційному полі. Частка залишкової енергії тим вище, чим вище температура підкладки.

У процесі міграції атом може або покинути підкладку (на потенційному бугрі поля), або частково погасити енергію, вступивши у взаємодію з іншим мігруючим атомом. Повністю втратити здатність мігрувати й закріпитися на нагрітій підкладці (конденсуватися) може лише багатоатомна група, що стає одним із центрів кристалізації. При невисокій щільності потоку атомів, тобто помірній температурі на випарнику, число центрів кристалізації на одиницю площі невелике й до моменту утворення суцільної плівки навколо них встигають вирости великі кристали.

Зниження температури підкладки й підвищення щільності потоку приводить до більш раннього утворення центрів кристалізації, збільшенню їхнього числа на одиницю площі й формуванню дрібнокристалічної структури. У процесі експлуатації електронних апаратур, коли вона піддається періодичним циклам нагрівання й повільного охолодження дрібнокристалічна структура поступово рекристалізується в крупнокристалічну. Електрофізичні властивості при цьому незворотньо змінюються, відбувається "старіння" плівки. У резистивних плівках, наприклад, спостерігається згодом зменшення питомого опору. Отже, для формування тонких плівок, стабільних у процесі експлуатації, необхідно підкладку нагрівати й не форсувати процес напилювання за рахунок підвищення температури

на випарнику. У виробництві тонкоплівкових структур, як й у випадку напівпровідникових, використаються групові підкладки. Групові підкладки мають прямокутну форму з розмірами 60×48мм або 120×96мм, виготовлені з ізолюючого матеріалу (сіталл, полікор, скло) і розраховане на одночасне виготовлення до декількох десятків ідентичних модулів. Таким чином, властивості напиляної плівки повинні бути однакові на всій площі групової підкладки [4].

У першому наближенні потік атомів від випарника до підкладки являє собою розбіжний пучок і тому щільність потоку в площині підкладки не рівномірна: у центрі підкладки вона максимальна й убуває від центра до периферії. Це означає, що при напилюванні плівки на нерухому підкладку в центральній області підкладки утвориться більш товста плівка, ніж на краях підкладки. Наприклад, резистори, сформовані в центральних модулях, будуть мати занижені опори в порівнянні з аналогічними резисторами периферійних модулів. Виробничі установки термовакуумного напилювання обладнані обертовими пристроями (дисками, барабанами), що несуть кілька підкладок (6, 8 або 12). Підкладки послідовно й багаторазово проходять над нерухомим випарником (рисунок 2.3), поступово набираючи необхідну товщину плівки.

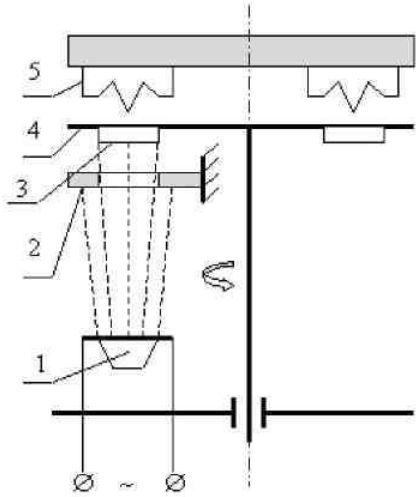


Рисунок 2.3 – Схема установки термовакуумного напилювання карусельного типу

1 – випарник; 2 – коригувальна діафрагма; 3 – підложкодержателі з підкладкою;

4 – диск каруселі; 5 – нагрівач підкладки.

У результаті центральний "пагорб", що міг би утворитися, на нерухомій підкладці, розмивається в "хребет", витягнутий у напрямку руху підкладки. Для вирівнювання товщини плівки в поперечному напрямку застосовують коригувальну діафрагму, установлювану між випарником і підкладкою в безпосередній близькості від її. Профіль діафрагми розраховується на підставі дослідження рельєфів плівки, одержуваних при напилюванні на нерухому й рухому підкладки. У результаті розходження часу опромінення центральної й периферійної зон підкладки рівномірність товщини плівки на всій площі групової підкладки підвищується й перебуває в межах ±2% (для підкладок 60×48мм).

2.2.2 Розпилення іонним бомбардуванням

Термічне вакуумне напилювання має ряд недоліків й обмежень, головні з яких наступні:

1 Напилювання плівок з тугоплавких матеріалів (W, Mo, Si_2 , Al_2 O_3 й ін.) вимагає високих температур на випарнику, при яких неминуче "забруднення" потоку матеріалом випарника;

2 При напилюванні сплавів розходження у швидкості випару окремих компонентів приводить до зміни складу плівки в порівнянні з вихідним складом матеріалу, поміщеного у випарник;

3 Інерційність процесу, що вимагає введення в робочу камеру заслінки з електромагнітним приводом;

4 Нерівномірність товщини плівки, що змушує застосовувати пристрої переміщення підкладок і коригувальні діафрагми.

Перші три недоліки обумовлені необхідністю високотемпературного нагрівання речовини, а останній – високим вакуумом у робочій камері.

Процес розпилення іонним бомбардуванням є "холодним" процесом, тому що атомарний потік речовини на підкладку створюється шляхом бомбардування поверхні твердого зразка (мішені) іонами інертного газу й порушення поверхні атомів до енергії, що перевищує енергію зв'язку із сусідніми атомами.

Необхідний для цього потік іонів створюється в електричному газовому розряді, для чого тиск газу в робочій камері повинний бути в межах 1Па, тобто на кілька порядків більший, ніж у камері установки термовакуумного напилювання.

Остання обставина приводить до розсіювання потоку атомів з мішені й підвищенню рівномірності товщини осаджує плівки, що, до ±1%, причому без застосування додаткових пристроїв.

Катодне розпилення – один з різновидів розпилення іонним бомбардуванням. Будучи відносно простим й у той же час утримуючі всі основні риси цієї групи процесів, воно являє собою найбільш зручну форму для вивчення процесів цього виду розпилення взагалі. На рис. 2.4 представлена схема робочої камери установки катодного розпилення (МР-151.21.0102.01.02.С6).

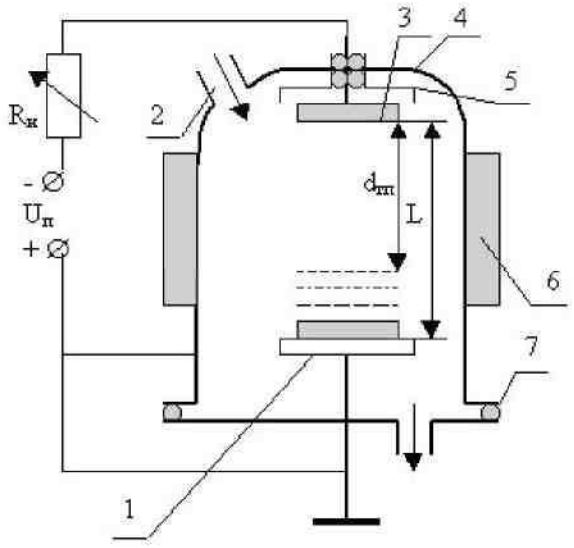


Рисунок 2.4 – Схема робочої камери установки катодного розпилення

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.

З рис. 2.4 також видно, що живлення здійснюється постійною напругою, і що нижній електрод з підкладками заземлений і перебуває під більш високим потенціалом, ніж катод-мішень. Змінне навантаження служить для регулювання струму розряду.

Розряд розділений на дві зони: темний катодний простір і світна область. На темний катодний простір доводиться основне спадання напруги. Тут заряджені частки розганяють до енергії, достатньої, щоб іони, бомбардуючи катод-мішень, звільняли поверхневі атоми й електрони (якщо мішень із провідного матеріалу), а електрони – на границі темного катодного простору іонізували молекули аргону. При іонізації утвориться іон аргону, що, прискорюючись, прагне до мішені, і електрон, що, як й "відпрацьований" іонізуючий електрон, дрейфує до анода. Звільнений з поверхні мішені атом речовини, переборюючи зіткнення з молекулами й іонами аргону, досягає поверхні підкладки. При цьому безперервний потік іонів бомбардує мішень, і безперервний потік атомів речовини рухається до підкладки.

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

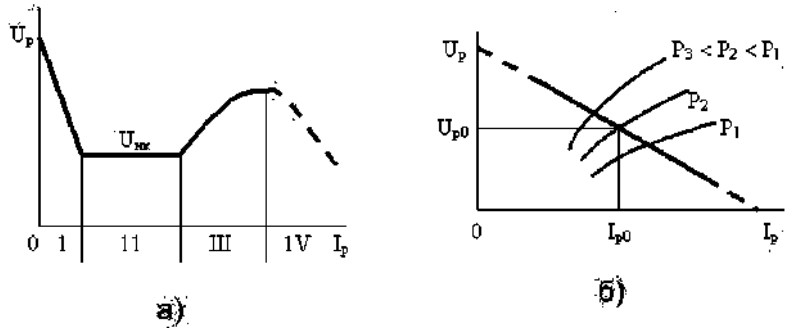


Рисунок 2.5 – Вольт-амперні характеристики самостійного тліючого заряду:

а) – області ВАХ при різних режимах;
б) – робоча область (область III) при різних тисках аргону.

При подачі постійної напруги в декілька кіловольт відбувається пробій міжелектродного проміжку, швидке наростання струму й спадання напруги в розряді (область запалювання розряду I). При збільшенні струму розряду за рахунок зменшення опору $R_н$ площа катодів-мішені, покрита розрядом, зростає, щільність розрядного струму й напруга на розряді залишаються постійними й невисокими, а швидкість розпилення мала (область нормально тліючого розряду II). В області III вся площа мішені покрита розрядом, і збільшення розрядного струму приводить до підвищення щільності розрядного струму,

напруги на розряді й швидкості розпилення. Область Ш, названа областю аномально тліючого розряду, використається як робоча область у процесах катодного розпилення.

Для запобігання переходу в область дугового розряду (область IV) передбачені інтенсивне водяне охолодження мішені й обмеження джерела живлення по потужності. На рисунку 2.5 (б) виділена робоча область III ВАХ. Крутість характеристики в цій області залежить від тиску робочого газу, у нашому випадку аргону. Робоча точка, що характеризує режими обробки – тиск газу P, струм I_p і напруга U_p розряду, лежить на навантажувальній характеристиці джерела живлення.

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ТА ЇХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1 Опис установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Установка являє собою високовакуумну систему ВУП–5 з паромасляною відкачкою [14]. Всі фланцеві з'єднання установки виконано з нержавіючої сталі. Відкачка камери напилювання забезпечується на попередньому етапі форвакуумним і дифузійним промасляним насосом НВДМ-160, призначений для отримання вакууму порядку 10^{-7}Па.

Завантаження зразка здійснюється через шлюз. У шлюзову камеру може бути вбудована система іонного очищення зразків перед напилюванням. Система іонного очищення дозволяє провести травлення поверхні зразків перед напилюванням у плазмі аргону для видалення окисів, залишків органічних сполук і поліпшення адгезії плівок. Можливе використання інших, у тому числі й у агресивних газах з доробкою вакуумного конструктиву.

Шлюзова камера постачена лінійним магнітним маніпулятором, вікном швидкого завантаження й широкодіапазонним вакуумметром. Вакуумна відкачка камери виконана на базі промасляного насоса зі швидкістю відкачки 700л/с. У камері передбачене приєднання до магістралі чистого газу для розкриття.

Спеціальна конструкція фланця швидкого завантаження шлюзової камери дозволяє встановити герметичний бокс, що продуває інертною атмосферою, для виключення експозиції зразків, що завантажують в установку, на повітря.

Камера напилювання постачена стаціонарною системою прогріву до 150ºС.

Шлюз і камера напилювання мають незалежні системи відкачки, з'єднані між собою шиберним клапаном.

Камера напилювання постачена оглядовим вікном для контролю завантаження підкладки й візуального контролю процесу плавлення мішені за допомогою дзеркала, розташованого усередині камери.

Система автоматизації технологічного процесу здійснює автоматичне керування процесом напилювання за допомогою оригінального програмного забезпечення.

Конструкція установки забезпечує однорідність напиляємих плівок не гірше 5% для діаметра зразка 150 мм.

Відкрита архітектура установки дозволяє за бажанням компонувати її внутрішніми вузлами й агрегатами й додатковим аналітичним устаткуванням на етапі формування замовлення, а так само доповнювати установку у процесі експлуатації.

Функціональна схема установки синтезу органічних тонкоплівкових структур наведена на рис. 3.1 (МР-151.21.0102.02.00.Е2).

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

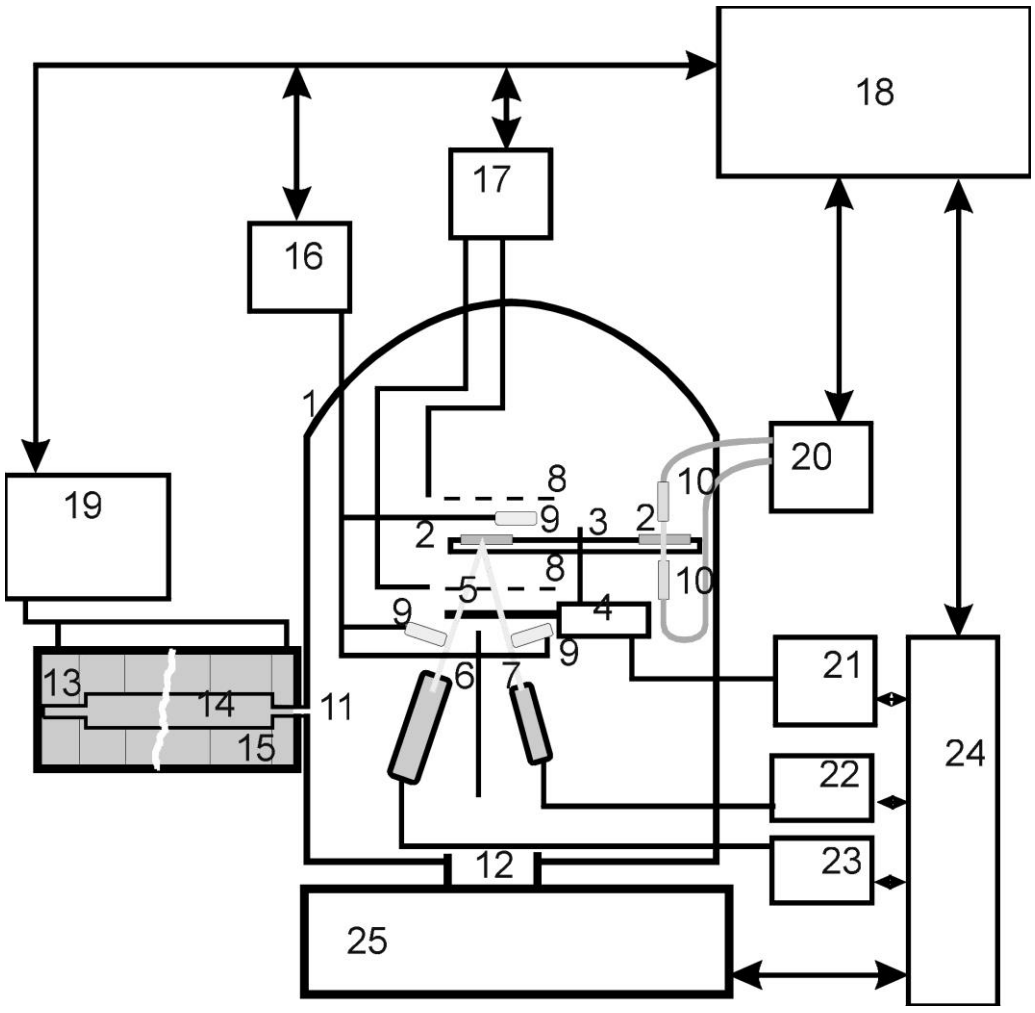


Рисунок 3.1 – Функціональна схема установки синтезу органічних тонкоплівкових структур

Повітря відкачується з вакуумної камери за допомогою вакуумної установки "25", яка складається з форвакуумного насоса і насоса високого вакууму. До вакуумної установки під'єднується спектрометр за допомогою світловодів "10". У вакуумній камері знаходиться випаровувач барвника "7", який являє собою металічну пластинку. В цей випаровувач ми закладаємо барвник у кристалічному стані, який внаслідок великої напруги, що до нього прикладається, розплавляється і починає випаровуватись. Орієнтуючі електроди "8" забезпечують точний і потрібний нам напрям випаровування. Барвник потрапляє на скляну пластину-підкладку (в нашому випадку, а загалом на підкладку з матеріалу, який нам необхідно використати). Дана підкладка (диск) приводиться в рух за допомогою двигунів системи транспортування "4". Контролер системи транспортування "21", контролер випаровувача барвника і контролер "16" кварцових датчиків "9" забезпечують рівномірне нанесення барвника і потрібну нам товщину шару. Заслонки "5" слугують для контролю своєчасного початку і закінчення напилення барвника і полімеру-підкладки (в нашому експерименті не використовується).

Багатозонна піч "15" використовується для розігріву полімеру, який розпилюється в якості підкладки. Відповідно до неї під'єднано терморегулятор "19". В ній знаходиться субліматор діпараксилілена "13" і активатор параксилілена "14". Вивід активованого діпараксилену відбувається за допомогою з'єднання "11". Контролер випаровувача-активатора "23", як і всі інші контролери приєднані до аналогово-цифрового пристрою і цифро-аналового перетворювача "24". Високовольтне джерелом струму для установки є основним для забезпечення її роботи [14].

Керуючий комп'ютер "18" слугує для зняття результатів експерименту (спектра даного барвника), а також інших необхідних параметрів для даного досліду.

Електронна стійка керування складається з таких основних елементів:

- блок розподілу електроживлення;

- кнопка аварійного відключення установки;

- персональний комп'ютер із рідкокристалічним дисплеєм, клавіатурою й маніпулятором "миша";

- блок живлення робочого насоса;

- блок керування нагрівачами;

- блоки керування електронно-променевим випарником.

Блоки керування електронно-променевим випарником включають:

- силовий блок живлення;

- виносний блок керування розжаренням катода;

- блок керування фокусуванням променя;

- блок пересування позицій променя.

3.1.1 Конструювання установки та розробка методів осадження плівок

Всі експерименти проводились на вакуумному універсальному приладі (ВУП-5). Але за даними попередніх досліджень, зокрема спектрів оптичного поглинання у розчині толуолу та у плівці, було показано, що не всі органічні барвники у плівці зберігають свої властивості, вони руйнуються у процесі напилення. Для того, щоб можна було зрозуміти та побачити “на власні очі”, як відбувається процес випаровування речовини була розроблена програма, могла відстежувати за тиском у камері, швидкістю росту плівки, температурою та струмом випаровувача. Зокрема було помічено, що при напиленні деяких органічних барвників відбувається газовиділення. Це дало змогу припустити, що при певній температурі випаровувача відбувається деградація (руйнування) органічної речовини [11].

Установка, що використовувалась в даній роботі зображена на рис. 3.2.

Випаровувач був розміщений під ковпаком універсального вакуумного посту ВУП-5. Вакуумна система (рис. 3.2) складається з механічного форвакуумного та дифузійного насосів, електромагнітних соленоїдальних клапанів для перемикання каналів системи, три датчика для контролю та моніторингу вакууму.

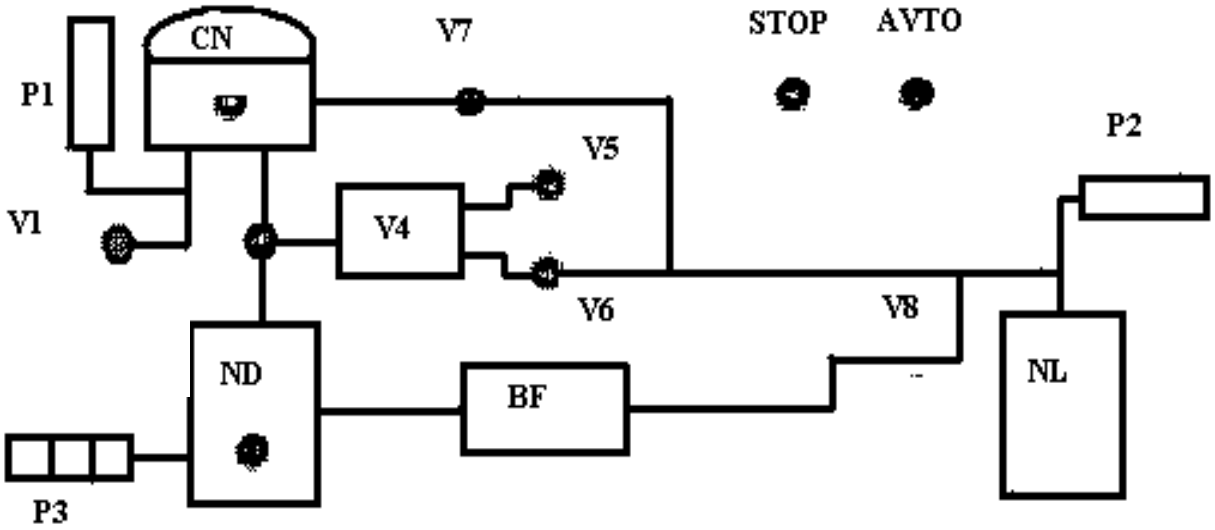


Рисунок 3.2 – Схема вакуумної системи

Позначення рисунку 3.2:

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 ($t \approx 150^0$C);

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

V1, V4, V5, V6, V7, V8 – клапани системи, для зв'язку окремих незалежних частин. Клапан V1 використовується для накачки повітря в камеру CN після проведення досліду. Клапан V4 відкриває затворку між дифузійним насосом та камерою CN, так як різниця тисків по різні боки велика, то клапани V5 та V6 допомагають відкрити клапан V4;

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

P1, P2, P3, P4 – датчики;

P1, P2 – термопарні;

P3 – іонізаційний.

Відкривається клапан V7 і йде відкачка форвакуумним насосом з камери CN. Потім відкривається клапан V8 і повітря відкачується по лінії дифузійного насосу. Після цього відкривається клапан V4 і дифузійний насос створює вакуум вищого порядку в порівнянні з вакуумом, що утворив NL.

Для вимірювання товщини плівок у процесі експерименту використовувався кварцовий датчик – прилад, що дозволяє вимірювати товщину тонкої плівки через зміну частоти коливання кварцової пластинки. Він складається з включеної в електричне коло кварцової пластинки [11]. Прилад працює на резонансній частоті – 8МГц. Зсув частоти на кілька герц відповідає росту плівки на один адсорбційний шар.

3.2 Вибір датчика товщини

Сауербрей і Лостіс уперше досліджували можливість використання кварцових кристалічних резонаторів для визначення малої кількості осаджуємої речовини. Датчики із кристалічними резонаторами для виміру товщини плівки мають відносно просту конструкцію (МР-151.21.0102.03.01.ТК). При значній чутливості вони практично не бояться механічних ударів і вібрацій. Із цієї причини кристалічні резонатори широко використовують для контролю нанесення тонких плівок. У датчику із кристалічним резонатором використовують п'єзоелектричні властивості кварцу. Резонатор являє собою тонку пластину кварцу, до обох поверхонь якої підведені електричні контакти. Такий резонатор включається в електронну схему генератора. Додаток змінного електричного поля приводить до виникнення коливань кварцової пластини по товщині [6]. Резонансна частота цих коливань, по формулі 3.1, обернено пропорційна товщині пластини d_q:

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

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

При виготовленні кварцових пластин необхідно враховувати температурну залежність резонансної частоти. Відомо, що температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) кварцу пов'язаний із пружними постійними [21]. У вираз для ТКЧ входять як позитивні, так і негативні члени, величини яких залежать від орієнтації коливань щодо основних кристалографічних осей монокристала. Оскільки зміна частоти, пов'язана із флуктуаціями температури, впливає на точність визначення маси, кварцові пластинки вирізують із монокристала в такій орієнтації, щоб різні члени у виразі для ТКЧ компенсували один одного. Цій вимозі відповідає зріз, площину якого становить кут приблизно 35° із площиною *c, x,* як показано на рис. 3.3.

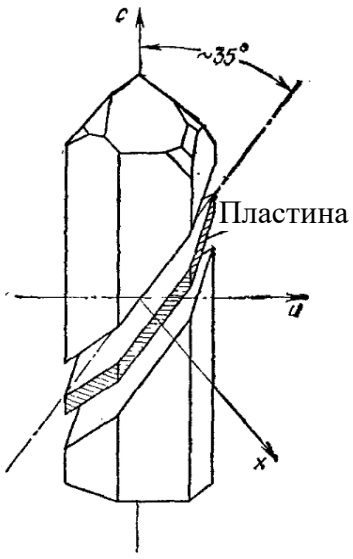


Рисунок 3.3 – Кристал кварцу з пластиною, вирізаною під кутом АТ-зрізу

Орієнтація такого зрізу позначається як АТ-зріз і саме ця орієнтація використовується у всіх датчиках товщини. Температурна залежність ТКЧ для ряду АТ-зрізів із трохи різною орієнтацією була досліджена Фелпсом. На рис. 3.4 наведена ця залежність для зрізу, зробленого під кутом 35°20′. Величина ТКЧ дорівнює нулю при температурі приблизно 30°С й залишається менше $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ 1/°С у діапазоні температур ±30°С. Зміна кута зрізу всього лише на 10′ зсуває температуру, при якій ТКЧ дорівнює нулю на 50°С и звужує інтервал малих значень ТКЧ. Звичайно кути зрізу вибирають між 35°10′ і 35°20′ Залежність резонансної частоти коливань зсуву пластини, вирізаної під кутом АТ-зрізу, від товщини пластини визначається за формулою 3.2:

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

де $N = 1{,}67 \cdot 10^6$ Гц·мм

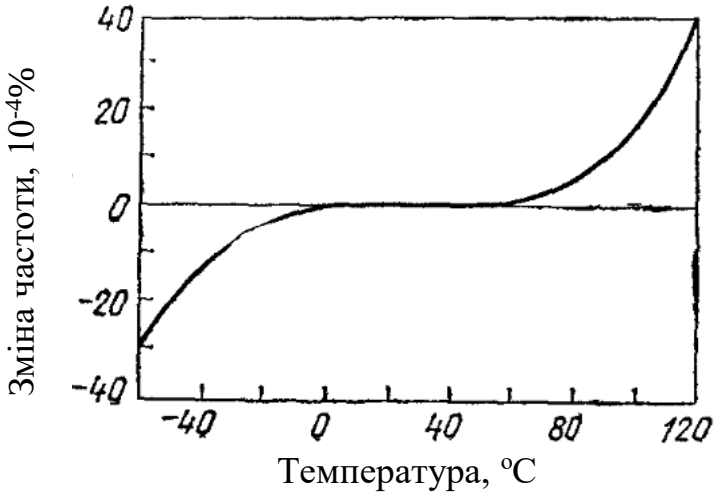


Рисунок 3.4 – Залежність зміни частоти від температури для пластини кристалу, вирізаної під кутом АТ-зрізу 35°20′

Можна припустити, що при осадженні малої додаткової маси ΔM на одну або обидві сторони пластинки, робочі поверхні кристала як і раніше залишаються в пучності коливань, тобто осаджена речовина не накопичує енергію пружної деформації за час циклу коливань. Отже, осаджена речовина впливає на резонансну частоту тільки через масу, а параметри речовини, такі як густина і пружні постійні, виявляються несуттєвими [6]. Залежність частоти коливань від кількості осадженої речовини можна вивести з рівняння 3.2, якщо обидві частини його продиференціювати по d_q і величину приросту товщини кварцу Δd_q виразити через масу осадженої речовини ΔM і товщину плівки d_f. Інший варіант рішення був запропонований Стокбриджем, що використав метод збурювань для аналізу поводження пластин резонатора й одержав той же самий результат (формула 3.3):

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

де ρ_q – густина кварцу (2,65 г·см$^{-3}$);

K – постійна, близька до одиниці, величина яка залежить від розподілу осадженої плівки по площі A_m датчика.

У якості A_m треба брати повну площу поверхні пластини кристала. Однак часто буває, що електроди покривають не всю поверхню кристала. У цьому випадку під A_m розуміють площу електродів оскільки було показано, що поза електродами коливання дуже малі, і осадження речовини на ці участки в загальну зміну частоти Δf дає внесок порядку 1% [21].

Коефіцієнт пропорційності в рівнянні 3.3 між величинами зсуву частоти і масою осадженої речовини на одиницю площі одержав назву чутливості кристала до визначення маси (формула 3.4):

$$C_f = \frac{f_0^{\,2}}{N \cdot \rho_q} = \frac{N}{\rho_q \cdot d_q^{\,2}} \left[Гц \cdot г^{-1} \cdot см^2 \right] \qquad (3.4)$$

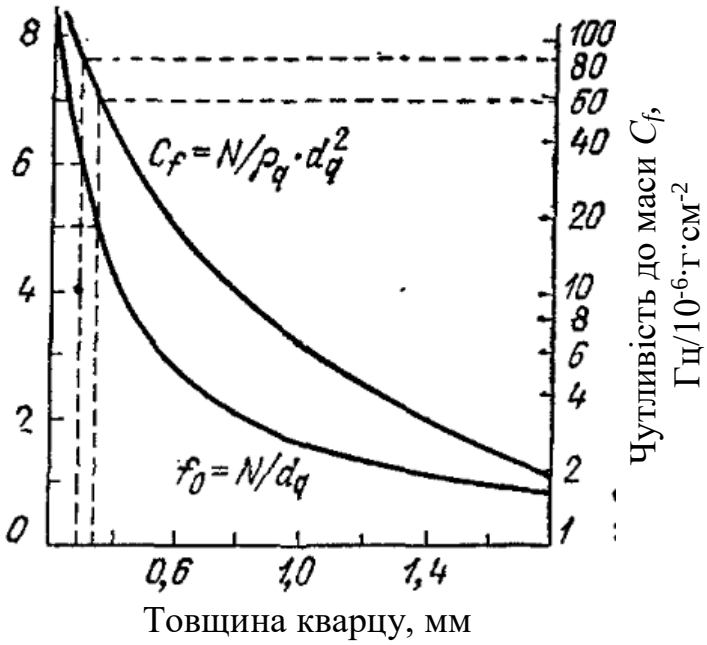


Рисунок 3.5 – Залежність резонансної частоти і чутливості до маси від товщини пластини, вирізаної під кутом АТ-зрізу

З рис. 3.5 випливає, що більш тонкі кристали з більш високою резонансною частотою мають більшу чутливість. Тому для одержання високої чутливості пластини варто робити максимально тонкими, наскільки дозволяє їхня механічна міцність. Однак є й інше обмеження на товщину пластини,

пов'язане з тим, що лінійна пропорційність між Δf і ΔM існує лише доти, поки товщина осадженого шару набагато менше товщини пластини. Граничні значення, при яких припущення про лінійність ще не приводить до значних помилок, становлять по Δf_{max} від 0,5% до 5% від первісної частоти f_0. Хоча максимально можливий діапазон зміни частоти збільшується зі зменшенням товщини кристала, однак маса, осадження якої приводить до цього граничного значення Δf_{max}, більше для менш чутливих (більш товстих) кристалів. Все це добре видно з рисунку 3.6, де представлена залежність величини максимальної зміни частоти й максимальної кількості осадженої речовини від товщини пластини кварцу. Прийнято, що кристали товщиною порядку 0,3мм із початковими частотами 5–6Мгц щонайкраще задовольняють суперечливим вимогам високої чутливості й можливості вимірювати кількість речовини в широкому діапазоні. Ця область товщин кварцової пластини й області максимальної зміни частоти й максимального діапазону вимірюваних мас позначені на рисунку 3.5 і 3.6 пунктирними лініями [21]. Рівняння 3.3, що зв'язує частоту з масою, неодноразово перевірялося за допомогою мікрозважування.

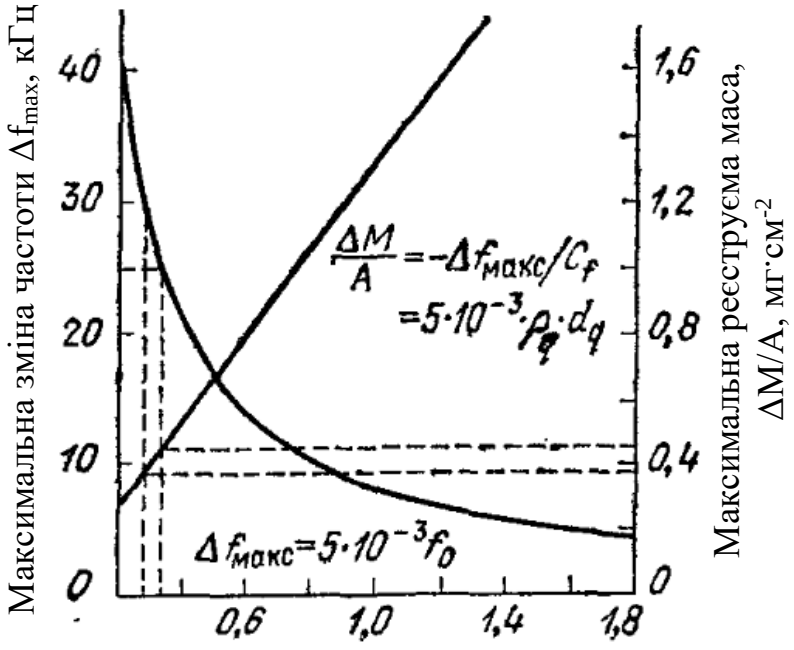


Рисунок 3.6 – Залежність максимальної зміни частоти і величини максимальної реєструємої маси від товщини пластини, вирізаної під кутом АТ-зрізу

Ешбах і Круідхоф експериментально вимірювали величину чутливості C_f, що виявилася рівною в межах 0,4% величини, розрахованої з параметрів кварцу, рівняння 3.6. Звідси випливає, що немає необхідності калібрувати датчик, однак, як вказали Ніедермайер зі співробітниками, завжди необхідно враховувати температуру кристалу. Крім того, був досліджений інтервал приблизно лінійної зміни частоти. Емпіричні значення Δf_{max} для пластинок з резонансною частотою 5МГц лежали в області від 50 до 100 кГц, що еквівалентно максимальній кількості осадженої речовини від 1 до 2 мг·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 викликано зневагою членами другого порядку в аналізі Стокбріджа або несправедливістю припущення, що плівка осадженої речовини не накопичує енергії. У першому випадку відхилення від нелінійності не повинно залежати від властивостей осадженої речовини, тоді як у другому випадку величина відхилення повинна бути різною для речовин з різними механічними властивостями. Якщо для даного кристала відома нелінійна частина залежності частоти від маси, то область виміру товщини може бути просунута до товщини у декілька мікрон. При цьому можна проводити калібрування пластини кварцу за допомогою незалежних методів виміру товщини, оскільки нанесений шар можна видалити хімічним травленням і кристал використати знову. Однак коли товщина плівки стає рівною товщині пластини кристала, осаджена плівка починає накопичувати пружну енергію, що приводить до виникнення видів коливань, відмінних від поперечних коливань зсуву. При цьому коливання кристалу в напрямку товщини стають нерегулярними (частота «стрибає») або можуть припинитися повністю. З огляду на ці обмеження й вартість кварцових пластин, звичайно не має змісту розширювати область вимірюваних товщин за допомогою додаткового калібрування (МР-151.21.0102.03.01.ТК).

Кристали, використовувані в датчиках, звичайно являють собою пластини круглої або квадратної форми з типовими розмірами 13–14мм. Вони монтуються в

тримачі, які фіксують їхнє положення й дозволяють їх легко знімати й монтувати знову. На рис. 3.7 наведені конструкції двох типів тримачів кристалів. Для прикладення до кристала електричного поля на обидві поверхні пластини наносять випаровуванням тонкі плівки золота або іноді срібла. У конструкції, наведеної на рис. 3.7(а), плівкові електроди займають всю поверхню пластини, тоді як у конструкції, наведеної на рис. 3.7(б), тільки центральна частина покрита металом у вигляді кілець, d = 6÷8мм. В останньому випадку випаруваний свинець забезпечує контакт із краями пластини. В інших конструкціях металізується тільки та сторона пластини, на яку здійснюється осадження, тоді як протилежна сторона просто притискається до поверхні металевого тримача [21].

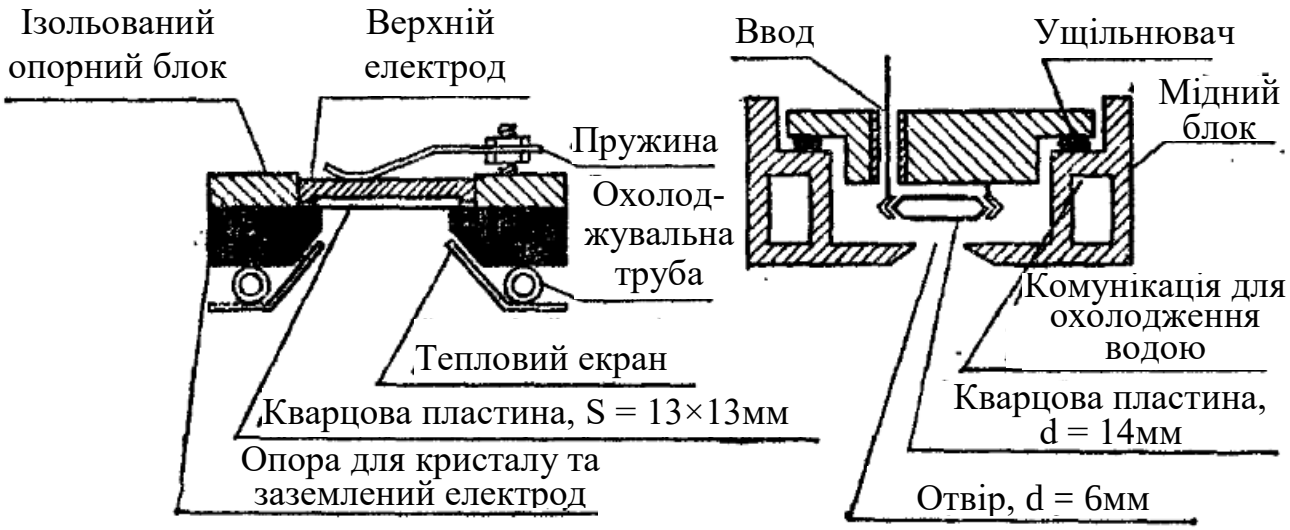


Рисунок 3.7 – Конструкції тримачів кварцових резонаторів, запропоновані: а – Берідтом і Лавом; б – Пулкером

Лангер і Патон розробили конструкцію тримача з матеріалів, які дозволяють робити випалювання усього перетворювача при 450°С. Варто вказати, що частотні характеристики кварцових кристалів, нагрітих до 400°С, повністю відновлюються після охолодження. Можливість знегажування кристалів забезпечує їхнє використання в надвисокому вакуумі. Дослідження показали, що якщо адсорбція й десорбція на поверхні кристала відсутні, то частота коливань не залежить від

величини тиску у всьому діапазоні високого й надвисокого вакууму. Незважаючи на те, що пластини, вирізані в напрямку АТ-зрізу, мають найменший можливий температурний коефіцієнт частоти, все-таки необхідно приймати спеціальні міри, щоб зменшити зміну температури кристала за рахунок випромінювання від випарника й виділення теплоти конденсації. Тому кристалотримач звичайно охолоджується водою й утворить радіаційний екран, що оточує весь кристал, за винятком робочої поверхні. Тепло, одержуване по необхідності відкритою поверхнею, все-таки викликає збільшення температури кристала на кілька градусів Цельсія, що приводить до зрушення частоти від 10 до 100 Гц або еквівалентній зміні в масі від 10^{-7} до 10^{-8} г/см^2. Цей ефект можна послабити, якщо використати вхідний отвір з малим діаметром (рисунок 3.7(б)), однак при проведенні точних вимірів їм не можна зовсім зневажати. Берндт рекомендує на час, коли датчик відкритий для випарника й пар випаровуємої речовини, тримати заслінку перед підкладкою закритою. Це приводить до того що основні зміни температури датчика відбудуться до того, як почнеться осадження речовин на підкладку.

Основними приладами, необхідними для роботи датчика, є генератор і частотомір. Для виміру малих змін частоти на рівні резонансної частоти f_0 необхідно використовувати дорогі прилади, що дозволяють проводити виміри з точністю до сьомого знака. Звичайно використовують генератор порівняння, що містить другий кристал. Сигнал від цього генератора з фіксованою частотою й сигнал від детектора подаються на змішувач, на виході якого з'являється сигнал проміжної частоти. Цей сигнал і сигнал від генератора із плавно регульованою частотою подається я на другий змішувач. Схема електрична структурна цього приладу наведена на рис. 3.8 (МР-151.21.0102.03.02.Е2). Переваги такого приладу полягають у тому, що він дозволяє працювати в області частот, де спостерігається найбільша чутливість, незалежно від товщини плівки, осадженої на поверхні кристала. Вихідний сигнал перебуває в області звукових частот й управляє перерахунковою схемою.



Рисунок 3.8 – Блок-схема датчика з кристалом кварцу

За допомогою цифрових або аналогових систем реєстрації можна проводити вимір частоти з точністю $\pm 10^{-4}$%. При використанні цифрових систем вихідний сигнал може подаватися на цифродрукуючий пристрій для безперервного запису показань. У цьому випадку швидкість осадження може бути отримана з порівняння ряду послідовних показань. Можна ввести також електронну схему диференціювання й тоді швидкість осадження й товщина плівки можуть реєструватися на окремих індикаторах. При використанні аналогових систем змінний сигнал вимірюваної частоти перетворюється в постійний сигнал, що подається на вихідний прилад. Слід зазначити простоту системи автоматичного припинення процесу осадження, коли при досягненні сигналом попереднього заданого рівня заслінка автоматично закриває підкладку.

У реальних конструкціях точність датчиків із кварцовими кристалами визначається стабільністю схеми. Дослідження Стокбріджа показали, що тиск газу і його адсорбція роблять дуже малий із практичної точки зору ефект на резонансну частоту кристала. Якби було можливо реєструвати зміну частоти в

1Гц кристала з резонансною частотою 5МГц, то такий датчик володів би чутливістю $2 \cdot 10^{-8}$г·см$^{-2}$. Однак відхід частоти в схемі звичайно становить від 10 до 100Гц·год$^{-1}$. Таким чином, межа чутливості становить 10^{-7}–10^{-6}г·см$^{-2}$. Точність виміру товщини й швидкості осадження при цих умовах становить ±2%. Хілек і Ніедермайер повідомили про досягнуту ними точності ±1% при вимірі мас в області 10^{-7}–10^{-6}г·см$^{-2}$. Такі цифри з'явилися наслідком спеціального розгляду температурної залежності частоти. Уорнер і Стокбрідж розробили вимірювальну систему, що дозволяє вимірювати частоту з точністю 10^{-8}% [21]. Крім того, температуру кристала вони підтримували з точністю від ±0,1 до ±0,01°С. Все це дозволило реєструвати зміну маси в області від 10^{-10} до 10^{-18} г/см^2.

3.2.1 Датчик кварцовий QS/QSM

Призначення: датчики кварцові QS / QSM (рисунок 3.9) призначені для роботи в системах кварцового контролю товщини плівок, що наносяться у вакуумі [6]. Вони використовують для роботи змінні кварцові пластини-резонатори із частотою 4МГц, 5МГц, 6МГц або 8МГц.



Рисунок 3.9 – Датчик кварцовий QS/QSM

Датчики мають систему водяного охолодження й комплектуються магнітним захистом, фітингами, фланцями, трубками охолодження для різних сфер застосування.

Застосування:

- для іонно-променевого напилювання;
- для магнетронного напилювання;
- для електронно-променевого, термічного випаровування;
- для електронно-променевого випаровування з іонним асистуванням;
- для надвисокого вакууму;
- для високого вакууму.

Технічні характеристики:

Діапазон вимірюваних частот – від 4 до 10Мгц;

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

Діапазон робочих температур – від 0 до 300^0С.

3.3 Мікроконтролер ATmega103

ATmega103 є 8-ми розрядним CMOS мікроконтролером з низьким рівнем енергоспоживання, заснованим на AVR RISC архітектурі (МР-151.21.0102.04.00.Е2). Завдяки виконанню високопродуктивних інструкцій за один період тактового сигналу, ATmega103 досягає продуктивності, що наближається до рівня 1MIPS/Мгц, забезпечуючи розробнику можливість оптимізувати рівень енергоспоживання відповідно до необхідної обчислювальної продуктивності.

Ядро AVR, засноване на вдосконаленій RISC архітектурі, містить потужний набір інструкцій й 32 робочих регістра загального призначення. Всі 32 регістра прямо підключені до арифметико-логічного пристрою (АЛП), що забезпечує доступ до двох незалежних регістрів при виконанні однієї інструкції за один такт. У результаті, дана архітектура має більш високу ефективність коду, при підвищенні пропускної здатності, аж до 10 разів, у порівнянні зі стандартними мікроконтролерами CISC.

ATmega103 має: 128Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою внутрісистемного програмування, 4Кбайт EEPROM, 4Кбайт SRAM, 32 лінії I/O загального призначення, 8 вихідних ліній, 8 вхідних ліній, 32 робочих регістра загального призначення, контролер реального часу (RTC), 4 універсальних таймери/лічильника з режимами порівняння й ШІМ, UART, програмувальний таймер, що стежить, з убудованим тактовим генератором, SPI-послідовний порт, а також, три програмно обираних режими економії енергоспоживання. Режим очікування „Idle Mode" зупиняє CPU, але дозволяє функціонувати SRAM, таймеру/лічильникам, порту SPI і системі переривань. Режим економії енергоспоживання „Power Down" зберігає вміст регістрів, але зупиняє тактовий генератор, відключаючи всі інші функції мікроконтролера, до наступного зовнішнього переривання, або до апаратної ініціалізації. У режимі економії енергоспоживання „Power Save" тактовий генератор таймера продовжує функціонувати, дозволяючи користувачу підтримувати контроль часу в той час, як всі інші функції мікроконтролера відключені.

Пристрій виробляється із застосуванням технології енергонезалежної пам'яті з високою щільністю розміщення, розробленої в корпорації Atmel. Убудована Flash-пам'ять забезпечує можливість перепрограмування програмного коду в складі системи за допомогою послідовного інтерфейсу, або за допомогою стандартного програматора енергонезалежної пам'яті. Завдяки сполученню вдосконаленого 8-ми розрядного RISC CPU з Flash-пам'яттю з підтримкою внутрісистемного програмування на одному кристалі вийшов високопродуктивний мікроконтролер ATmega103, що забезпечує гнучке й економічно-високоефективне рішення для багатьох додатків систем керування, що вбудовують.

AVR ATmega103 підтримується повним набором програм і пакетів для розробки, включаючи: компілятори C, макроасемблери, відлагодники-симулятори програм, внутрісхемні емулятори й набори для макетування.

Структурна схема мікроконтролера ATmega103 наведена на рис. 3.10.

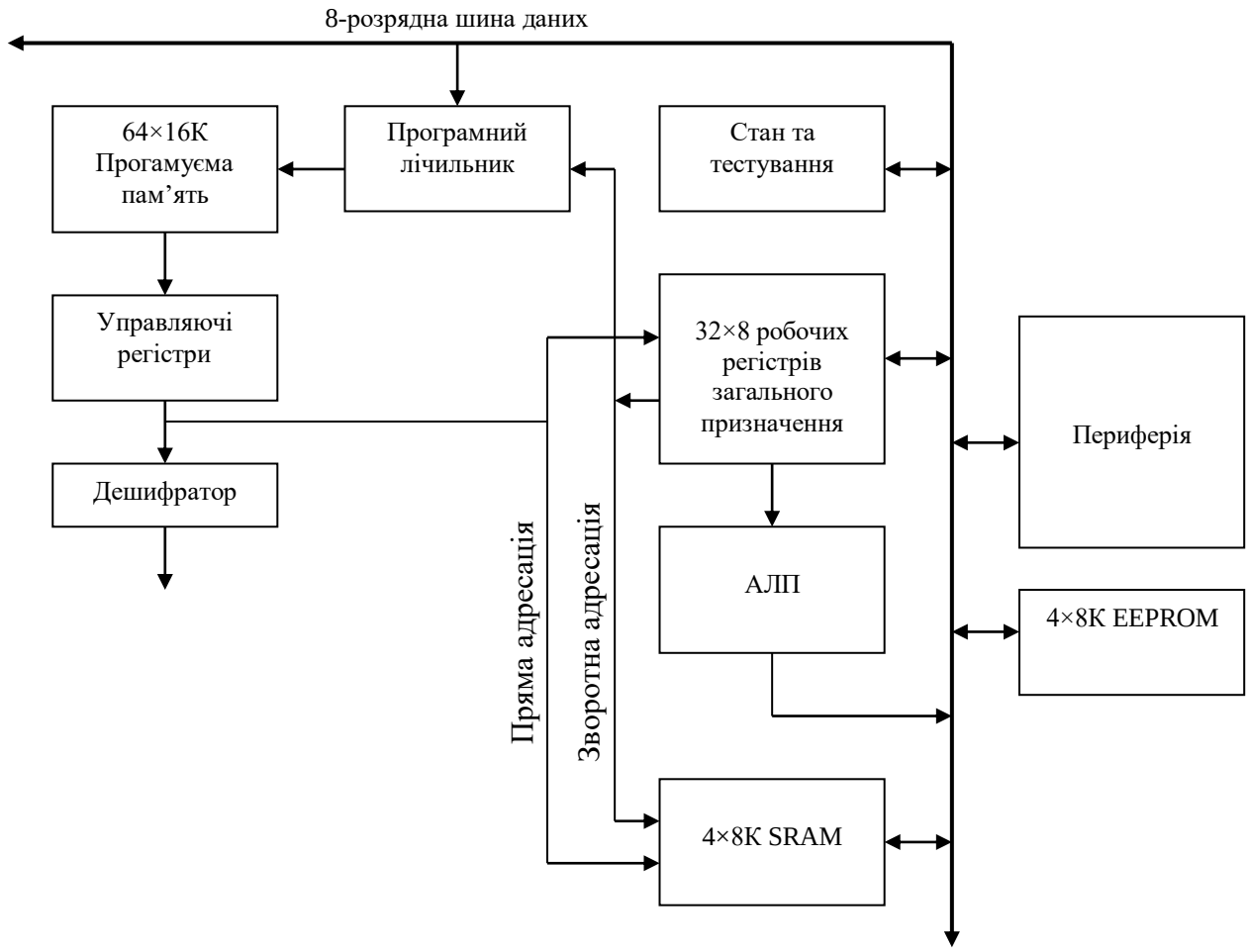


Рисунок 3.10 – Структурна схема мікроконтролера ATmega103

Технічні характеристики:

1 Заснований на AVR® RISC архітектурі;

2 AVR® – висока продуктивність й RISC архітектура з низьким енергоспоживанням:

- 120/121 потужних інструкцій – більшість виконуються за один такт;

- 32×8 робочих регістрів загального призначення та регістри керування периферією;

- Продуктивність, до 6MIPS при 6Мгц;

3 Пам'ять даних й енергонезалежна пам'ять:

- 128 Кбайт Flash-програмна пам'ять із підтримкою внутрісистемного програмування;

- ресурс – 1000 циклів запису/стирання;

4 4Кбайт убудованої SRAM;

5 4Кбайт EEPROM з підтримкою внутрісистемного програмування:

- Ресурс – 100 000 циклів запису/стирання;

6 Програмувальне блокування для безпеки вмісту Flash й EEPROM;

7 Периферія:

- Убудований аналоговий компаратор;

- Програмувальний таймер, що стежить, з убудованим генератором;

- Програмувальний послідовний UART;

- Ведучий/ведомий SPI-послідовний інтерфейс;

- Контролер реального часу (RTC) з виділеним тактовим генератором;

- Два 8-ми розрядних таймери/лічильника з окремим попереднім дільником частоти;

- Розширена система з 16-ти розрядним таймером/лічильником з окремим попереднім дільником частоти режимами порівняння й захвата, а також з 8-ми, 9-ти й 10-ти розрядним ШІМ;

- Програмувальний таймер, що стежить, з убудованим тактовим генератором;

- 8-ми канальний, 10-ти розрядний АЦП;

8 Спеціалізовані функції мікроконтролера:

- Режими зниженого енергоспоживання – Спокою (Idle), економічний (Power Save) і відключення (Power Down);

- Програмно-обираєма частота тактового генератора;

- Зовнішні й внутрішні джерела переривання;

9 Специфікації:

- Мікропотужна, високошвидкісна CMOS технологія;

- Повністю статичний режим роботи;

10 Споживана потужність при 4МГц, 3В, 25°С:

- Активний режим: 5,5мА

- Режим спокою: 1,6мА

- Режим відключення <1мкА

11 Функції I/O і корпуса:

- 32 програмувальні лінії I/O, 8 вихідних ліній, 8 вхідних ліній;

- корпус 64-контактний TQFP;

12 Напруга живлення:

- Від 4,0В до 5,5В (ATmega103);

13 Діапазон тактових частот:

- Від 0 до 6Мгц (ATmega103).

Принципова схема мікроконтролера ATmega103 наведена на рис. 3.11.

Port A (PA7 – PA0) – 8-розрядний двонаправлений порт. До виводів порту можуть бути підключені вбудовані навантажувальні резистори. Вихідні буфери забезпечують струм 20мА і здатні прямо керувати світлодіодним індикатором. При використанні виводів порту як входи й установці зовнішнього сигналу в низький стан, струм буде витікати тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах. Порт A при наявності зовнішньої пам'яті даних використовується для організації мультиплексуємої шини адреси/даних.

Взаємодія з портом A здійснюється через три розташованих у просторі вводу/виводу (пам'яті даних) регістра: регістр порту даних PORTA, регістр напрямку даних DDRA і регістр вхідних даних PINA. Регістр вхідних даних забезпечує тільки можливість читання, регістри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість і читання, і запису.

Виводи порту A можуть виконувати альтернативну функцію. При взаємодії з зовнішньою пам'яттю даних вони можуть формувати молодші розряди мультиплексованої шини адреси/даних. Альтернативна функція включається установкою біта SRE регістра MCUCR, при цьому установки регістра напрямку даних ігноруються.

Port B (PB7 – PB0) – 8-разрадний двонаправлений порт з вбудованими навантажувальними резисторами. Вихідні буфери забезпечують струм 20мА.

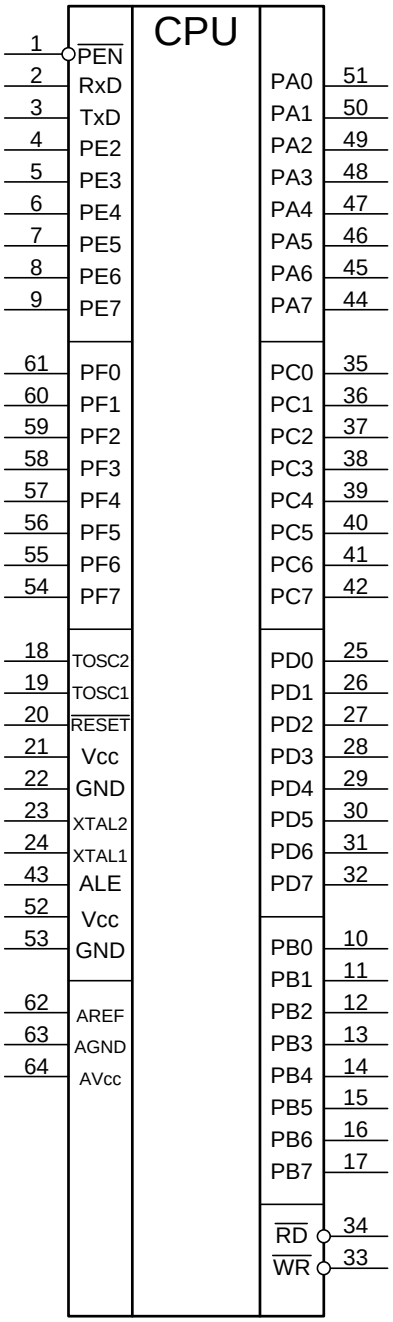


Рисунок 3.11 – Принципова схема мікроконтролера ATmega103

При використанні виводів порту як входи і установці зовнішнього сигналу в низький стан, струм буде протікати тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

Взаємодія з портом B здійснюється через три розташованих у просторі вводу/виводу (пам'яті даних) регістра: регістр порту даних PORTB, регістр напрямку даних DDRB і регістр вхідних даних PINB. Регістр вхідних даних забезпечує тільки можливість читання, регістри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість і читання, і запису.

Порт B використовується також при реалізації спеціальних функцій, які наведені в табл. 3.1.

Port C (PC7 – PC0) – 8-розрядний вихідний порт, вихідні буфери забезпечують струм 20мА. Порт C при наявності пам'яті даних використовується для організації шини адресу.

Крім основної функції виводи порту C виконують альтернативну функцію при роботі із зовнішньою пам'яттю даних. У цьому режимі через лінії порту C виводиться старший байт адреси зовнішньої пам'яті.

Port D (PD – PD0) – 8-розрядний двонаправлений порт з вбудованими навантажувальними резисторами. Вихідні буфери забезпечують струм 20мА. При використанні виводів порту як входи і установці зовнішнього сигналу в низький стан, струм буде витікати тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

Таблиця 3.1 – Альтернативні функції виводів порту B

Вивід порту	Альтернативні функції
PB0	SS – вхід вибору ведомого пристрою SPI
PB1	SCK – тактовий сигнал порту SPI
PB2	MOSI – лінія вихід ведучого / вхід ведомого порту SPI
PB3	MISO – лінія вхід ведучого / вихід ведомого порту SPI
PB4	OC0A/PWM0A – вихід порівняння PWM таймера/лічильника 0
PB5	OC1A/PWM1A – вихід A порівняння PWM таймера/лічильника 1
PB6	OC1B/PWM1B – вихід B порівняння PWM таймера/лічильника 1
PB7	OC2/PWM2 – вихід порівняння PWM таймера/лічильника 2

Взаємодія з портом D здійснюється через три розташованих у просторі вводу/виводу (пам'яті даних) регістра: регістр порту даних PORTD, регістр напрямку даних DDRD і регістр вхідних даних PIND. Регістр вхідних даних забезпечує тільки можливість читання, регістри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість і читання, і запису.

Порт D використовується також при реалізації спеціальних функцій, які наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Альтернативні функції виводів порту D

Вивід порту	Альтернативні функції
PD0	INT0 – вхід зовнішнього переривання 0
PD1	INT1 – вхід зовнішнього переривання 1
PD2	INT2 – вхід зовнішнього переривання 2
PD3	INT3 – вхід зовнішнього переривання 3
PD4	IC1 – вхід тригера захвату таймера/лічильника 1
PD6	T1 – вхід тактового сигналу таймера/лічильника 1
PD7	T2 – вхід тактового сигналу таймера/лічильника 2

Port E (PE7 – PE0) – 8-розрядний двонаправлений порт з вбудованими навантажувальними резисторами. Вихідні буфери забезпечують струм 20мА. При використанні виводів порту як входи і установці зовнішнього сигналу в низький стан, струм що через них витікає забезпечується тільки при підключених вбудованих навантажувальних резисторах.

Взаємодія з портом E здійснюється через три розташованих у просторі вводу/виводу (пам'яті даних) регістра: регістр порту даних PORTE, регістр напрямку даних DDRE і регістр вхідних даних PINE. Регістр вхідних даних забезпечує тільки можливість читання, регістри порту даних і напрямку даних забезпечують можливість і читання, і запису.

Порт E використовується також при реалізації спеціальних функцій, які наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Альтернативні функції виводів порту E

Вивід порту	Альтернативні функції
PE0	PDI/RXD – вхід даних при програмуванні flash-пам’яті, або вхід приймача UART
PE1	PDI/TXD – вихід даних при програмуванні, або вихід передавача UART
PE2	AC+ – додатній вхід аналогового компаратора
PE3	AC– – від’ємний вхід аналогового компаратора
PE4	INT4 – вхід зовнішнього переривання 4
PE5	INT5 – вхід зовнішнього переривання 5
PE6	INT6 – вхід зовнішнього переривання 6
PE7	INT7 – вхід зовнішнього переривання 7

Port F (PF7 – PF0) – 8-розрядний вхідний порт, входи порту використовуються також як аналогові входи аналогово-цифрового перетворювача.

Виводи порту F підключені через аналоговий мультиплексор до аналогово-цифрового перетворювача. Виводи порту F, крім виконання функцій аналогових входів, можуть бути використані і як цифрові входи. Це дозволяє користувачеві одночасно використовувати частину виводів порту F як цифрові входи, а іншу частину – як аналогові входи.

RESET – вхід скидання. Для виконання скидання необхідно утримувати низький рівень на вході більш 50нс.

XTAL1, XTAL2 – вхід і вихід підсилювача генератора, що інвертує, тактову частоту.

TOSC1, TOSC2 – вхід і вихід підсилювача генератора, що інвертує, таймер/лічильник.

WR, RD – строби запису і читання зовнішньої пам'яті даних.

ALE – строб дозволу фіксації адреси зовнішньої пам'яті. Строб ALE використовується для фіксації молодшого байта адреси з виводів AD0 – AD7 у засувці адреси протягом першого циклу звертання. Протягом другого циклу звертання виводи AD0 – AD7 використовуються для передачі даних.

AVCC – напруга живлення аналогово-цифрового перетворювача. Вивід приєднується до Vcc через низькочастотний фільтр.

AREF – вхід опорної напруги для аналогово-цифрового перетворювача. На цей вихід подається напруга в діапазоні між AGND і AVCC.

AGND – цей вихід повинен бути приєднаний до окремої аналогової землі, якщо вона є на платі. В іншому випадку вивід приєднується до загальної землі.

PEN – вивід дозволу програмування через послідовний інтерфейс. При утриманні сигналу на цьому виводі на низькому рівні після включення живлення, прилад переходить у режим програмування по послідовному каналу.

Vcc – напруга живлення.

GND – земля.

Принципова схема мікроконтролера представлена на (МР-151.21.0102.05.00.Е3).

4 РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Кореляційно-регресійний аналіз

Метою будь-якого дослідження є використання його результатів у майбутньому, або, інакше кажучи, прогнозування стану досліджуваного явища. При цьому, бажаючи вивчати явище у взаємозв'язку з іншими явищами або величинами, приходиться виділяти деякі з них, що впливають на досліджуване, оцінювати ступінь і "якість" впливу, тобто характер зв'язку між досліджуваним і впливають на його величинами якісного або кількісного характеру.

Розрізняють два види зв'язків. Якщо значення залежної змінної стає відомим, як тільки відомі значення незалежних змінних, говорять про зв'язок динамічному або функціональної, оскільки в цьому випадку існує закон, по якому обчислюється в у залежності від $x_1, x_2, \ldots, x_k$, y = f($x_1, x_2, \ldots, x_k$).

Інакше, коли за значеннями незалежних величин можна установити лише деяку «середню» тенденцію в значеннях залежної змінної. Подібного роду зв'язку називають кореляційними, а задачею встановлення математичної форми кореляційного зв'язку займається регресійний аналіз [1]. Залежна змінна в при цьому розглядається як випадкова величина, а незалежні змінні можна прямо або побічно контролювати. Кореляційний аналіз вивчає спільний розподіл усіх вимірюваних змінних з аналізом точності оцінювання одних величин через інші.

Під час проведення експерименту отримані значення товщини плівки та положення заслінки (таблиця 4.1) (МР-151.21.0102.06.00.ТК).

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	-	-	-

Наносимо пари x_i, y_i на координатну площину отримаємо кореляційне поле (рисунок 4.1). Методами кореляціно-регресійного аналізу визначимо, чи є функціональні зв'язки між статистичними даними [1].

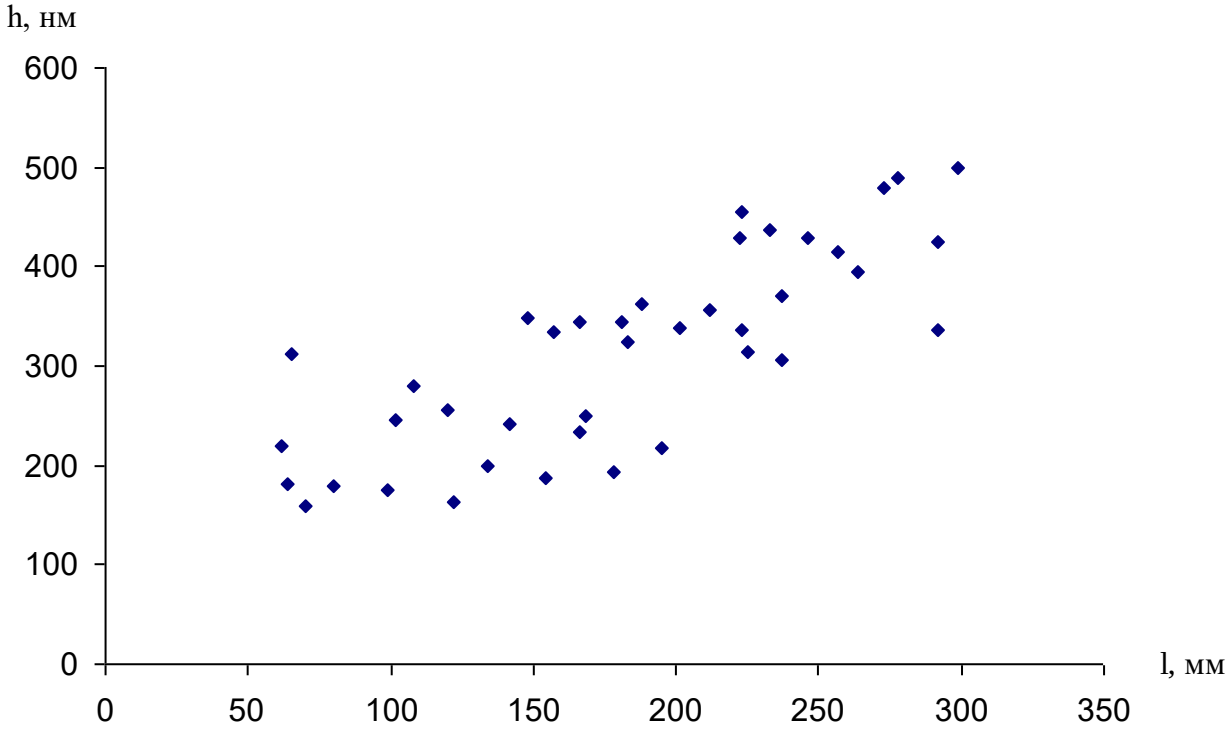


Рисунок 4.1 – Кореляційне поле статистичних даних

Опишемо математичну постановку задачі, вважаючи, що вивчається одна залежна змінна в у присутності однієї незалежної змінної x (так називана задача парної регресії).

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

$$\mathbf{y = a_0 + a_1 x + \varepsilon}, \tag{4.1}$$

де a_0, a_1 – постійні коефіцієнти, називані параметрами моделі,

ε – випадкова величина з математичним сподіванням 0 і дисперсією s^{2}.

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

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

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

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

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

Як ми вже знаємо, кожна задача оцінювання зв'язана з деяким критерієм якості. У викладається нами теорії 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):

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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) [1]:

$$\hat{a}_0 = \frac{\overline{x^2} \cdot \bar{y} - \overline{xy} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2},$$

$$\hat{a}_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}. \quad (4.9)$$

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

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

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

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

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

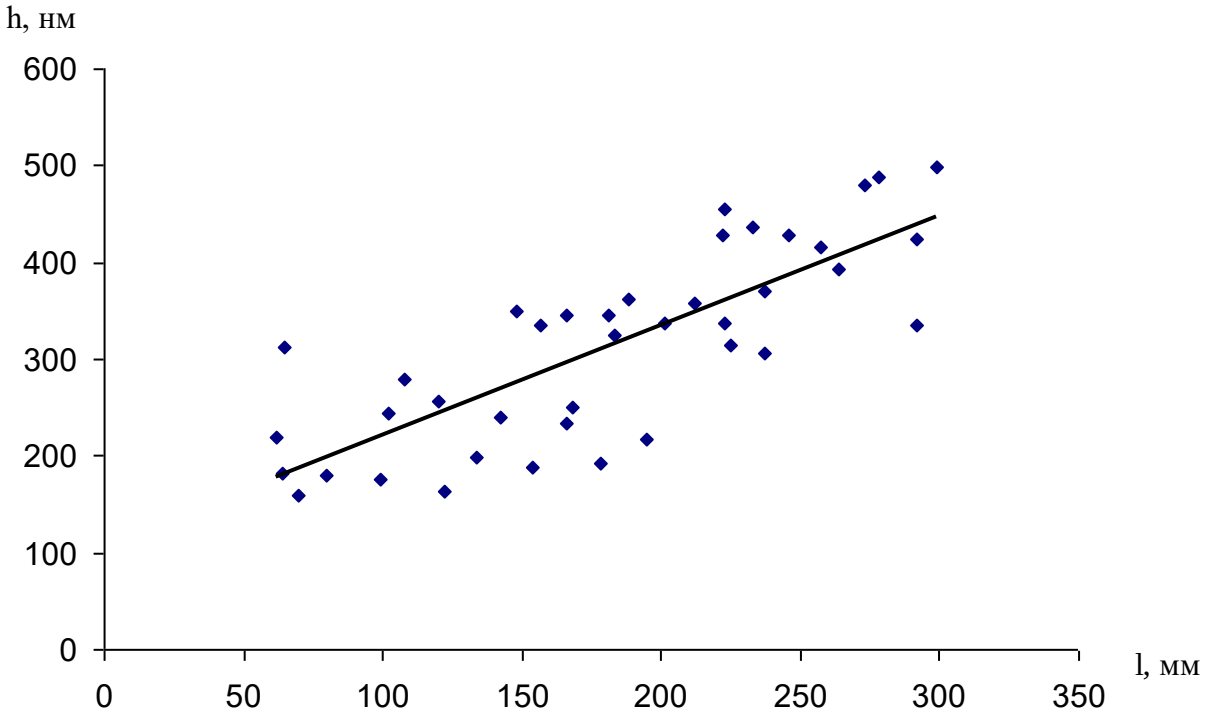


Рисунок 4.2 – Кореляційне поле статистичних даних і пряма регресії

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

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

Значення $\bar{r}$ коливається від міну 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.

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

Як бачимо, значення $\bar{r}$ досить близько до одиниці, тобто вибір лінійної моделі виправданий.

Для визначення істотності тобто невипадковості коефіцієнта кореляції було використано критерій Стьюдента [16]. Фактичне значення критерію Стьюдента обчислюється за формулою (4.12):

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

де $\bar{r}$ – значення коефіцієнта кореляції за модулем;

n – кількість вимірів;

k=n–2 – число ступенів вільності;

α – рівень істотності.

Якщо обчислене значення критерію Стьюдента не менше, ніж критичне значення $t_{кр}(k;\alpha)$ [12], 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 Стьюдента [12], для рівня істотності α=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 [16]. Для підтвердження істотності лінії регресії повинно виконуватись нерівність:

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

де $k_1=n-1$; $k_2=n-2$ – ступені свободи;

n – кількість вимірів;

α=0,05 – рівень істотності;

$F_{табл}$ – табличне значення критерію Фішера.[12]

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

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

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

Таким чином рівняння регресії описує результати вимірів в 1,7 рази краще ніж середнє значення $\bar{y}$, тобто адекватно відображає результати експерименту. Істотність зв'язку в кореляційно-регресійному аналізі підтверджена.

4.2 Визначення передаточної функції

Для побудови високоефективної системи керування необхідно мати опис об'єкта керування у виді математичної моделі.

Для опису об'єктів керування, у яких відсутня залежність перемінних стану, керування від просторових координат (лінійні багатомірні системи з зосередженими параметрами), використовуються системи лінійних звичайних диференціальних рівнянь чи відповідні зображення за Лапласом [13]. Розглянемо багатомірну лінійну систему з m керуваннями, l збуреннями і k входами. Модель лінійної системи з зосередженими параметрами в часовій області:

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

де x(t) – вектор стану системи, $x \in R^n$;

u(t) – вектор керувань (входів), $u \in R^m$;

y(t) – вектор виходів, $y \in R^k$;

f(t) – вектор збурювань, $f \in R^l$;

A – матриця розмірності n × n;

B – матриця розмірності n × m;

D – матриця розмірності n × l;

C – матриця розмірності k × n.

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

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

Частотне чи часове представлення вибираються з розумінь зручності, тому що у випадку постійних матриць A, B, C і D вони еквівалентні [13].

Для побудови подібних моделей можна використовувати два шляхи: застосовувати фундаментальні фізичні співвідношення у вигляді законів збереження речовини, енергії чи відновлювати параметри моделей по емпіричним даним, причому другий шлях більш часто застосовується на практиці.

Для побудови математичної моделі об'єкта керування використовувався метод відновлення параметрів моделі по емпіричним даним. Для цього за допомогою експериментальної установки були отримані дані для дослідження об'єкта керування і побудови його математичної моделі. Експериментальні дані: товщина нанесеного слою, h виміряна в певні моменти часу. Отримані дані були апроксимовані в середовищі наукових досліджень MatLab. Для побудови перехідного процесу використовуються значення h та t наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення h та t для побудови перехідного процесу

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

На рис. 4.3 по осі ординат відкладена товщина плівки, в нанометрах, а по осі абсцис – час у секундах. При цьому на самому графіку точками позначені безпосередньо експериментальні значення, визначені в дискретні моменти часу.

Нормований перехідний процес представлений на рис. 4.4.

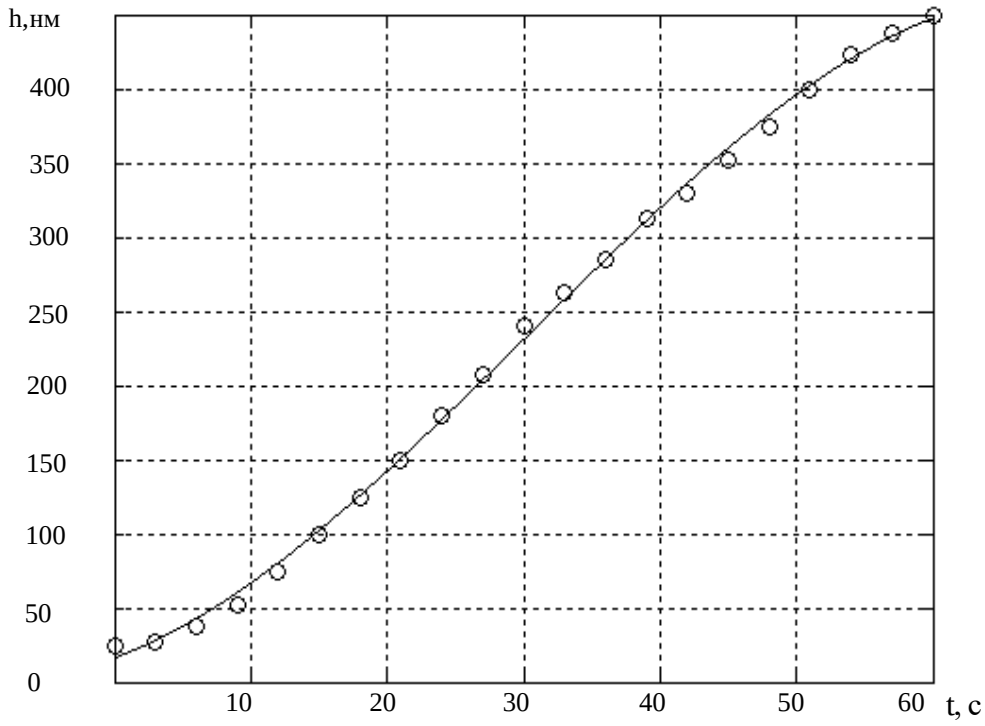


Рисунок 4.3 – Експериментальний перехідний процес

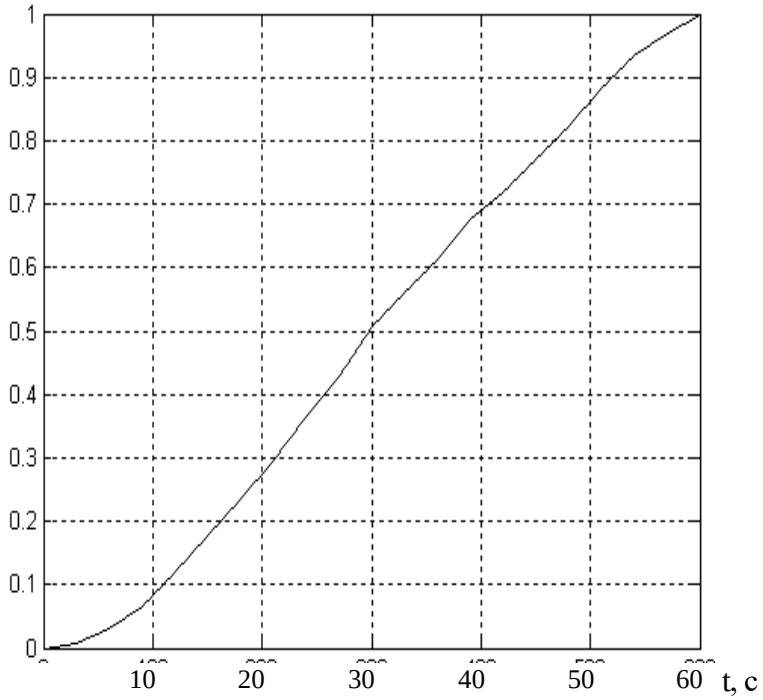


Рисунок 4.4 – Нормований перехідний процес

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

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^q} \tag{4.13}$$

Коефіцієнт підсилення об'єкта керування k можна знайти за графіком перехідного процесу. Постійні часу передаточної функції можуть бути знайдені методом площ і геометричним методом [19].

Коефіцієнт підсилення може бути визначений з наступного співвідношення:

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

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

4.2.1 Побудова математичної моделі ланки першого порядку геометричним методом

Ланка першого порядку з запізнюванням визначається за (4.2) [13]:

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

Для визначення величини запізнювання і постійної часу звернемося до графіка перехідного процесу (рис. 4.3). Для знаходження постійної часу необхідно провести пряму до перетинання з графіком процесу паралельно осі абсцис на рівні 0,63кс=283,5 (рис. 4.5).

Постійна часу Т = 37,22 с. $T_1 = T - \tau, \text{где } \tau = 35c \Rightarrow T_1 = 2{,}22c$. 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:

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

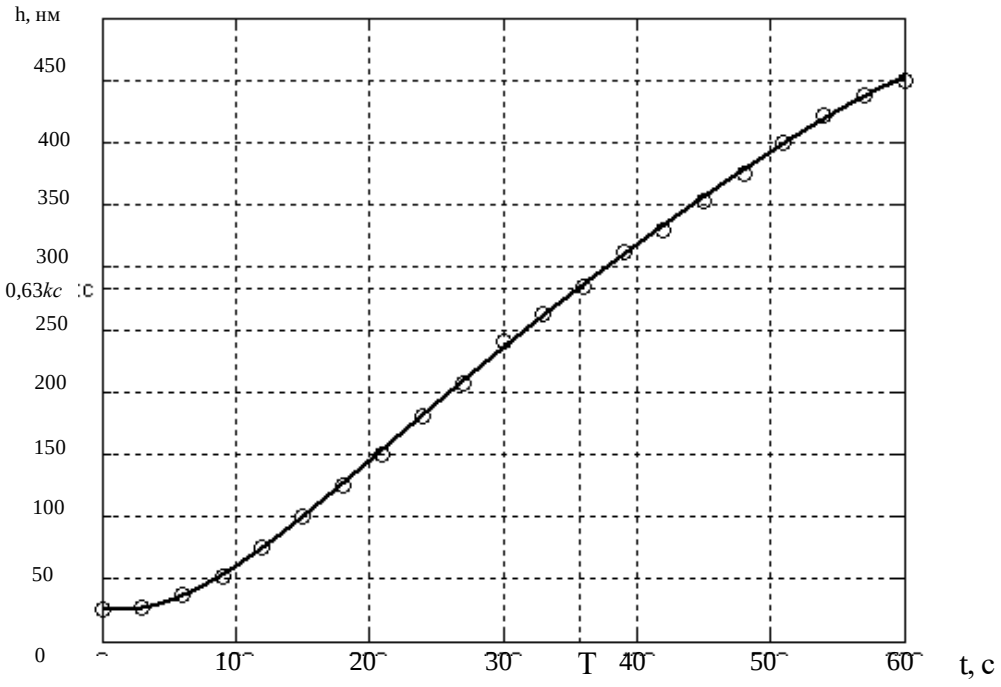


Рисунок 4.5 – Визначення постійної часу по графіку перехідного процесу

4.2.2 Побудова моделі ланки другого порядку методом площ

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

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

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.

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

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

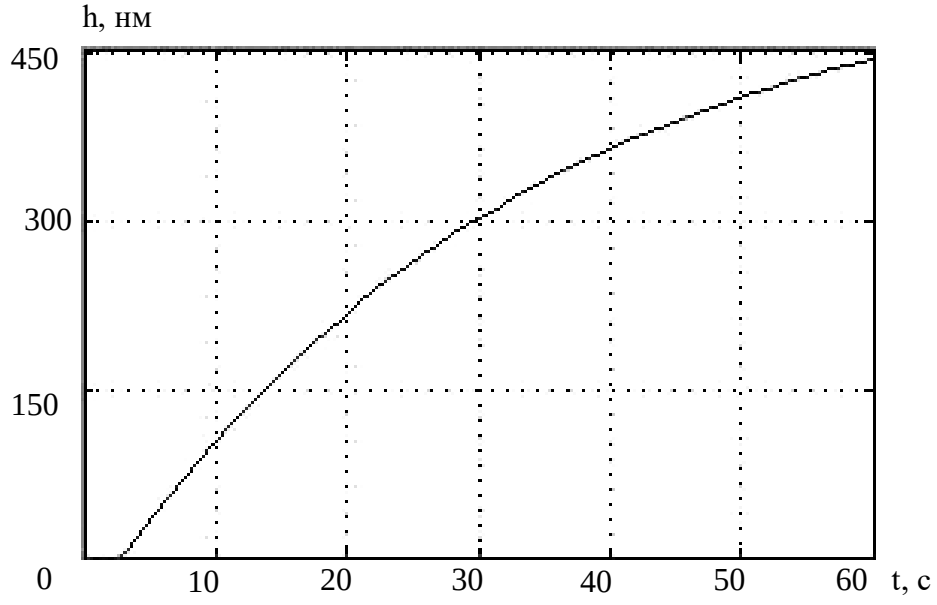


Рисунок 4.6 – Перехідний процес, отриманий за передаточною функцією першого порядку

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 = 9с, $y(t_п) = 0{,}09$.

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

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

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

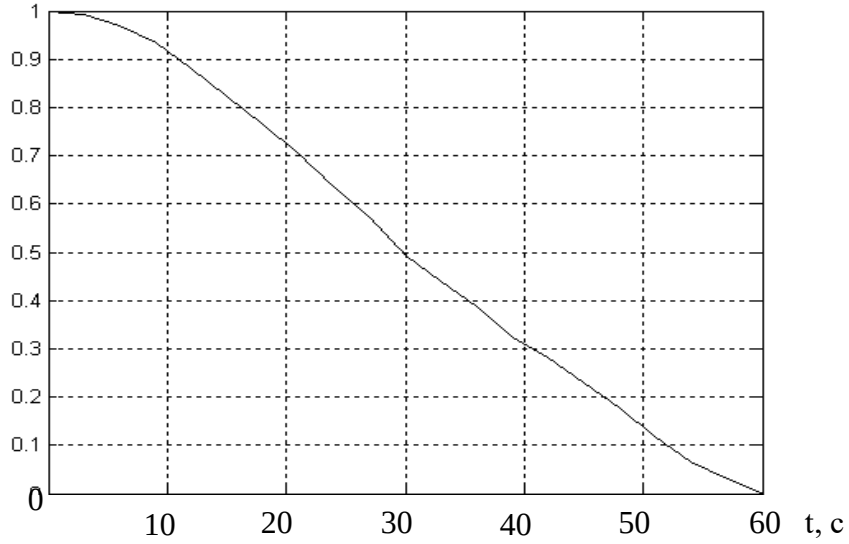


Рисунок 4.7 – Графік функції δ(t)

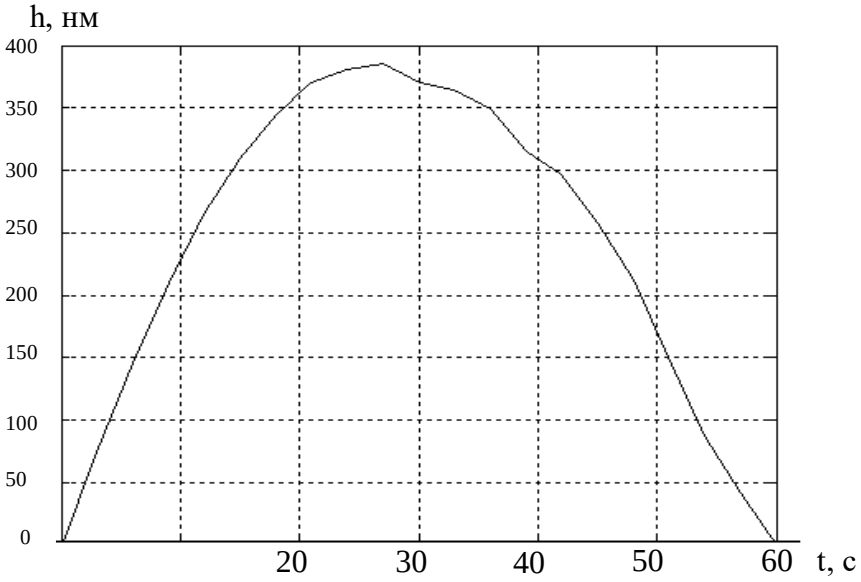


Рисунок 4.8 – Графік функції $\delta_2(t)$

$T_2=S_1 - T_1$.

Таким чином, реалізуючи даний алгоритм, отримані наступні результати:

$T_1 = 0,5$с,

$T_2 = 0,022$с.

Передаточна функція визначається за формулою:

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

Графік перехідного процесу для такої ланки наведений на рис. 4.9

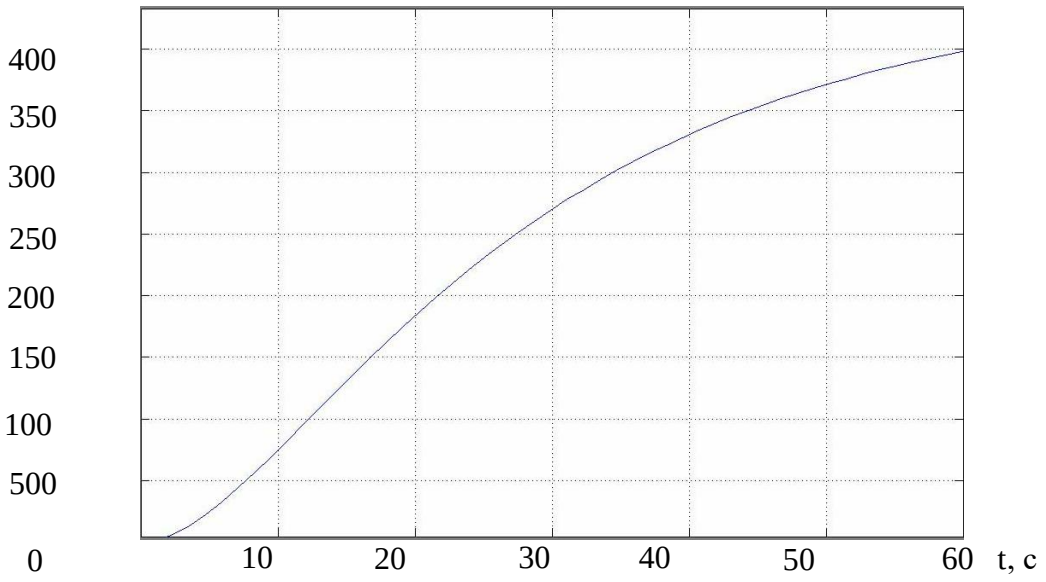


Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу для ланки другого порядку, розрахованого за методом площ

4.3 Вибір найкращої апроксимуючої моделі

Для вибору кращої апроксимуючої моделі об’єкта керування серед знайдених моделей порівняємо теоретичні й експериментальний перехідні процеси [19]. Для оцінки якості отриманих передаточних функцій, що описують об'єкт керування, обчислимо оцінку χ^2 за формулою:

$$\chi^2 = \frac{1}{k}\sqrt{\sum_{1}^{6}(yi - yi_real)^2} \qquad (4.19)$$

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 системи автоматичного регулювання

В даній схемі використаний принцип регулювання за відхиленням дійсного значення вихідної величини об'єкта від його заданого значення [10]. Для реалізації принципу керування за відхиленням САР має бути замкнутою. Основною особливістю і перевагою цієї схеми є те, що САР реагує на відхилення дійсного значення регульованої величини від заданого значення не залежно від причин, які зумовили це відхилення.

Схема електрична структурна САР представлена на рис. 4.10.

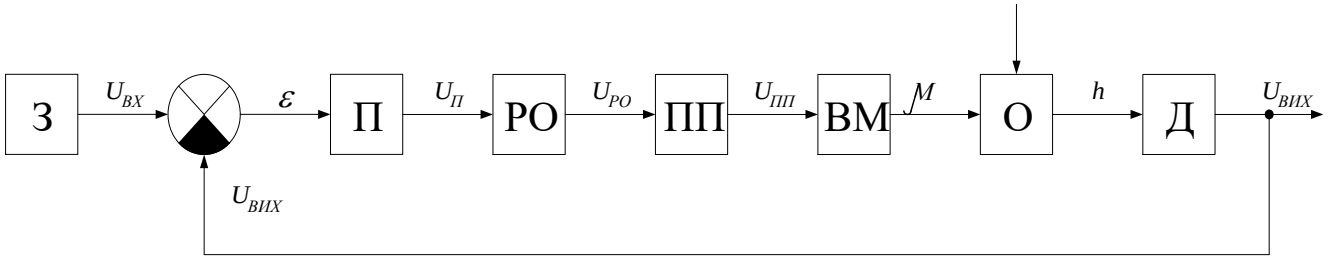


Рисунок 4.10 – Функціональна схема САР

З – задаючий пристрій;

П – підсилювач;

РО – регульований орган (мікроконтролер ATmega103);

ПП – підсилювач потужності;

ВМ – виконавчий механізм – вакуумний кроковий двигун VSS/VSH ;

О – об’єкт регулювання;

Д – кварцовий датчик.

$U_{ВИХ}$ – вихідна напруга датчика;

$U_{ВХ}$ – задаюче діяння (напруга);

$U_{П}$ – вихідна напруга підсилювача;

μ – положення заслінки;

$U_{ПП}$ – 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:

$$\varepsilon = U_{ВХ} - U_{ВИХ}.$$

Вихідні дані:

$T_{В1}$ = 0,5с; $T_{В2}$ = 0,022с; $T_Д$ = 0,02с; $k_Д$ = 0,5; $k_{РО}$ = 0,25; $k_{ПП}$ = 3; $k_В$ = 22,5; $k_П$ = 2.

При побудові структурної схеми САР були використані диференціальні рівняння елементів схеми. Диференційні рівняння елементів системи переведено до передаточних функцій цих елементів.

Передаточна функція елемента – це відношення зображення за Лапласом вихідної величини до зображення за Лапласом вхідної величини при нульових початкових умовах [9].

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:

$$T_Д \cdot \frac{dU_{ВИХ}}{dt} + U_{ВИХ} = k_Д \cdot h$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$T_Д \cdot p \cdot \overline{U_{ВИХ}} + \overline{U_{ВИХ}} = k_Д \cdot \bar{h}$$

Передаточна функція іонізаційного датчика:

$$W_Д(p) = \frac{\overline{U_{ВИХ}}}{\bar{h}} = \frac{k_Д}{T_Д \cdot p + 1}$$

Рівняння підсилювача потужності:

$$U_{ПП} = k_{ПП} \cdot U_{РО}$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

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

Передаточна функція підсилювача потужності:

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

Рівняння регулювального органу (мікроконтролер ATmega103):

$$U_{РО} = k_{РО} \cdot U_П$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$\overline{U_{РО}} = k_{РО} \cdot \overline{U_{П}}$$

Передаточна функція регулювального органу:

$$W_{РО}(p) = \frac{\overline{U_{РО}}}{\overline{U_{П}}} = k_{РО}$$

Рівняння підсилювача:

$$U_{П} = k_{П} \cdot \varepsilon$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

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

Передаточна функція підсилювача:

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

Рівняння елемента порівняння:

$$\varepsilon = U_{ВХ} - U_{ВИХ}$$

При переході від оригіналу до зображення за Лапласом:

$$\overline{\varepsilon} = \overline{U_{ВХ}} - \overline{U_{ВИХ}}$$

Структурна схема САР наведена на рис. 4.11 (МР-151.21.0102.07.00.Е1).

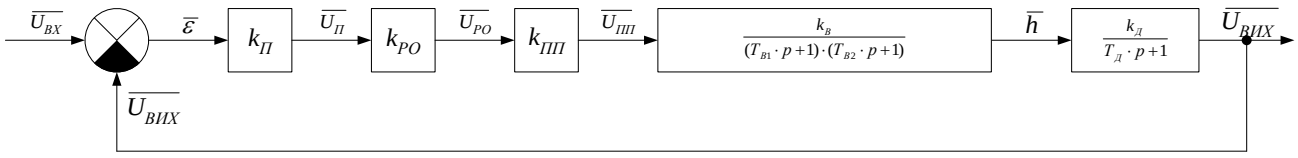


Рисунок 4.11 – Структурна схема системи автоматичного регулювання

При послідовному з'єднанні елементів системи передаточна функція системи дорівнює добутку передаточних функцій всіх її елементів (МР-151.21.0102.07.01.Е1).

$$W_{Р}(p) = W_{П}(p) \cdot W_{РО}(p) \cdot W_{ПП}(p) \cdot W_{В}(p) \cdot W_{Д}(p) == \frac{k_{П} \cdot k_{РО} \cdot k_{ПП} \cdot k_{В} \cdot k_{Д}}{(T_{В1} \cdot p + 1) \cdot (T_{В2} \cdot p + 1) \cdot (T_{Д} \cdot p + 1)}$$

Введемо позначення:

$$K = k_{П} \cdot k_{РО} \cdot k_{ПП} \cdot k_{В} \cdot k_{Д}$$

Звідси передаточну функцію розімкнутої системи можна записати:

$$W_P(p) = \frac{K}{(T_{B1} \cdot p + 1) \cdot (T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1)}$$

Передаточна функція замкнутої системи, при $W_{ЗЗ}(p) = 1$:

$$W_З(p) = \frac{W_P(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_{ЗЗ}(p)} = \frac{W_P(p)}{1 + W_P(p)} = \frac{K}{(T_{B1} \cdot p + 1) \cdot (T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1) + K}$$

Характеристичне рівняння:

$$(T_{B1} \cdot p + 1) \cdot (T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1) + K = 0$$

Розкриємо дужки:

$$(T_{B1} p \cdot T_{B2} p + T_{B1} p + T_{B2} p + 1) \cdot (T_Д p + 1) + K = 0$$

$$T_{B1} p \cdot T_{B2} p \cdot T_Д p + T_{B1} p \cdot T_{B2} p + T_{B1} p \cdot T_Д p + T_{B1} p + T_{B2} p \cdot T_Д p + T_{B2} p + T_Д p + 1 + K = 0$$

$$(T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_Д) \cdot p^3 + (T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_Д + T_{B2} \cdot T_Д) \cdot p^2 + (T_{B1} + T_{B2} + T_Д) \cdot p + 1 + K = 0$$

АФЧХ – це крива описана кінцем вектора передаточної функції W(jω) на комплексній площині при зміні частоти від 0 до +∞ [10].

Для побудови АФЧХ необхідно:

- ввести діапазон зміни частоти ω від 0 до 100;

- ввести значення комплексного коефіцієнта $j = \sqrt{-1}$;

- ввести значення оператора Лапласа p(ω) = j · ω;

- ввести вираз передаточної функції;

- виділити дійсну і уявну частини передаточної функції, підставивши замість оператора Лапласа p вираз j · ω.

$$W_P(j\omega) = \frac{K}{(T_{B1} \cdot j\omega + 1) \cdot (T_{B2} \cdot j\omega + 1) \cdot (T_Д \cdot j\omega + 1)} =$$

$$= \frac{K}{-T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_Д \cdot j\omega^3 - (T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_Д + T_{B2} \cdot T_Д) \cdot \omega^2 + (T_{B1} + T_{B2} + T_Д) \cdot j\omega + 1} =$$

$$= \frac{K}{(T_{B1} + T_{B2} + T_Д - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_Д \cdot \omega^2) \cdot j\omega - ((T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_Д + T_{B2} \cdot T_Д) \cdot \omega^2 - 1)} =$$

$$= -\frac{K \cdot \left[(T_{B1} + T_{B2} + T_Д - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_Д \cdot \omega^2) \cdot j\omega + ((T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_Д + T_{B2} \cdot T_Д) \cdot \omega^2 - 1)\right]}{(T_{B1} + T_{B2} + T_Д - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_Д \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_Д + T_{B2} \cdot T_Д) \cdot \omega^2 - 1)^2}$$

Дійсна частина:

$$P(\omega) = -\frac{K \cdot \left[(T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_{Д} + T_{B2} \cdot T_{Д}) \cdot \omega^2 - 1\right]}{(T_{B1} + T_{B2} + T_{Д} - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_{Д} \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_{Д} + T_{B2} \cdot T_{Д}) \cdot \omega^2 - 1)^2} =$$

$$= -\frac{16{,}875 \cdot \left[(0{,}5 \cdot 0{,}022 + 0{,}5 \cdot 0{,}02 + 0{,}022 \cdot 0{,}02) \cdot \omega^2 - 1\right]}{(0{,}5 + 0{,}022 + 0{,}02 - 0{,}5 \cdot 0{,}022 \cdot 0{,}02 \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((0{,}5 \cdot 0{,}022 + 0{,}5 \cdot 0{,}02 + 0{,}022 \cdot 0{,}02) \cdot \omega^2 - 1)^2}$$

Уявна частина:

$$Q(\omega) = -\frac{K \cdot \left[(T_{B1} + T_{B2} + T_{Д} - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_{Д} \cdot \omega^2) \cdot \omega\right]}{(T_{B1} + T_{B2} + T_{Д} - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_{Д} \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_{Д} + T_{B2} \cdot T_{Д}) \cdot \omega^2 - 1)^2} =$$

$$= -\frac{16{,}875 \cdot \left[(0{,}5 + 0{,}022 + 0{,}02 - 0{,}5 \cdot 0{,}022 \cdot 0{,}02 \cdot \omega^2) \cdot \omega\right]}{(0{,}5 + 0{,}022 + 0{,}02 - 0{,}5 \cdot 0{,}022 \cdot 0{,}02 \cdot \omega^2)^2 \cdot \omega^2 + ((0{,}5 \cdot 0{,}022 + 0{,}5 \cdot 0{,}02 + 0{,}022 \cdot 0{,}02) \cdot \omega^2 - 1)^2}$$

Для побудови АФЧХ використовуються значення P(ω) та Q(ω) наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення P(ω) та Q(ω) для побудови АФЧХ

ω, c^{-1}	0,01	0,1	1	5	10	30	50	100	200	∞
P(ω)	16,9	16,8	13,2	1,06	-0,68	-0,7	-0,32	-0,05	-0,004	0
Q(ω)	-0,09	-0,91	-7,3	-6,1	-3,1	-0,4	0,002	0,04	0,008	0

АФЧХ розімкнутої системи наведена на рис. 4.12.

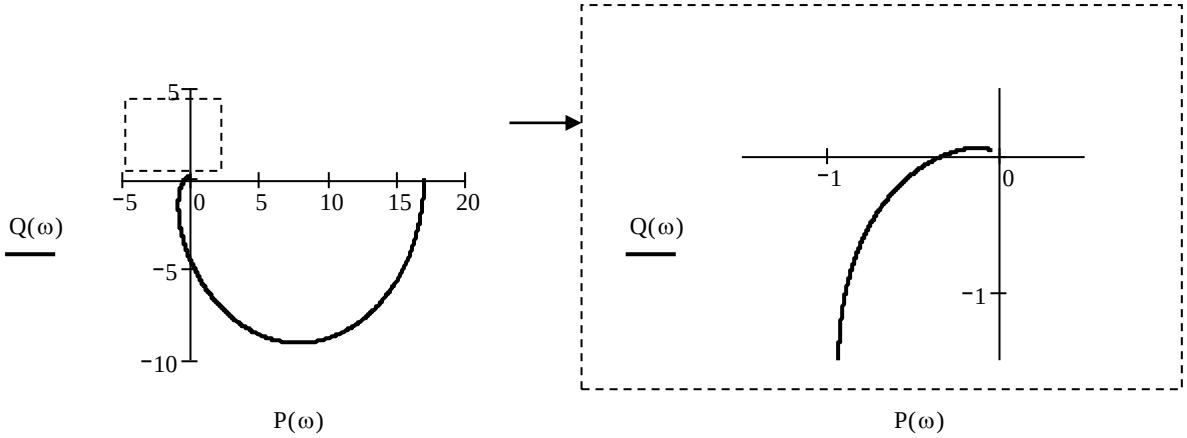


Рисунок 4.12 – АФЧХ розімкнутої системи

Побудову ЛАЧХ розпочинають з області низьких частот [9]. Так як система, що розглядається не містить інтегруючу ланку побудову починають під нахилом 0дБ/дек. Ця пряма має ординату рівну 20·lg K = 16,875дБ. На області середніх і високих частот нахил змінюється порівняно з попереднім значенням на -20дБ/дек.

Спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок визначаються:

$$\omega_{B1} = \frac{1}{T_{B1}} = \frac{1}{0{,}5} = 2\,\text{с}^{-1};$$

$$\omega_{B2} = \frac{1}{T_{B2}} = \frac{1}{0{,}022} = 45{,}455\,\text{с}^{-1};$$

$$\omega_{Д} = \frac{1}{T_{Д}} = \frac{1}{0{,}02} = 50\ \text{с}^{-1};$$

Частоти ω_{B1}, ω_{B2}, $\omega_{Д}$ – частоти аперіодичних ланок.

ЛАЧХ розімкнутої системи наведено на рис. 4.13.

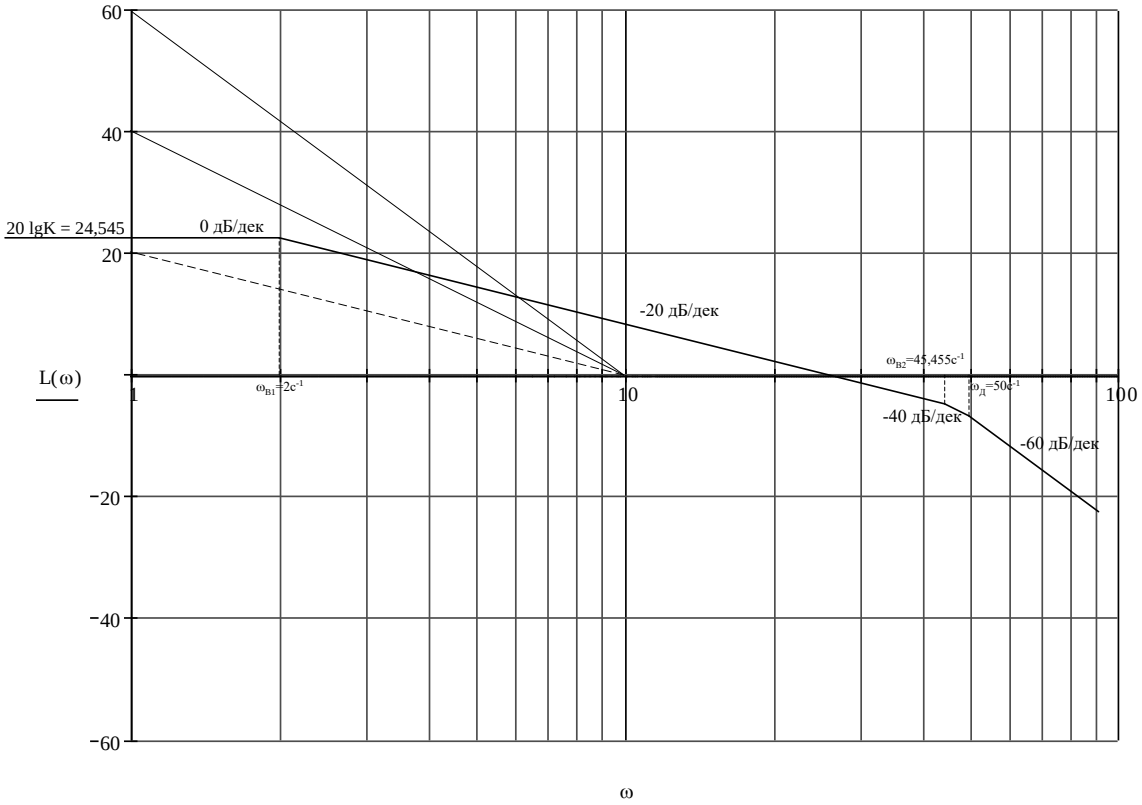


Рисунок 4.13 – ЛАЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ розімкнутої системи отримується в результаті складання ординат фазових характеристик динамічних ланок:

$$\varphi(\omega) = (-arctg(\omega \cdot T_{B1}) - arctg(\omega \cdot T_{B2}) - arctg(\omega \cdot T_{Д})) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Для побудови ЛФЧХ використовується значення φ(ω) наведені в табл. 4.4 [19].

Таблиця 4.4 – Значення φ(ω) для побудови ЛФЧХ

ω, $с^{-1}$	0,01	0,1	0,5	1	2	5	10	20	50	100
φ(ω)	-0,03	-3,1	-15,2	-21,1	-29	-80	-102	-130	-180	-218

ЛФЧХ розімкнутої системи наведено на рис. 4.14.

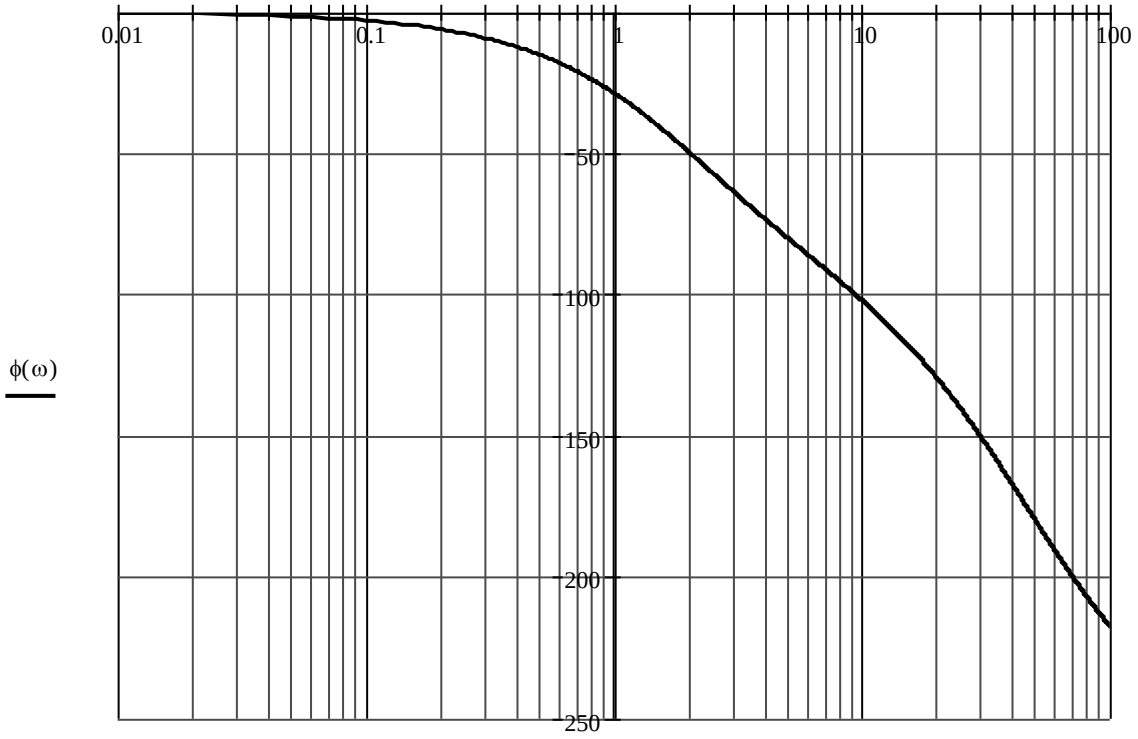


Рисунок 4.14 – ЛФЧХ розімкнутої системи

4.5 Дослідження системи на стійкість

Всі корені характеристичного рівняння $(T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_{Д}) \cdot p^3 + (T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_{Д} + T_{B2} \cdot T_{Д}) \cdot p^2 + (T_{B1} + T_{B2} + T_{Д}) \cdot p + 1 + K = 0$ матимуть від'ємні частини, якщо при додатному знаку всіх коефіцієнтів будуть додатними головний визначник Гурвіца $\Delta_Г > 0$ і його діагональні мінори будуть більше 0 [9].

Правила знаходження визначника Гурвіца:

1 По головній діагоналі записують коефіцієнти характеристичного рівняння від a_1 до $a_{п-1}$;

2 Місця зверху від діагоналі заповнюють коефіцієнтами з більшими індексами, а знизу від діагоналі – з меншими індексами;

3 При відсутності відповідного коефіцієнта записують 0.

$$0{,}00022 \cdot p^3 + 0{,}021 \cdot p^2 + 0{,}542 \cdot p + 17{,}875 = 0$$

$$\Delta_Г = \begin{pmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 0{,}021 & 17{,}875 \\ 0{,}00022 & 0{,}542 \end{vmatrix} = 0{,}007688$$

Так як визначник Гурвіца і коефіцієнти з яких він складений додатні, то система за критерієм стійкості Гурвіца стійка.

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

Даний критерій дозволяє судити про стійкість замкнутої системи по АФЧХ стійкої розімкнутої системи [9]. Для того щоб замкнута система автоматичного регулювання була стійкою необхідно і достатньо, щоб АФЧХ розімкнутої системи не охоплювала на комплексній площині точку з координатами (-1;j·0).

Дійсний запас стійкості по модулю визначається по відрізку між точкою з координатами (-1;j·0) і точкою перетину горизонтальної осі і характеристикою $W_P(j\omega)$.

Запас стійкості по фазі визначається як різниця між кутом π і максимально допустимим кутом обертання вектора, при якому зберігається запас стійкості по модулю. Він визначається положенням вектора в точці перетину характеристики $W_P(j\omega)$ з колом одиничного вектора.

Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова наведено на рис. 4.15.

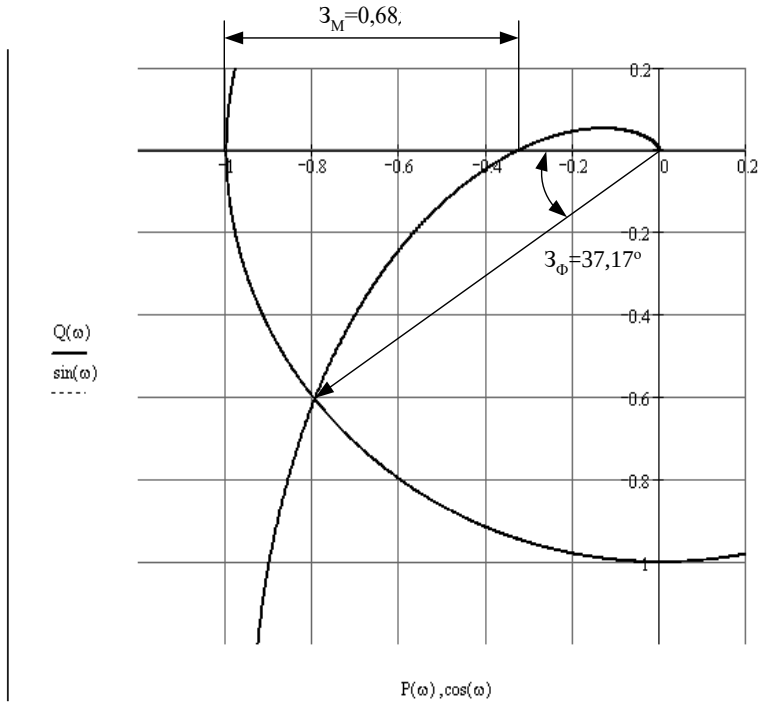


Рисунок 4.15 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

За даним критерієм система стійка. Запас стійкості по модулю $З_М$ = 0,68. Запас стійкості по фазі $З_Ф$ = 37,17°.

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

Будується межа стійкості в комплексній площині параметра $k_П$. З характеристичного рівняння визначається коефіцієнт $k_П$:

$$(T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1) + k_П \cdot k_{PO} \cdot k_{ПП} \cdot k_B \cdot k_Д = 0$$

$$K_П(p) = -\frac{(T_{B1} \cdot p + 1) \cdot (T_{B2} \cdot p + 1) \cdot (T_Д \cdot p + 1)}{k_{PO} \cdot k_{ПП} \cdot k_B \cdot k_Д}$$

Потрібно виділити дійсну і уявну частини виразу, підставивши замість оператора Лапласа p вираз $j \cdot \omega$:

$$K_П(\omega) = -\frac{(T_{B1} \cdot j\omega + 1) \cdot (T_{B2} \cdot j\omega + 1) \cdot (T_Д \cdot j\omega + 1)}{k_{PO} \cdot k_{ПП} \cdot k_B \cdot k_Д} =$$

$$= -\frac{(T_{B1} + T_{B2} + T_Д - T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_Д \cdot \omega^2) \cdot j\omega - ((T_{B1} \cdot T_{B2} + T_{B1} \cdot T_Д + T_{B2} \cdot T_Д) \cdot \omega^2 - 1)}{k_{PO} \cdot k_{ПП} \cdot k_B \cdot k_Д}$$

Дійсна частина:

$$P(\omega)=\frac{(T_{B1}\cdot T_{B2}+T_{B1}\cdot T_{Д}+T_{B2}\cdot T_{Д})\cdot\omega^2-1}{k_{PO}\cdot k_{ПП}\cdot k_{B}\cdot k_{Д}}=\frac{(0{,}5\cdot 0{,}022+0{,}5\cdot 0{,}02+0{,}022\cdot 0{,}02)\cdot\omega^2-1}{0{,}25\cdot 3\cdot 22{,}5\cdot 0{,}5}$$

Уявна частина:

$$Q(\omega)=-\frac{(T_{B1}+T_{B2}+T_{Д}-T_{B1}\cdot T_{B2}\cdot T_{Д}\cdot\omega^2)\cdot\omega}{k_{PO}\cdot k_{ПП}\cdot k_{B}\cdot k_{Д}}=\frac{(0{,}5+0{,}022+0{,}02-0{,}5\cdot 0{,}022\cdot 0{,}02\cdot\omega^2)\cdot\omega}{0{,}25\cdot 3\cdot 22{,}5\cdot 0{,}5}$$

Для побудови D-розбиття використовуються значення P(ω) та Q(ω) наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Значення P(ω) та Q(ω) для побудови D-розбиття

ω, c^{-1}	-50	-30	-10	-1	1	10	30	50
P(ω)	6,2	2,2	0,14	-0,12	0,12	-0,14	-2,2	-6,2
Q(ω)	-0,05	1,2	0,6	0,06	-0,06	-0,6	-1,2	-0,05

D-розбиття в площині параметру $k_П$ наведено на рис. 4.16.

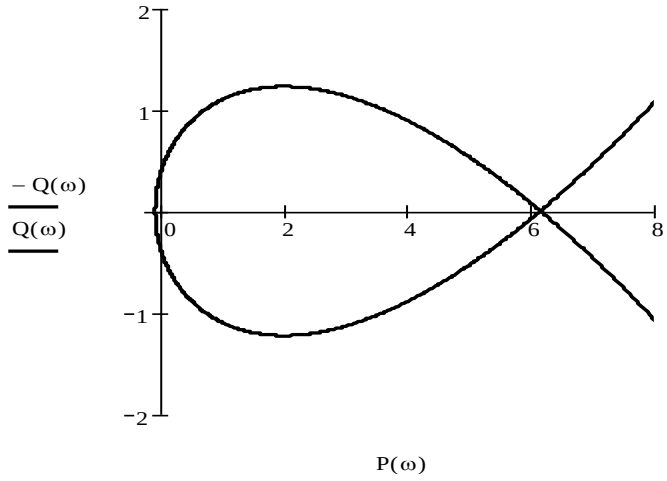


Рисунок 4.16 – D-розбиття в площині параметру $k_П$

Ділянка стійкості буде ліворуч від кривої D-розбиття, якщо рухатись по ній від –∞ до +∞ [10]. Критичне значення параметру $k_П$ дорівнює: $k_{Пкр}$ =6,23. Значення, що задане умовою $k_П$ = 2 входить в зону стійкості.

4.6 Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання по логарифмічній амплітудній частотній характеристиці розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої системи автоматичного регулювання полягає у визначенні запасу стійкості по модулю і по фазі наведена на рис. 4.17 (МР-151.21.0102.07.02.ТК).

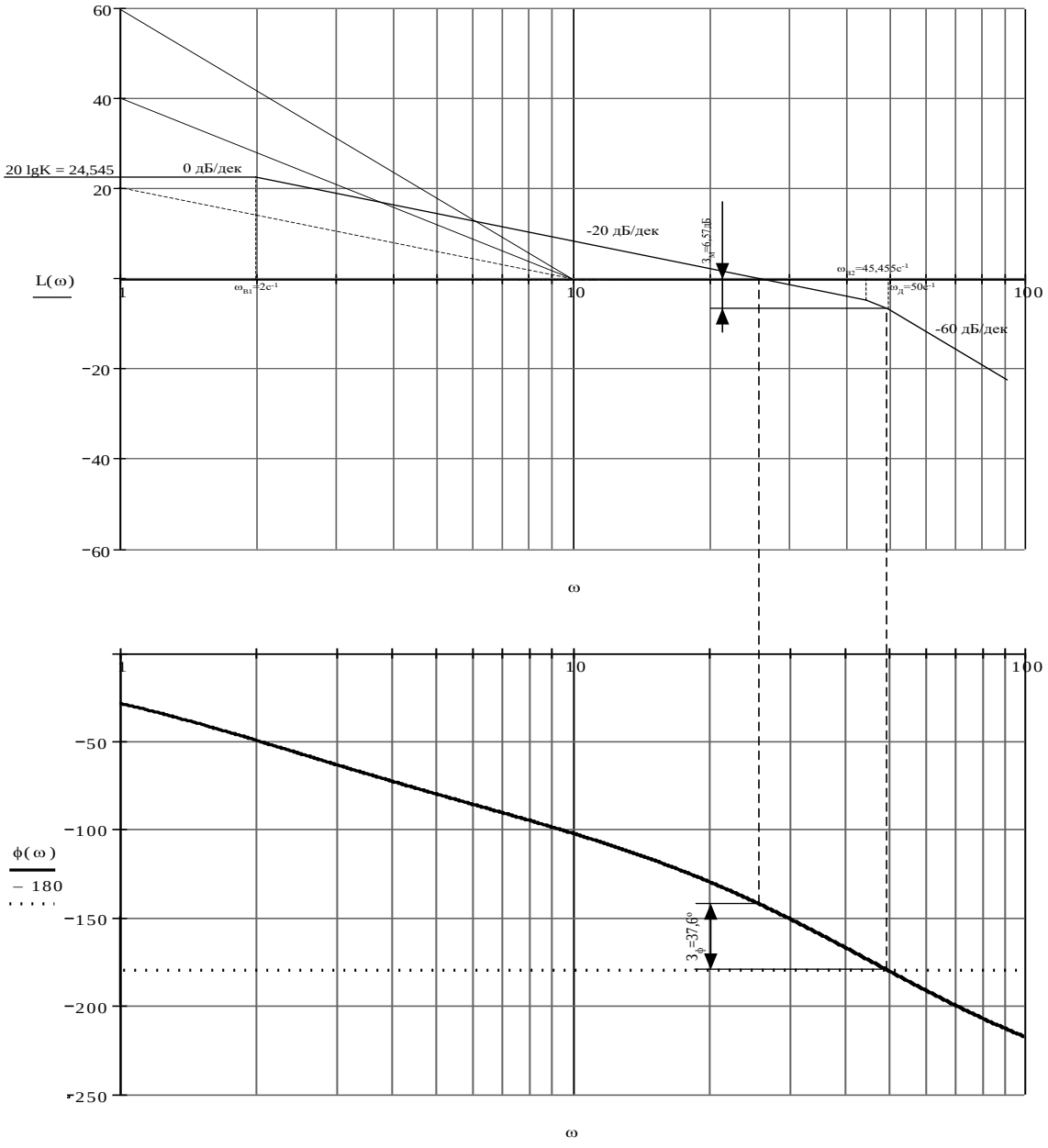


Рисунок 4.17 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

З рис. 4.17 визначаються запаси стійкості. Запас стійкості по модулю $З_М$ = 6,57дБ. Запас стійкості по фазі $З_Ф$ = 37,6°.

Перехідний процес – функція, що визначає зміну величини на виході при стрибкоподібній зміні вхідної величини на одиницю і при нульових початкових умовах (МР-151.21.0102.067.03.ТК).

Перехідний процес САР (рис. 4.18) описується залежністю [10]:

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

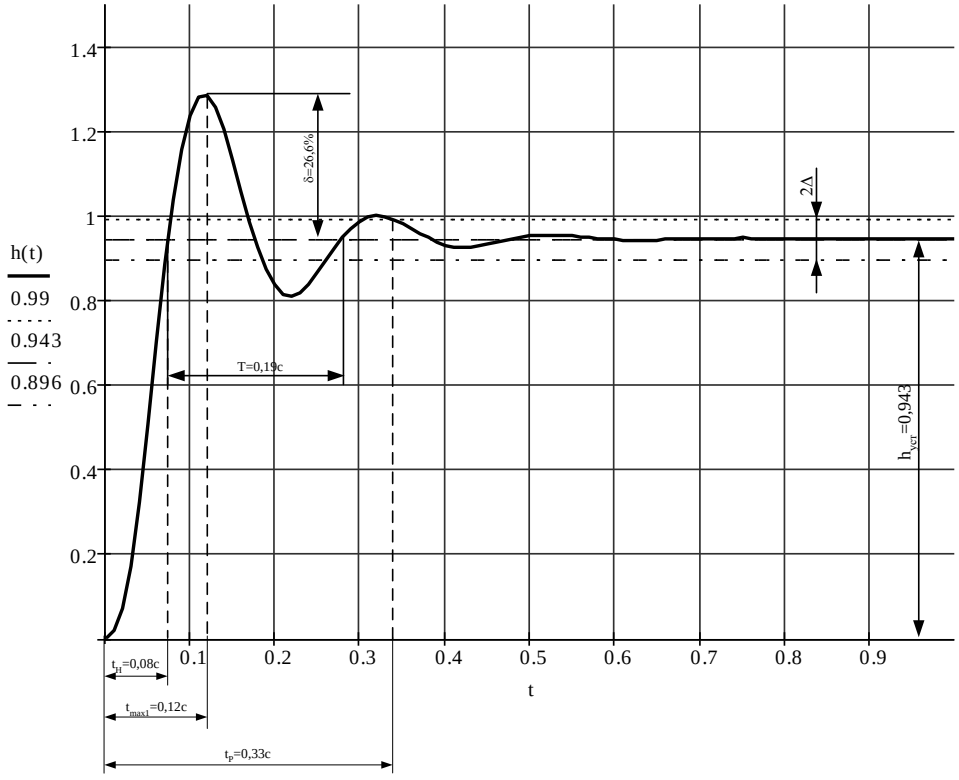


Рисунок 4.18 – Перехідний процес САР

Для побудови перехідного процесу використовуються значення t та h(t) наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Значення перехідної функції h(t)

t, c	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	2
h(t)	0	1,28	0,76	1	0,9	0,94	0,93

Перехідний процес показаний на рисунку 4.18 коливальним. Можна визначити такі показники якості САР:

- час регулювання $t_Р$ = 0,33 с;
- час наростання перехідного процесу $t_Н$ = 0,08с;
- перерегулювання δ = 26,6%;
- період коливань Т = 0,19с;
- частота коливань $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 33{,}05\,\text{с}^{-1}$;
- кількість коливань перехідного процесу n = 2;
- час досягнення першого максимуму t_{max1} = 0,12с;
- декремент затухання d = 5,9.

4.7 Синтез коректуючого пристрою системи

Одним з найефективнішим інженерних методів синтезу систем автоматичного регулювання є метод, в основу якого покладено використання ЛАЧХ розімкнутої системи. Ідея методу ґрунтується в тому, що для стійких мінімально-фазових систем існує однозначний зв'язок між перехідним процесом замкнутої системи і ЛАЧХ розімкнутої системи. Виходячи з бажаного вигляду перехідного процесу, будують ЛАЧХ, яка відповідає такому процесу (бажана ЛАЧХ). Знаючи вигляд бажаної ЛАЧХ, до неї наближують ЛАЧХ вихідної системи, запроваджуючи різні корегуючі пристрої [10].

Бажану ЛАЧХ умовно поділяють на три частини: низькочастотну, середньочастотну і високочастотну.

До низькочастотної частини ЛАЧХ належить ділянка характеристики, нахил якої не змінюється при ω→ 0. Вона проходить через точку з координатами *20·lg K*, де К – коефіцієнт передачі розімкнутої системи, і має нахил 0дБ/дек для систем, в яких немає інтегруючої ланки, –20дБ/дек для систем, в яких одна інтегруюча ланка.

До середньочастотної частини належить ділянка ЛАЧХ з однаковим нахилом, що проходить через частоту зрізу. Ця частина ЛАЧХ є найважливішою,

бо вона визначає якість перехідних процесів. Основними параметрами, які характеризують середньочастотну частину, є її нахил і частота зрізу. Частота зрізу $\omega_З$ визначає швидкодію САР. Швидкодія зростає при збільшенні частоти зрізу.

Високочастотна частина ЛАЧХ знаходиться в зоні від'ємних децибелів, тому майже не позначається на якості перехідного процесу.

Бажану ЛАЧХ будуємо у такій послідовності:

- вибирають частоту зрізу, виходячи з умови

$$\omega_{З\min} \le \omega_З \le \omega_{Зопт},$$

де $\omega_{З\min}$ – мінімальне значення, при якому час регулювання не перевищує заданий;

$\omega_{Зопт}$ – значення частоти зрізу, яке визначається за максимальним прискоренням координати і величиною керуючого ступінчастого сигналу.

Значення $\omega_{З\min}$ визначають за допомогою номограми $\omega_{З\min} = \frac{3\pi}{t_P}$ [9].

Час регулювання за умовами системи повинен бути зменшеним на 25%, тому:

$$0{,}33 \cdot 0{,}75 = 0{,}25\,\text{с},$$

$$\omega_{З\min} = \frac{3\pi}{t_P} = \frac{3\pi}{0{,}25} = 37{,}68 c^{-1}.$$

Так як прискорення не задане беремо дещо збільшене значення $\omega_З = 38 с^{-1}$;

- після визначення частоти зрізу будуємо середньочастотну асимптоту бажаної ЛАЧХ, яка проходить через частоту зрізу з нахилом –20дБ/дек;

- для забезпечення необхідного запасу стійкості по амплітуді і фазі треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на 15дБ, ці значення знаходяться по номограмі;

- при сполученні середньочастотної частини ЛАЧХ з низькочастотною та високочастотною слід прагнути до того, щоб бажана ЛАЧХ якомога менше відрізнялась від ЛАЧХ вихідної САР. Це спрощує корекцію.

Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ коректуючого пристрою наведена на рис. 4.19 (МР-151.21.0102.08.01.ТК).

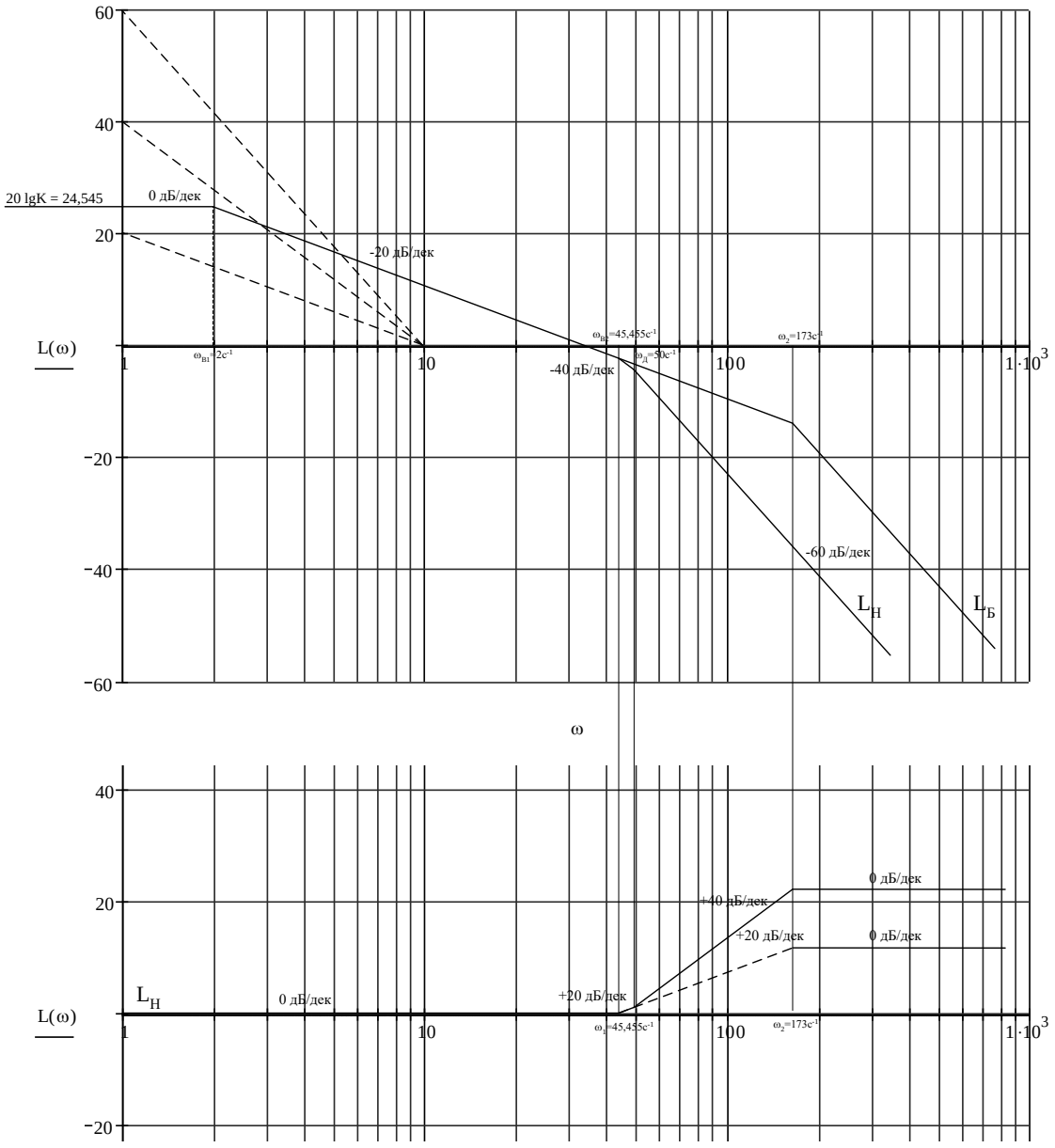


Рисунок 4.19 – Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ коректуючого пристрою

Дещо спростимо коректуючий пристрій. Коефіцієнт підсилення коректуючого пристрою $k_k = 1$.

Схема коректуючого пристрою приведена на рисунку 4.20.

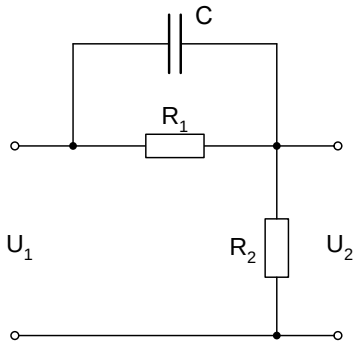


Рисунок 4.20 – Схема коректуючого пристрою

Передаточна функція коректуючого пристрою має вигляд:

$$W_{КП}(p) = \frac{k_k \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{(T_2 \cdot p + 1)},$$

де $k_k = \frac{R_2}{R_2 + R_1}$

$T_1 = R_1 \cdot C$

$T_2 = k_k \cdot T_1 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot C}{R_1 + R_2}$

Визначимо сталі часу T_1 та T_2 через спрягаючі частоти зрізу ω_1 та ω_2 з ЛАЧХ коректуючого пристрою:

$$\omega_1 = 45{,}455\,\text{с}^{-1};\ T_1 = \frac{1}{\omega_1} = 0{,}02\,\text{с};\ \omega_2 = 173\,\text{с}^{-1};\ T_2 = \frac{1}{\omega_2} = 0{,}005\,\text{с};\ k = \frac{T_2}{T_1} = \frac{0{,}005}{0{,}02} = 0{,}25$$

Вибрана коректуюча ланка є пасивним чотириполюсником, з коефіцієнтом передачі k=0,25.

Передаточну функцію корегуючого пристрою можна записати:

$$W_{КП}(p) = \frac{(0{,}02 \cdot p + 1)}{(0{,}005 \cdot p + 1)}$$

Приймаємо С = $2 \cdot 10^{-6}$ Ф, тоді можна визначити параметри R_1 та R_2:

$$R_1 = \frac{T_1}{C} = \frac{0{,}02}{2 \cdot 10^{-6}} = 1000\ \text{Ом} = 1\text{кОм}$$

$$R_2 = \frac{k \cdot R_1}{1 - k} = \frac{0{,}25 \cdot 1000}{1 - 0{,}25} = 333{,}3\ \text{Ом}$$

Приймаємо опори з номіналами R_1 = 1кОм та R_2 = 330Ом.

4.8 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої системи

Крива перехідного процесу системи, скорегованої методом синтезу наведена на рис. 4.21 (МР-151.21.0102.08.02.ТК).

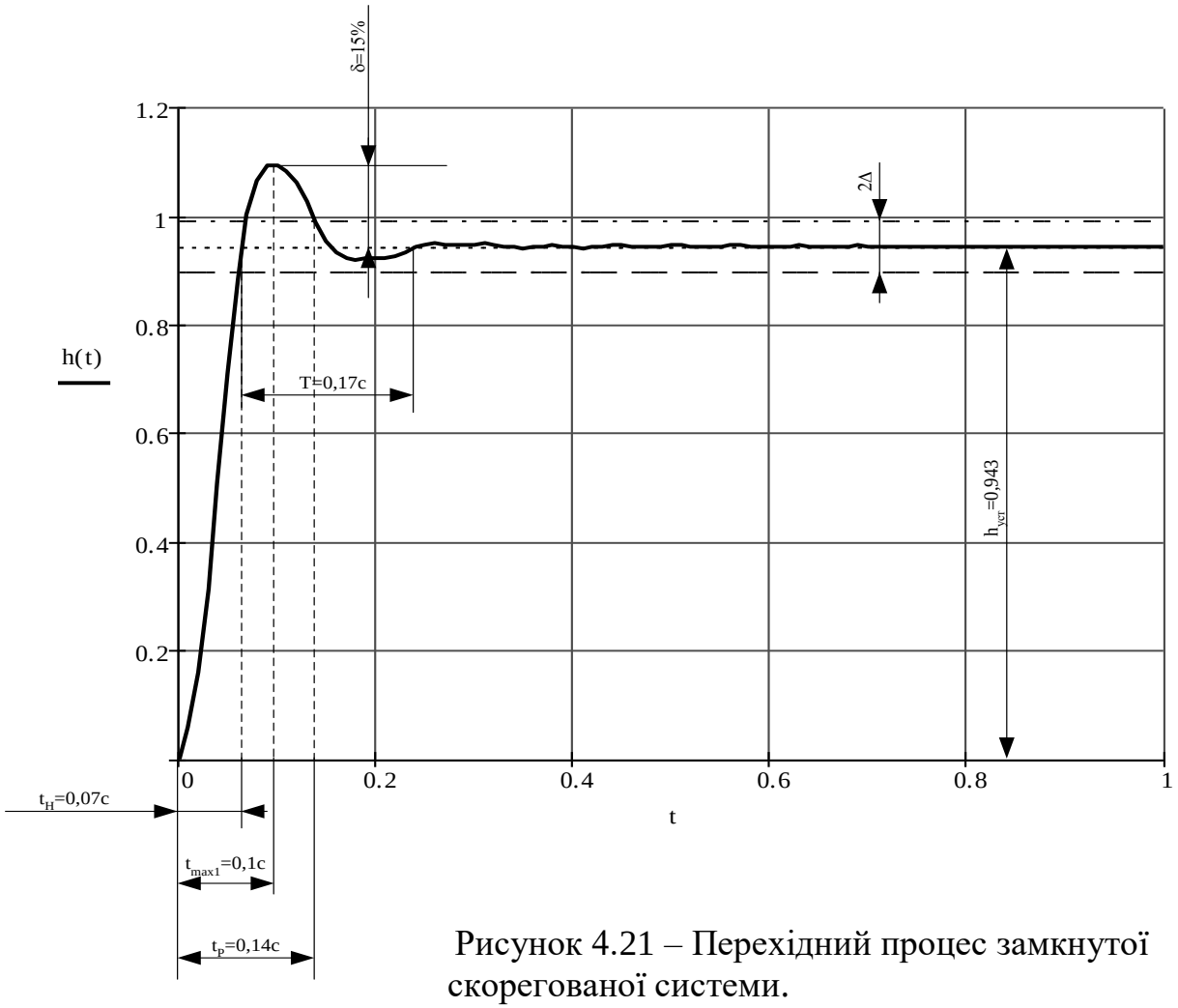


Рисунок 4.21 – Перехідний процес замкнутої скорегованої системи.

Можна визначити такі показники якості синтезованого САР:

- час регулювання $t_Р$ = 0,14с;
- час наростання перехідного процесу $t_Н$ = 0,07с;
- перерегулювання δ = 15%.
- період коливань Т = 0,17с;
- частота коливань $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 36{,}9\ \text{с}^{-1}$;
- кількість коливань перехідного процесу n = 1;
- час досягнення першого максимуму t_{max1} = 0,1с.

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

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

- температура навколишнього середовища від 15 до 35^0С;
- відносна вологість повітря від 45 до 80%;
- атмосферний тиск від 84,0 до 106,7кПа.

Поблизу установку не повинно бути джерел вібрації і інтенсивного пилоутворення. Запилення повітря робочої зони не повинно перевищувати 6мг/$м^3$. Для забезпечення нормальної роботи установки необхідно проводити своєчасні профілактичні роботи по усуненню пилу із пристроїв програмного управління і механізмів вакуумної системи. В залежності від запиленості повітря робочої зони профілактичні роботи повинні проходитись з періодичністю не рідше одного разу на місяць, в залежності від концентрації пилу [4].

Вологе повітря, пил та бруд понижують опір ізоляції, порушуючи нормальний режим роботи приладів. Наявність в повітрі агресивних газів викликає окислення контактуючих поверхонь. Важливою завадою в роботі приладів є наявність сильних магнітних полів в місцях встановлення датчиків та вторинних пристроїв, а також в місцях прокладки з'єднувальних ліній від датчика до вторинного приладу.

Якщо в приміщенні повітря підвищеної вологості і вміщує багато пилу, то потрібно добре підігнати ущільнюючі прокладки та заглушити.

Потрібно також приділити увагу заземленню приладів, так як при поганій якості заземлення можуть з'явитися додаткові помилки в показах вторинних приладів. Не рекомендується використовувати в якості заземлення водопровідну та опалювальну системами. Розрахунок захисного заземлення приведений в розділі охорони праці.

Загальна лінія, від якої живляться силові електричні пристрої, знаходиться під впливом значних коливань напруги внаслідок змін навантаження. Поряд з цим в такій лінії мають місце перешкоди, викликані струмами високої частоти, що виникають при появі дугових розрядів в силових агрегатах. Тому напругу живлення до пристроїв бажано подавати від спеціальних КВП-ліній. Підключення приладів до мережі в ряді випадків проводиться через розподільчі трансформатори. Один кінець вторинної обмотки розподільчого трансформатора повинен бути заземлений, з метою усунення наводок промислової частоти на вихідні ланцюги електронного приладу. Ця обставина особливо важлива для приладів з високоомним входом і для приладів, вимірювальні схеми яких живляться від мережних стабілізованих джерел. Розподільчий трансформатор повинен мати достатній запас потужності. Перевантаження трансформатора викликає зменшення напруги вторинної обмотки, а також спотворення форми кривої струму. Підключення розподільчого трансформатора до мережі повинно виконуватись через двополюсний рубильник і плавкі запобіжники. Не допускається включення приладів в мережу через автотрансформатор, бо він не захищає від перешкод, а у випадку застосування понижуючого автотрансформатора обривання його обмотки призводить до подачі повної напруги мережі на прилад.

Підведення напруги до установки виконується дротом з прорезиненою водонепроникною ізоляцією. Діаметр дротів повинен бути не менше $1мм^2$. З метою запобігання механічного пошкодження дротів рекомендується прокладати їх в гнучких металевих шлангах або трубах, які повинні бути надійно заземлені. Вводи дротів до шафи герметизуються за допомогою спеціальних ущільнюючих втулок. Потрібно уникати нарощування дротів, а в разі нарощування, місця стиків необхідно обов’язково пропаяти. Після завершення прокладки дротів необхідно провести перевірку опору ізоляції по відношенню до землі, він повинен бути не менше 10МОм. Вимоги, що ставляться до дротів, які з’єднують

датчики із вторинним приладом, залежать від типу датчиків та приладу. Загальною вимогою до більшості приладів є прокладення дротів від датчика до приладу в сталевих захисних трубках, обов'язково окремо від дротів мережі.

При виконанні технічних оглядів, профілактичних робіт, пов'язаних з зняттям кожухів, кришок, за якими розташовуються рухомі елементи, установка повинен бути відключений від мережі перемикачем вводу. Не дозволяється працювати на станку з знятими кришками клемних коробок електроапаратури.

Установка повинна бути ізольований від прямої дії теплового випромінювання. В приміщеннях, де встановлена установка не повинні працювати зварювальні апарати і інші джерела сильних електромагнітних полів.

Зварювальні апарати і механізми, які мають електродвигуни з великими пусковими точками, не повинні підключатися до електромережі, яка використовується для живлення установок синтезу органічних тонкоплівкових структур.

До місця призначення установка транспортується упакована в ящик або без упаковки з частковим захистом окремих легкопошкоджуємих місць і вузлів вологозахисним матеріалом.

При транспортуванні автотранспортом зі установки демонтуються і упаковуються окремо: вакуумна система, багатозонна піч, ЕОМ, окремо підключаємі датчики. Установка в транспортній тарі може зберігатися в приміщенні без опалення. Допускається короткочасне знаходження на відкритій площі в транспортній тарі. Зберігання установки на відкритій площі забороняється.

Всі частини системи повинні зберігатись в сухому закритому приміщені при температурі від 5 до 40 градусів з відносною вологістю не більше 80%. В приміщенні не повинно бути пилу, газів і парів, які викликають забруднення і корозію підчас зберігання. Не дозволяється збереження установки перевищуючи строк зберігання захисту без переконсервування.

При транспортуванні установку без упаковки гарантійний строк без переконсервування не більше ніж п’ять днів, тільки на час транспортування. Після переконсервування установка повинен зберігатись в сухому закритому приміщенні.

При розпакуванні слідує стежити за тим, щоб не пошкодити деталі установки розпаковувальним інструментом, перевірити комплекс установки і наявність постачаємих елементів по пакувальному листу.

При транспортуванні розпакованої установки необхідно слідкувати за збереженням покраски установку від пошкодження її стопором і за збереженням окремих виступаючих частин. При транспортуванні до місця встановлення установка не повинна піддаватися сильним поштовхам.

Для досягнення спокійної і точної роботи установка повинна встановлюватися на рівний фундамент.

Установка на фундаменті встановлюється на чотирьох виверних гвинтах чи стальних клинах. Фундаментні гвинти і кришка для покриття виготовляються споживачем установки згідно схеми встановлення.

Точність роботи установки залежить від правильності її встановлення. Точність встановлення як в повздовжньому, так і в поперечному напрямку визначається рівнем.

Відхилення не повинно перевищувати 0,04/1000 в обох напрямках.

Підключити установку до електромережі, перевіривши відповідність напруги мережі і електрообладнання установки. Перед включенням напруги яка живить мережу всі перемикачі, які мають фіксоване положення “0”, повинні бути встановлені в це положення.

До обслуговування установки синтезу органічних тонкоплівкових структур допускається персонал, атестований комісією на право ведення робіт на устаткуванні з напругою до 1000В, що має кваліфіковану групу не нижче II по ПІТ РМ-016-2001, РД 153-34.0-03.150-00, що пройшов інструктаж з безпечної експлуатації системи і має доступ, до робіт з вакуумним устаткуванням.

Перевірку неушкодженості блоків необхідно проводити перед монтажем, під час профілактичного ремонту та при виявленні пошкоджень під час роботи приладу. Перевірці підлягають: основна похибка показань вторинного приладу, основна похибка запису, варіація та поріг чутливості приладу, робота механізму установки робочого струму, сигналізація “обривання в ланцюзі приладу”, час проходження стрілкою всієї шкали, рівень перешкод на вході електронного підсилювача, ступінь нагріву деталей при тривалій роботі приладу. Перевірка приладів повинна проводитись при таких умовах: температура навколишнього повітря $20 \pm 5^{o}C$, напруга живлення не повинна відрізнятись від номінальної більш ніж на $\pm 3\%$, частота струму живлення $50 \pm 0{,}5$Гц, при відсутності сторонніх магнітних полів.

При умовах правильної експлуатації автоматичні електронні прилади можуть працювати надійно та безперервно дуже довгий час. Під час експлуатації приладів необхідно стежити за тим, щоб умови, які вважають нормальними для роботи приладу збереглися під час всього строку служби. Не допускати коливання напруги живлення мережі вище допустимих границь.

При підвищенні температури понад 35°С, необхідно збільшити вентиляцію приміщення. При холоді необхідно слідкувати за опаленням приміщення. В приміщеннях, запилених та із збільшеною вологістю, необхідно слідкувати за станом ущільнювачів, у випадку застосування хімічних сушників необхідно контролювати їх активність.

При експлуатації вторинних вимірювальних приладів необхідно слідкувати за їх чутливістю по коливаннях стрілки приладів при підході до встановленого показання. В процесі експлуатації необхідно систематично проводити огляд та планово-попереджувальний ремонт приладів. При огляді блоки знімаються із установки та відправляються в майстерню, де звільняються від пилу та бруду за допомогою ганчірки та продувкою повітрям. Проводиться огляд всієї електропроводки, перевіряється надійність затискувачів.

ВИСНОВКИ

Метою даної магістерської роботи була оптимізація процесів нанесення полімерних плівок.

Охарактеризовані принципи нанесення полімерних плівок та методика осадження тонких плівок у вакуумі: камера термічного вакуумного напилення та камера катодного розпилення. З аналізу основних методів встановлено, що найбільш ефективним для надвисокого вакууму є метод катодного розпилення який застосовується в установці електронно-променевого напилення.

Розглянуто і детально проаналізовано метод вимірювання товщини плівки кварцовим датчиком. Який забезпечує точність вимірювання до сьомого знаку з похибкою 2%.

Заміна старого контролеру товщини плівки на сучасний, більш продуктивний новий контролер на базі процесора ATmega103. Контролер ATmega103, має ряд суттєвих переваг, які дозволяють використовувати його у виробничо-промислових цілях. До цих переваг, перш за все, слід віднести створення контролера на базі сучасних мікросхем. Більшість з них мають невелику вартість, поєднану з гарною функціональністю. За умови складних економічних обставин, які склалися в галузі важкого машинобудування, така перевага є основною в процесі вибору контролера. Розроблена принципова електрична схема мікропроцесорної системи автоматичного регулювання, в склад якої входять такі мікросхеми: оперативно запам’ятовуючий пристрій К155РУ7, постійно запам’ятовуючий пристрій К541РТ1, порт вводу-виводу КР580ВВ79, дешифратор К155ИД1, буферний регістр КР580ИР82/83 і інші. Вихідний сигнал контролера регулює положення заслінки.

Проведено кореляційно-регресивний аналіз статистичних даних. Знайдено функціональний зв’язок між товщиною плівки і положенням заслінки. Обчислено рівняння регресії та визначено коефіцієнт кореляції. Істотність

функціонального зв’язку підтверджено за допомогою критеріїв Стьюдента та Фішера.

Розроблена структурна та функціональна схеми САР товщини плівки. Визначені та покращенні якісні показники стійкості системи за допомогою синтезу коректуючого пристрою.

По розділу охорони праці було розраховано заземлення електрообладнання, а саме була розрахована довжина горизонтального заземлювача та кількість вертикальних заземлювачів, також обумовлені експлуатаційні вимоги, які задовольняють законодавчу базу України з питань охорони праці.

Розрахунки економічних показників показали, що розроблювана в даній магістерській роботі система є економічно-ефективною як для виробника, так і для споживача, при тому, що ціна на нову систему не значно більша за ціну базової, що також вигідно для споживача.

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

AVR – сімейство восьмибітних мікроконтролерів Atmel;

CISC (Complex Instruction Set Computing) — концепція проектування процесорів;

CMOS (Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor) – комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник;

CPU(céntral prócessing únit) – центральний процесор

EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – електрично стираємий перепрограмуємий постійний запам’ятовуючий пристрій;

RISC (Reduced Instruction Set Computing) — обчислення із скороченим набором команд;

RTC (Real Time Clock) – Контролер реального часу;

SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс;

SRAM (Static Random Access Memory) – статична оперативна пам’ять з довільним доступом

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – Універсальний асинхронний приймач-передавач;

АЛП – арифметико-логічний пристрій;

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ВУП – вакуумний універсальний пост;

КВП – Конвертори вторинного перетворення;

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудна частотна характеристика;

ЛФЧХ – логарифмічна фазова частотна характеристика;

САР – Система автоматичного регулювання;

ТКЧ – температурний коефіцієнт частоти;

ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология тонких пленок. Справочник /Под ред. Л. Майселла, Р. Глэнга. Нью-Йорк. 1970. Пер. с англ. Под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. Т. 1, 2.М.:Сов.Радио, 1977, 664с.

2. Бондаренко Ю.Н. Методичні вказівки до економічного обґрунтування дипломних проектів. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 20с

3. Босов Є.П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 112с.

4. Вакуумная техника. Справочник. /Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др. Под общ. ред. Фролова Е. С., Минайчева В.Е. –М.: Машиностроение, 1992 – 480с.: ил.

5. Валетов В. А. Основы производства радиоэлектронной аппаратуры./ Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007-112с.

6. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005 – 592с.

7. Жидецький В. Ц., Джигерей В. С., Мельников О. В., Основи охорони праці. – Львів: Афіша, 2000. – 352с.

8. Законодавство України про охорону праці. Збірник нормативних документів у 4-х томах. – К.: Основа, 1995.

9. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. И доп. – М.: «Машиностроение», 1978. – 736с.

10. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319с.

11. Костржицкий А. И., Лебединский О. В. Многокомпонентные вакуумные покрытия.– М.: Машиностроение, 1987 – 208с.: ил.

12. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие для ВТУЗов. – М.: Высш. школа, 1988 – 239с.

13. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчёта и справочный материал). – М.: Машиностроение, 1977. – 455с.

14. Минайчев В.Е. Нанесение тонких пленок в вакууме – М.: Высшая школа. 1989 – 111с, ил.

15. Михалавский С. А., Гриценко А. К. Справочник по охране труда. – Минск: Баларусь, 1990. – 542с.

16. Основи наукових досліджень. Методичні вказівки до вивчення кореляційно-регресійного аналізу.Т.Ф. Шмельова, Р.В. Жесан, В.О. Зубенко – Кіровоград: КДТУ, 2003 – 46с.

17. Охрана труда в электроустановках /Под. ред. Б.А. Князевского. – М.:Энергоатомиздат, 1985. – 376с.

18 Пипко А. И. и др. Конструирование и расчет вакуумных систем. Пипко А. И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А.– 3-е изд. перераб. и доп.–М.: Энергия 1979 – 504с.:ил.

19. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин. ч.1. - Київ: “Вища школа”, 1993. – 320 с.

20. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме /А. И. Костржицкий, В. Ф. Карпов, М. П. Кабанченко и др.—М.: Машиностроение, 1991. — 176 с: ил.

21. Бикова О.В. Основи цивільного захисту: Навч. посіб. / О.В. Бикова О.В. Болієв, Д.М. Деревинський, В.Н. Єлісеєв, С.М. Миронець, С.І. Осипенко, Ю.О. Півень та ін. – К: 2008. – 223 с.

22. Васійчук В.О., Гончарук В.Є., Качан С.І., Мохняк С.М. Основи цивільного захисту: Навч. посіб. / Львів, 2010. – 384 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Законодавчі акти України з питань охорони праці

Після прийняття незалежності Україна одна з перших серед республік колишнього Союзу прийняла 14 жовтня 1992 року Закон України "Про охорону праці" [8]. Цим Законом було визначено основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, та врегульовано за участю відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи і організації або уповноваженим ним орган і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Додатково охорона праці визначається Законами України, а також законодавчими і нормативними актами [7]. До загальних Законів України, що визначають основні положення про охорону праці, належать:

- Конституція України;

- Закон України "Про охорону праці". Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних органів державної влади відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища.

- Закон України "Про охорону здоров'я". Регулює відносини у сфері охорони здоров'я і висвітлює питання щодо організації, управління процесами охорони здоров'я, створення безпечних умов життя, забезпечення медичного обслуговування необхідною організаційною базою та ліками, загальних умов

медичного втручання, охорони материнства та дитинства, регулювання виконання медичної експертизи. Закон також визначає медичну та фармацевтичну діяльність, професійні права та обов'язки медичних і фармацевтичних працівників.

- Закон України "Про пожежну безпеку". Цей Закон визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення пожежної безпеки на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі незалежно від виду їх діяльності та форм власності.

- Закон України "Про використання ядерної енергії та радіаційний захист". Закон є основоположним у ядерному законодавстві України. Він встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, встановлює також правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії.

- Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення". Закон регулює суспільні відносини, які виникають у сфері забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя, визначає відповідні права і обов'язки державних органів, підприємств, установ, організацій та громадян, встановлює порядок організації державної санітарно-епідеміологічної служби і здійснення державного санітарно-епідеміологічного нагляду в Україні.

- Закон України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності". Закон відповідно до Конституції України та Основ законодавства України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування визначає правову основу, економічний механізм та організаційну структуру загальнообов'язкового державного соціального страхування громадян від нещасного випадку на виробництві та професійного

захворювання, які призвели до втрати працездатності або загибелі застрахованих на виробництві (далі - страхування від нещасного випадку).

- Кодекс законів про працю України (КЗпП).

Спеціальними законодавчими та нормативними актами в галузі охорони праці є:

- Державні нормативні акти про охорону праці;

- Державні стандарти;

- Системи стандартів безпеки праці;

- Будівельні норми та правила;

- Санітарні норми;

- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, та інші нормативні документи.

В основу розвитку законодавчої бази охорони праці покладений Закон України "Про охорону праці", дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах.

Особливою відмінністю Закону, що регламентує правову основу охорони праці є високий рівень прав і гарантій працівником. Працівникам було надано право відмовитись від дорученої роботи, якщо створилася виробнича ситуація, небезпечна для його життя чи здоров'я або для людей, які його оточують, і навколишнього природного середовища. Також було розширено права працівників у соціальних гарантіях відшкодування збитків у випадку ушкодження їх здоров'я на виробництві. Було передбачено нову систему фінансування охорони праці, сформовано систему страхування від нещасних випадків і профзахворювань, підсилено централізацію планування. З позиції законодавчої регламентації прав і гарантій працівникам у сфері охорони праці та їх забезпечення Закон України "Про охорону праці" та нормативно-правові документи щодо його реалізації одержали високу оцінку експертів Міжнародної організації праці.

В Основному Законі Україні – Конституції питанням охорони праці присвячені деякі статті.

В статті 43 Конституції України записано:

– "Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується";

– "Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом";

– "Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється".

В статті 45 Конституції України Кожен сказано, що - хто працює, має право на відпочинок. Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництва, скороченої тривалості роботи у нічний час.

У тексті статті 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом.

Власники підприємств, установ, організацій або уповноважені ними органи розробляють на основі Державних нормативних актів про охорону праці (ДНАОП) і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти про охорону праці, що діють у межах підприємства, установи, організації.

Правила охорони праці поширюються на всі підприємства, установи й організації незалежно від підпорядкування та форми власності, на підприємців, фермерів та інших юридичних і фізичних осіб.

Правила встановлюють вимоги безпеки праці до організації й виконання технологічних процесів по вирощуванню, збиранню і первинній обробці сільськогосподарських культур, виробництву і первинній обробці продукції

тваринництва й птахівництва, а також під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт та транспортування вантажів.

Правила є обов'язковими для керівників, спеціалістів і робітників підприємства, а також для тимчасово залучених до праці осіб, студентів та учнів профтехучилищ, які проходять виробничу практику на підприємствах.

А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва

Вібрація серед всіх видів механічних впливів для технічних об'єктів найбільш небезпечна. Знакозмінні напруження, викликані вібрацією сприяють накопиченню пошкоджень в матеріалах, появі тріщин та руйнуванню. Найчастіше і досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу. Вібрації викликають також й відмови машин, приладів [17].

За способом передачі на тіло людини вібрацію поділяють на загальну, яка передається через опорні поверхні на тіло людини, та локальну, котра передається через руки людини. У виробничих умовах. часто зустрічаються випадки комбінованого впливу вібрації – загальної та локальної.

Вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини. Стійкі шкідливі фізіологічні зміни називають вібраційною хворобою. Симптоми вібраційної хвороби проявляються у вигляді головного болю. заніміння пальців рук, болю в кистях та передпліччі виникають судоми, підвищується чутливість до охолодження, з'являється безсоння. При вібраційній хворобі виникають патологічні зміни спин мозку, серцево-судинної системи, кісткових тканин та суглобів змінюється капілярний кровообіг. Функціональні зміни, пов'язані з дією вібрації на людину-оператора погіршення зору, зміни реакції вестибулярного апарату, виникнення галюцинацій, швидка втомлюваність. Негативні відчуття від вібрації виникають при прискореннях, що складають 5% прискорення сили ваги, тобто при 0,5м/с^2. Особливо шкідливі

вібрації з частотами, близькими до частот власних коливань тіла людини, більшість котрих знаходиться і межах від 6 до 30Гц.

Резонансні частоти окремих частин тіла наступні:

- очі – від 22 до 27;
- горло – від 6 до 12;
- грудна клітка – від 2 до 12;
- ноги, руки – від 2 до 8;
- голова – від 8 до 27;
- обличчя та щелепи – від 4 до 27;
- поясничная частина хребта – від 4 до 14;
- живіт – від 4 до 12.

Загальну вібрацію за джерелом її виникнення поділяють на:

- транспортну, котра виникає внаслідок руху по дорогах;
- транспортно-технологічну, котра виникає при роботі машин, які виконують технологічні операції в стаціонарному положенні або при переміщенні по спеціально підготовлених частинах виробничих приміщень, виробничих майданчиків;
- технологічну, що впливає на операторів стаціонарних машин або, передається на робочі місця, які не мають джерел вібрації.

Для створення нормальних умов виробничої діяльності необхідно забезпечити не лише комфортні метеорологічні умови, а й необхідну чистоту повітря. Внаслідок виробничої діяльності у повітряне середовища приміщень можуть надходити різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах.

Шкідливі речовини можуть потрапити в організм людини через органи дихання, органи травлення, а також шкіру та слизові оболонки. Через дихальні шляхи потрапляють пари, газо- та пилоподібні речовини, а через шкіру – переважно рідини. Через шлунково-кишкові шляхи потрапляють речовини під час ковтання, або при внесенні їх у рот забрудненими руками.

Необхідно врахувати, що у виробничих умовах працівники, як правило, зазнають одночасного впливу кількох шкідливих речовин у тому числі й пилу. При цьому їх спільна дія може бути взаємо підсиленою, взаємо послабленою чи "незалежною".

З кожним роком зростає виробництво та споживання електроенергії, а відтак і кількість людей, які в процесі своєї життєдіяльності використовують електричні пристрої та установки. Тому питання електробезпеки набувають особливої ваги.

Основними причинами електротравматизму на виробництві є: випадкове доторкання до неізольованих струмопровідних частин електроустаткування; використання несправних ручних електроінструментів; застосування нестандартних або несправних переносних світильників напругою 220 чи 127В; робота без надійних захисних засобів та запобіжних пристосувань;доторкання до незаземлених корпусів електроустаткування, що опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції; недотримання правил улаштування, технічної експлуатації та правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок та інші [17].

Електроустаткування, з яким доводиться мати справу практично всім працівникам на виробництві, становить значну потенційну небезпеку ще й тому, що органи чуття людини не здатні на відстані виявляти наявність електричної напруги. В зв’язку з цим захисна реакція організму проявляється лише після того, як людина потрапила під дію електричної напруги. Проходячи через організм людини електричний струм справляє на нього термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.

Забезпечення пожежної безпеки – це один із важливих напрямків щодо охорони життя та здоров'я людей. Значний відсоток пожеж причинений незадовільним станом електричного устаткування та приладів, а також порушенням правил їх монтажу та експлуатації. До чинників, що можуть викликати пожежу саме з цієї причини належать: короткі замикання,

несправності електроустаткування та приладів, струмові перевантаження, що виникають у силових та освітлюваних електромережах, великі значення перехідних опорів.

Короткі замикання виникають внаслідок неправильного монтажу або експлуатації, старіння або пошкодження ізоляції. Струм короткого замикання залежить від потужності джерела струму, відстані від джерела струму до місця замикання та виду замикання. Великі струми замикання викликають іскріння та нагрівання струмопровідних частин до високої температури, що може викликати займання ізоляцій провідників та горючих будівельних конструкцій, які знаходяться поряд.

Струмові перевантаження виникають при ввімкненні до мережі додаткових споживачів струму або при зниженні напруги в мережі. Тривале перевантаження призводить до нагрівання провідників, що може викликати займання ізоляції.

Вибір типу електроустаткування, схеми електропроводки, використовуваних матеріалів, площі поперечного перерізу провідників, виду ізоляції залежить від ступеня вибухопожежонебезпеки навколишнього середовища, режиму роботи електроустановок та можливих перевантажень.

А.3 Заходи з усунення чи зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва.

Загальні методи боротьби з вібрацією базуються на аналізі рівнянь котрі описують коливання машин у виробничих умовах і класифікуються наступним чином [7]:

- зниження вібрацій в джерелі виникнення шляхом зниження або усунення збуджувальних сил;

- відлагодження від резонансних режимів раціональним вибором приведеної маси або жорсткості системи, котра коливається;

- вібродемпферування – зниження вібрацій за рахунок сили тертя демпферного пристрою, тобто переведення коливної енергії в тепло;

- динамічне гасіння – введення в коливну систему додаткових мас або збільшення жорсткості системи;

- віброізоляція – введення в коливну систему додаткового пружного зв'язку, з метою послаблення передавання вібрацій, суміжному елементу конструкції або робочому місцю;

- використання індивідуальних засобів захисту.

Зниження вібрації в джерелі її виникнення досягається шляхом зменшення сили, яка викликає коливання. Зниження вібрації може бути досягнуте зрівноваженням мас, зміною маси або жорсткості, зменшенням технологічних допусків при виготовленні і складанні, застосуванням матеріалів з великим внутрішнім тертям. Велике значення має підвищення точності обробки та зниження шорсткості поверхонь, що труться.

Всі, хто працює з джерелами вібрації, повинні проходити медичні огляди перед вступом на роботу і періодично, не рідше одного разу на рік.

До загальних заходів та засобів попередження забруднення повітряного середовища на виробництві та захисту працюючих належать:

- вилучення шкідливих речовин у технологічних процесах, заміна шкідливих речовин менш шкідливими і інше;

- удосконалення технологічних процесів та устаткування;

- автоматизація і дистанційне керування технологічними процесами, при яких можливий безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;

- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції, аспіраційних укриттів;

- нормальне функціонування систем опалення загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очистки викидів у атмосферу;

- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни.

Застосовувані в електроустановках захисні заходи умовно можна поділити на дві групи: ті, що забезпечують безпеку при нормальному режимі роботи електроустановок і ті, що забезпечують безпеку при аварійному режимі роботи.

Електрична ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, котрим вкривається поверхня струмоведучих частин, або котрим струмоведучі частини відділяються одна від одної. Стан ізоляції характеризується її електричною міцністю, діелектричними втратами та електричним опором. Ізоляція запобігає протіканню струмів через неї завдяки великому опору.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання із землею або з її еквівалентом металевих нормально неструмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою. Призначення захисного заземлення полягає в тому, щоб у випадку появи напруги на металевих конструктивних частинах електроустаткування (наприклад, внаслідок замикання на корпус при пошкодженні ізоляції) забезпечити захист людини від ураження електричним струмом при її доторканні до таких частин. Це досягається шляхом зниження до безпечних значень напруг доторкання до корпусу [3].

Занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих нормально неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою.

Захисне вимикання застосовується як основний або додатковий захисний засіб, якщо безпека не може бути забезпечена шляхом влаштування заземлення, або іншими способами захисту. Захисне вимикання – це швидкодіючий захист, який забезпечує автоматичне вимкнення електроустановки при виникненні в ній небезпеки ураження струмом [15].

А.4 Розрахунок захисного заземлення

З метою запобігання ураження електричним струмом, людей які працюють з електричним обладнанням, необхідно розрахувати захисне заземлення [3].

Розрахувати захисне заземлення електрообладнання електричної мережі напругою 220/380В з ізольованою нейтраллю. Електрообладнання розміщено в електромеханічному цеху, кліматична зона ІІІ. Склад ґрунту – однорідний. Тип заземлюваного пристрою – кутова сталь з шириною сторін B_K. Довжина вертикальних заземлювачів L_B. Відстань між вертикальними заземлювачами a. Глибина закладання вертикальних заземлювачів H_0. З'єднувальна стрічка – смуга шириною B_C. Опір розтікання струму заземлюючого пристрою повинен бути не більше $R_{ДОП}$.

Вихідні дані:

- параметри вертикальних заземлювачів:

$B_K = 40 \times 40$ мм;

$L_B = 2{,}5$м;

$a = 2{,}5$ м.

$H_0 = 0{,}7$ м;

$B_C = 40 \times 4$ мм;

- опір розтікання струму – $R_{ДОП} = 2$ Ом;

- грунт – глина.

Порядок розрахунків:

1. Визначити допустиме (нормальне) значення опору розтікання струму в заземлюючому пристрої. Згідно ПУЕ $R_{ДОП} \le 2$ Ом.

2. Визначити розрахунковий питомий опір ґрунту для ІІІ-ї кліматичної зони, вологість підвищена :

$$\rho_{РОЗР} = \rho_{ТАБЛ} \cdot K_{С.В.}$$

$\rho_{ТАБЛ} = 40$ Ом·м, табл.3.11 [3]; $K_{С.В.} = 1{,}5$, табл. 3.12, 3.13 [3].

$$\rho_{РОЗР} = 40 \cdot 1{,}5 = 60 \text{ Ом·м.}$$

3. Визначити H – відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача :

$$H = H_0 + \frac{L_B}{2}$$

$$H = 0{,}7 + \frac{2{,}5}{2} = 1{,}95 \text{ м}$$

4. Визначити опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_B = \frac{\rho_{РОЗР}}{2 \cdot \pi \cdot L_B} (\ln \frac{2L_B}{d_{ЕКВ}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + L_B}{4H - L_B})$$

$d_{ЕКВ} = 0{,}95 \cdot B_K = 0{,}95 \cdot 0{,}04 = 0{,}038$ м.

$$R_B = \frac{60}{15{,}7} (\ln \frac{5}{0{,}038} + \frac{1}{2} \ln \frac{6{,}4}{1{,}4}) = 3{,}82(4{,}88 + 0{,}76) = 21{,}54 \text{ Ом.}$$

5. Визначити орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів при $\eta_B = 1$:

$$n_{ор} = \frac{R_B}{R_{ДОП} \cdot \eta_B} = \frac{21{,}54}{2 \cdot 1} = 10{,}77 \text{ шт.}$$

Приймаємо $\eta_{ОР} = 11$ шт.

6. Визначити коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів η_B, з таблиці 3.14 [3]. Заземлювачі розташовані в ряд $\frac{a}{L_B}=1$. Приймаємо $\eta_B=0{,}6$.

7. Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з врахуванням

$$n_B=\frac{n_{OP}}{\eta_B}=\frac{11}{0{,}6}=18{,}33 \text{ шт.}$$

Приймаємо $n_B=19$ шт.

8. Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при $n_{\mathbf{B}}=19$ шт :

$$R_{РОЗР.В}=\frac{R_B}{n\cdot\eta_B}=\frac{21{,}54}{19\cdot 0{,}6}=1{,}89 \text{ Ом}$$

9. Визначаємо довжину з'єднувальної стрічки :

$$L_c=1{,}05\cdot a(n_B-1)=47{,}25 \text{ м}$$

10. Визначаємо опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі :

$$R_Г=0{,}366\cdot\frac{\rho_{РОЗР}}{L_C}\lg\frac{2L_C{}^2}{H_0\cdot B_C}$$

$$R_Г=0{,}366\cdot\frac{60}{47{,}25}\lg\frac{4465{,}13}{0{,}028}=2{,}39 \text{ Ом}$$

11. Визначаємо коефіцієнт використання горизонтального заземлювача.

За табл.3.17 [3] при а / L_B=1, $n_B=19$ отримаємо $\eta_Г=0{,}27$

12. Визначаємо опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з врахуванням $\eta_Г$:

$$R_{РОЗР.Г}=\frac{R_Г}{\eta_Г}=\frac{2{,}39}{0{,}27}=8{,}85 \text{ Ом}$$

13. Визначаємо опір розтікання струму в горизонтальних та вертикальних заземлювачах :

$$R_{РОЗР} = \frac{R_{РОЗР.В} \cdot R_{РОЗР.Г}}{R_{РОЗР.В} + R_{РОЗР.Г}} = \frac{1{,}89 \cdot 8{,}85}{1{,}89 + 8{,}85} = \frac{16{,}73}{10{,}74} = 1{,}56 \text{ Ом}$$

$$R_{РОЗР} < R_{ДОП} \qquad 1{,}56 < 2$$

Отриманий розрахунковий опір розтікання струму відповідає вимогам ПУЕ.

14. Схема з'єднування обладнання з магістральною шиною з'єднання магістральної шини з заземлювальним пристроєм наведена на рис. 6.1.

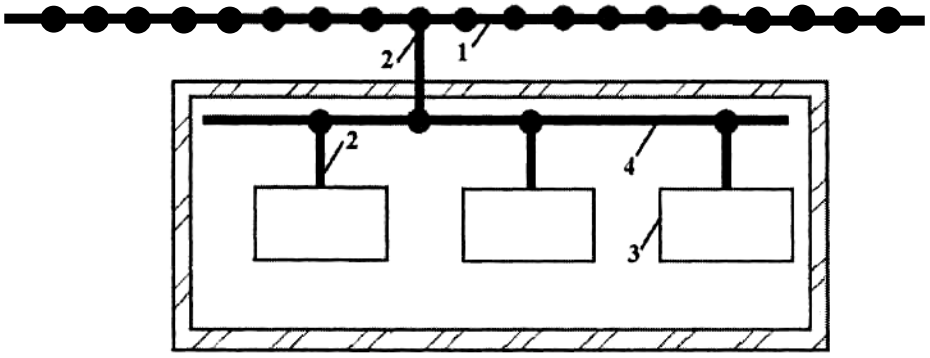


Рисунок 6.1 – Схема захисного заземлення:

1 – заземлюючий пристрій;

2 – заземлюючі провідники;

3 – обладнання, що заземлюється;

4 – внутрішня магістраль заземлення.

ДОДАТОК Б ОЧІКУВАНІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Б.1 Техніко-економічне обґрунтування розробки системи

Установка електронно-променевого напилювання призначена для напилювання тонких плівок різних матеріалів у надвисокому вакуумі на підкладку діаметром до 150 мм або декількох підкладок меншого розміру.

Областю застосування установки електронно-променевого напилювання є фундаментальні й прикладні наукові дослідження, дослідно-конструкторські роботи й дрібносерійне експериментальне виробництво в напівпровідниковій техніці, мікросистемотехніку й нанотехнології й технології приладів мікроелектроніки.

Конструкція установки дозволяє послідовно наносити тонкі плівки п'яти різних матеріалів на зразки діаметром до 150 мм (або на кілька зразків, поміщених на 150 мм тримач). У базовій комплектації установка укомплектована шлюзом, електронно-променевим випаровувачем із блоком живлення 3кВт [11].

В результаті заміни мікросхеми КР580ВМ80А контролеру кварцових датчиків на нову ATmega103 зменшилась кількість бракованих виробів, зменшились витрати на напиляємий матеріал – полі-n-ксилілен. Підвищилась якість та надійність системи.

Таблиця Б.1 – Технічні характеристики установки електронно-променевого напилення

Показники, їх одиниці вимірювання	Позначення	Величина за вартостями	
		Базовими	Новими
Річний об’єм випуску, шт	$N_Н$	5	5
Процент браку	$П_Б$	20	5
Споживаєма потужність, кВт	$М$	3	3
Процент зменшення витрат напилюваного матеріалу	$П$	–	10
Нормативний строк служби, років	$T_{СЛ}$	10	10
Кількість відказів за рік	$n_В$	3	1
Кількість годин відновлення після відмови	$t_В$	5	3

Б.2 Витрати на виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт

Витрати на проведення НДДКР являються складовою частиною капітальних вкладень, які передбачаються для виготвлення або модернізації установки електронно-променевого напилення. Вартість НДДКР необхідно визначити шляхом розрахунку за окремими статтями витрат у вигляді кошторису (табл. Б.2). Трудоємкість робіт по кожній статті залежить від призначення, ступені новизни, особливостей конструкції виробу [2].

Таблиця Б.2 – Трудоємкість виконання НДДКР

Статті витрат та зміст робіт	Трудоємкість в людино-днях	Питома вага в загальному обсязі, %
Постановка задачі, збір інформації, формулювання технічного завдання	3,2	8
Аналіз діючої системи виявлення недоліків, розробка заходів по її модернізації	6	15
Розробка ескізного проекту та блок-схема	6	6
Розробка принципіальних електричних схем, виконання розрахунків	12	30
Розробка печатних плат та печатних схем	10,4	26
Складання специфікацій та розробка робочої документації	6	15
Всього витрат часу	$T_{НД}$=40	100

На основі трудомісткості робіт розраховується плановий фонд заробітної плати для проведення наукових досліджень:

$$З_{НД} = T_{НД} \cdot Q_{НД}(1+0{,}01 \cdot H_Д)(1+0{,}01 \cdot H_С),$$

$$З_{НД} = 40 \cdot 90 \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 20) \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 37) = 5918{,}4 \text{ грн},$$

де $Q_{НД} = 90$ грн – середньоденний оклад конструктора;

$H_Д$ – процент додаткової зарплати (20%);

$H_С$ – норматив відрахувань на соціальні заходи, (37%).

Величина витрат по кожній статті кошторису НДДКР визначається методом прямого розрахунку і заноситься до таблиці Б.2.

Витрати за статтею “Матеріали, купівельні вироби та напівфабрикати” включають вартість матеріалів, які використовуються для виготовлення макетів, зразків, допоміжних матеріалів, пов’язаних з виконанням НДДКР.

Витрати по статті “Спеціальне обладнання” розраховуються за балансовою вартістю стендів, приладів, установок, які необхідні для проведення НДДКР.

Таблиця Б.3 – Кошторис витрат на виконання НДДКР

Найменування статтей	Позначення	Величина, грн
Матеріали, купівельні вироби та напівфабрикати	$М_{НД}$	700
Спеціальне обладнання	$О_{НД}$	560
Заробітна плата науково-виробничого персоналу	$З_{НД}$	5918,4
Витрати на наукові відрядження	$В_{НД}$	400
Послуги сторонніх організацій	$П_{НД}$	100
Загальногосподарські (накладні) витрати	$Н_{АК}$	130
Всього	$К_{НД}$	7808,4

Б.3 Матеріальні витрати на виготовлення виробу

Величина матеріальних витрат, необхідних для виготовлення виробу (блоку, приладу), визначається методом прямого розрахунку в залежності від їх застосування та норм розходу на один виріб з урахуванням вартості матеріалів і транспортно – заготівельних операцій.

Витрати на основні матеріали, покупні комплектуючі вироби розраховуються за формулою:

$$M_O = H_M \cdot Ц_M \cdot K_{ТЗ}$$

де H_M – норма витрат матеріалу на один виріб,

$Ц_M$ – ціна матеріалу за одиницю вимірювання, грн.,

$K_{ТЗ}$ – коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат.

$K_{ТЗ}$=1,1.

Таблиця Б.4 – Матеріальні витрати на виріб

Найменування матеріалів, одиниці виміру	Позначення	Норма витрат на виріб, H_M	Вартість одиниці, грн., $Ц_M$	Витрати на один виріб, грн.
1.Основні матеріали, кг	M_O			
- чорні метали, кг		5	3,2	17,6
- кольорові метали, кг		10	9,5	104,5
- кабельні матеріали, м (дріт)		3	5	16,5
Всього витрат				138,6
2.Покупні матеріали	$M_П$			
- мікропроцесор ATmega103		1	735	808,5
- мікросхеми, шт		15	301	4966,5
- радіодеталі, шт		20	15	330
Всього витрат				6105
3. Допоміжні матеріали, грн	M_B	-	-	374,6
4. Зворотні вітходи	O_B	-	-	330,9

Величина зворотних відходів складає до 5% від вартості основних матеріалів та комплектуючих виробів.

Витрати на допоміжні матеріали в радіоелектронній промисловості складають до 6% від суми витрат на основні матеріали та покупні вироби.

$$M_B = \frac{(138{,}6 + 6105) \cdot 6}{100} = 374{,}6 \text{ грн},$$

$$O_B = \frac{(138{,}6 + 6105 + 374{,}6) \cdot 5}{100} = 330{,}9 \text{ грн}.$$

Б.4 Заробітна плата основних робочих за виготовлення виробів

Розрахунки по заробітній платі для непрямих витрат проводяться за нормативами того підприємства на якому виготовляються аналогічні вироби. Розрахунок зарплати по виготовленню виробу виконується з урахуванням трудомісткості робіт, годинних тарифних ставок, а також нормативів доплат до заробітної плати.

Таблиця Б.5 – Основна заробітна плата

Види робіт	Годинна тарифна ставка	Норма трудомісткості, годин	Оплата по тарифу, грн.
1. Заготівельні	$Ч_З$ = 21,6	$Т_З$ = 22,4	$О_З$ = 483,84
2. Механообробні	$Ч_М$ = 24	$Т_М$ = 15,6	$О_М$ = 374,4
3. Складальні	$Ч_С$ = 24	$Т_С$ = 46	$О_С$ = 1104
4. Регулювальні	$Ч_Р$ = 25,6	$Т_Р$ = 28	$О_Р$ = 716,8
Всього по виробу	-	-	$З_О$ = 2679,04

Основна зарплата за виготовлення одного виробу по всіх стадіях виробництва:

$$З_О = \sum_{1}^{4} О_i ,$$

$$З_О = 483{,}84 + 374{,}4 + 1104 + 716{,}8 = 2679{,}04 \text{ грн},$$

де $О_i$ – основна зарплата на виконання даного виду робіт.

Додаткова зарплата на виготовлення одного виробу:

$$З_Д = З_О \cdot \frac{Н_Д}{100},$$

$$З_Д = 2679{,}04 \cdot \frac{20}{100} = 536 \text{ грн},$$

де $Н_Д$ – норматив додаткової зарплати по даному підприємству за відпрацьований та невідпрацьований час(20%).

Відрахування у соціальні фонди:

$$О_С = (З_О + З_Д) \cdot \frac{Н_С}{100},$$

$$О_С = (2679{,}04 + 536) \cdot \frac{37}{100} = 1189{,}56 \text{ грн},$$

де $Н_С$ - норматив відрахування у соціальні фонди(37%).

Б.5 Розробка калькуляції собівартості установки електронно-променевого напилення

За результатами проведених розрахунків складаємо нормативну калькуляцію (табл. Б.5) собівартості виготовлення модернізованої установки електронно-променевого напилення.

Витрати цільового призначення (на спеціальне устаткування та оснащення) визначається за нормативами підприємства, яке виробляє аналогічну техніку.

Витрати на паливо і енергію для технологічних цілей визначається з урахуванням витрачання енергоносіїв для регулювання та випробовування виробу під навантаженням:

$$T_{ЕЛ} = \frac{M}{1000} \cdot T_{РЕГ} \cdot Ц_{ЕЛ},$$

$$T_{ЕЛ} = \frac{3000}{1000} \cdot 5 \cdot 1{,}1 = 16{,}8 \text{ грн.},$$

де M =3000 – споживаєма потужність виробу, Вт

$T_{РЕГ}$=5 – норма часу для регулювання виробу під навантаженням, годин.

$Ц_{ЕЛ}$=1,1 – ціна електроенергії за кіловат-годину.

Інші витрати заносяться до калькуляції згідно з розрахунками в попередніх розділах.

Таблиця Б.6 – Розробка калькуляції собівартості модернізації установки електронно-променевого напилення

Статті витрат	Позначення	Величина витрат, грн.
1. Витрати цільового призначення	$З_{НД}$	214,32
2. Сировина та основні матеріали	$М_О$	138,6
3. Покупні вироби	$М_П$	6105
4. Допоміжні матеріали	$М_В$	374,9
5. Зворотні вітходи (віднімаються)	$О_В$	-330,9
6. Паливо і енергія для технологічних цілей	$Т_{ЕЛ}$	16,8
7. Основна зарплата основних робітників	$З_О$	2679,04
8. Додаткова зарплата	$З_Д$	536
9. Відрахування в соціальні фонди	$О_С$	1189,56
Всього повна собівартість	$С_П$	10941,32

Витрати цільового призначення складають 8% від основної заробітної плати:

$$З_{НД} = З_О \cdot \frac{8}{100} = 2679{,}04 \cdot \frac{8}{100} = 214{,}32 \text{ грн.}$$

Б.6 Визначення ціни установки електронно-променевого напилення

Проектна ціна нового модернізованого виробу ($Ц_Н$) визначається з урахуванням попиту на продукцію або по договору із замовником (споживачем). При державному регулюванні ціну можна розрахувати за допомогою граничного рівня рентабельності ($P_Н$=18%), по відношенню до повної собівартості:

$$Ц_Н = С_П \cdot (1 + 0{,}01 \cdot P_Н)$$

$$Ц_Н = 10941{,}32 \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 18) = 12910{,}76 \text{ грн.}$$

Б.7 Визначення витрат на експлуатацію установки електронно-променевого напилення

Для визначення витрат у споживача виробу (системи) розробляється кошторис (табл. Б.7), розрахунки виконуються для базового і проектного варіантів.

Таблиця Б.7 – Експлуатаційні витрати

Статті витрат	Позначення	Сума витрат за варіантами, грн.	
		Базовий	Новий
1. Матеріали для технологічних цілей: полі-n-ксилілен заготовки Всього витрат	$З_{МТ}$	 5280 72000 77280	 4800 63000 67800
2. Електроенергія	$З_{ЕЛ}$	3168	3142
3. Поточні ремонти	$З_Р$	528,8	162,2
4. Амортизація	$З_{АМ}$	-	3550,46
Всього витрат на експлуатацію	$З_{ЕК}$	$З^Б_{ЕК}$ = 80976,8	$З^Н_{ЕК}$ = 74654,66

Витрати на напиляєму речовину – полі-n-ксилілен:

$$З_{МТ} = Н_{МТ} \cdot S \cdot F_{РД} \cdot Ц_{МТ} \cdot П,$$

де $Н_{МТ} = 0{,}1$ кг – норми витрат напилюємого матеріалу за зміну;

S =1 – прийнята змінність роботи підрозділу, де використовується система;

$F_{РД}$=240 робочих днів – річний фонд часу роботи оператора, робочих днів (365 днів у році крім вихідних і свят);

$Ц_{МТ} = 200$ грн/кг – ціна за одиницю матеріалу.

для базової системи з врахуванням втрат:

$$З^{Б}_{МТ} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 200 \cdot 1{,}1 = 5280 \text{ грн.},$$

для нової системи:

$$З^{Н}_{МТ} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 200 \cdot 1 = 4800 \text{ грн.}$$

Визначимо витрати на заготовки:

$Н_{МТ} = 5$ шт – норми витрат заготовок за зміну;

$Ц_{МТ} = 50$ грн/шт – ціна за одиницю матеріалу.

для базової системи з врахуванням втрат:

$$З^{Б}_{МТ} = 5 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 50 \cdot 1{,}2 = 72000 \text{ грн.},$$

для нової системи:

$$З^{Н}_{МТ} = 5 \cdot 1 \cdot 240 \cdot 50 \cdot 1{,}05 = 63000 \text{ грн.}$$

Витрати за електроенергію визначаються з урахуванням споживаємої системою потужності ($М = 3$) в кіловатах, та річного фонду роботи ($Ф_Р = 240 \cdot 4 = 960$ годин для базової та $Ф_Р = 238 \cdot 4 = 952$ годин для нової системи):

$$З_{ЕЛ} = М \cdot Ф_Р \cdot Ц_{ЕЛ},$$

для базової системи:

$$З^{Б}_{ЕЛ} = 3 \cdot 960 \cdot 1{,}1 = 3168 \text{ грн.},$$

для нової системи:

$$З^{Н}_{ЕЛ} = 3 \cdot 952 \cdot 1{,}1 = 3142 \text{ грн.},$$

де $Ц_{ЕЛ}$ = 1,1 грн. – ціна за кіловат-годину електроенергії.

Витрати на поточні планові ремонти визначаються в залежності від конкретних умов експлуатації системи. При цьому враховуються матеріальні витрати ($М_{РЕМ} = 100$ грн. для базової та $М_{РЕМ} = 80$ грн. для нової системи) для

проведення одного ремонту (запасні частини та інші матеріали), час проведення одного ремонту в годинах ($t_р = 2$ та $t_р = 1$для базової та нової системи відповідно), середньогодинна тарифна ставка ремонтного працівника ($l_р$=50):

$$З_Р = П_Р \cdot (М_{РЕМ} + t_р \cdot l_р \cdot (1 + 0{,}01 \cdot Н_Д) \cdot (1 + 0{,}01 \cdot Н_С)),$$

для базової системи:

$$З_Р^Б = 2 \cdot (100 + 2 \cdot 50 \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 20) \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 37)) = 528{,}8 \text{ грн.},$$

де $П_Р$=2 – кількість планових ремонтів за рік.

Для нової системи:

$$З_Р^Н = 1 \cdot (80 + 1 \cdot 50 \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 20) \cdot (1 + 0{,}01 \cdot 37)) = 162{,}2 \text{ грн.},$$

де $П_Р$=1 – кількість планових ремонтів за рік.

Витрати по амортизації виробу (системи) визначається за нормою амортизації ($Н_{АМ}$=25%) та балансовою вартістю (Бал=$Ц_Н$·1,1):

$$З_{АМ} = \frac{Н_{АМ} \cdot Бал}{100}$$

Для нової системи:

$$З_{АМ}^Н = \frac{25 \cdot 12910{,}76 \cdot 1{,}1}{100} = 3550{,}46 \text{ грн.}$$

В балансову вартість включають ціну виробу, витрати на транспортування та підготовку до промислової експлуатації.

Б.8 Визначення економічного ефекту від підвищення надійності роботи системи

Модернізація системи управління технологічним процесом, як правило, підвищує надійність її функціонування. Результуючим показником надійності є кількість можливих відмов у роботі системи за період експлуатації.

Головною умовою для оцінки економічного ефекту від підвищення надійності є зменшення кількості відмов.

За результатом порівняльного аналізу нової техніки з базовим варіантом визначається розбіжність переметрів надійності. Потім виявляються складові ефекту.

Від підвищення надійності, основними з яких можуть бути:

- економія від зменшення кількості запасних частин (комплектуючих виробів);

- зниження витрат на відновлення працездатності технічної системи після відмови;

- скорочення матеріальних витрат на виробництво при використанні високонадійної техніки;

- зменшення часу незапланованого простою устаткування внаслідок відмов.

Економія від зменшення кількості запасних частин визначається методом прямого розрахунку, як різниця:

$$E_{ЗЧ} = Зб_{Б} - Зн_{Н}$$
$$E_{ЗЧ} = 500 - 220 = 280 \text{ грн.}$$

$Зб_{Б} = 500, Зн_{Н} = 220$ – вартість запасних частин за базовим та новим варіантами відповідно, грн.

Економічний ефект від зниження витрат на відновлення роботоздатності системи після відмови:

$$E_{ВІДМ} = n_{в}^{б} \cdot s_{в}^{б} - n_{в}^{н} \cdot s_{в}^{н},$$
$$E_{ВІДМ} = 3 \cdot 365{,}92 - 1 \cdot 587{,}55 = 510{,}21 \text{ грн.}$$

де $n_{в}^{б} = 3, s_{в}^{б} = 1$ – кількість відмов за рік відповідно базової і нової системи;

$n_{в}^{н} = 365{,}92, s_{в}^{н} = 587{,}55$ – середні витрати на усунення однієї відмови, за порівнюваними варіантами, грн.

$$S_{В} = Ц_{В} + I_{Ч} \cdot t_{В}(1 + K_{ДС}/100),$$

для базової системи:

$$S_{В}^{Б} = 220 + 25{,}6 \cdot 5(1 + 14/100) = 365{,}92 \text{ грн.}$$

де $Ц_{В}$=220 – балансова вартість замінених елементів, грн.

$I_{Ч}$=25,6 – середня годинна тарифна ставка робітника по усуненню несправності, грн;

для нової системи:

$$S_{В}^{Н} = 500 + 25{,}6 \cdot 3(1 + 14/100) = 587{,}55 \text{ грн.}$$

де $Ц_{В}$=500 – балансова вартість замінених елементів, грн.

$I_ч$=25,6 – середня годинна тарифна ставка робітника по усуненню несправності, грн;

$t_В$=3 – кількість годин відновлення системи після однієї відмови (включає час виявлення, час усунення несправності, час виходу системи на нормальний режим роботи);

$К_{ДС}$ =14% – процент додаткової зарплати та відрахування на соціальні заходи.

Загальна величина економії від підвищення надійності роботи технічної системи:

$$E_{НАД} = (E_{ЗЧ} + E_{ВІДМ})$$

$$E_{НАД} = (280 + 587{,}55) = 867{,}55\,\text{грн.}$$

Б.9 Визначення економічної ефективності при виготовленні виробу

Показники економічної ефективності при виробництві модернізованих виробів слугують: річний економічний ефект при виготовленні і реалізації виробів та період окупаємості додаткових капітальних вкладень в освоєння випуску нової техніки.

Величина річного економічного ефекту при виготовленні та реалізації модернізованих виробів замість базових розраховується за формулою:

$$E_{ВИТ} = [Ц_Н - C_Н] \cdot N_Н - E_Н \cdot К_М,$$

$$E_{ВИТ} = [12910{,}76 - 10941{,}32] \cdot 5 - 0{,}25 \cdot 20719{,}16 = 4667{,}41\,\text{грн.}$$

де $Ц_Н$ =1291,76 – ціни модернізованого виробу, грн.,

$C_Н$ =10941,32 – повна собівартість модернізованого виробу, грн.,

$N_Н$ =5 – річний випуск модернізованих виробів, шт.,

$E_Н$ =25% – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень;

$К_М$ – об’єм додаткових капітальних вкладень в освоєння випуску виробів, грн.

В загальному випадку в склад капітальних витрат можуть входити: витрати на проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, (табл. 7.2), проектна оптова ціна системи (розділ 7.6):

$$K_M = K_{НД} + Ц_M$$

$$K_M = 7808{,}4 + 12910{,}76 = 20719{,}16 \text{ грн.}$$

Період окупності додаткових капітальних вкладень у виробника нової системи:

$$T_{ВИГ} = \frac{K_M}{[Ц_M - C_Б] \cdot N_M} \text{ (років)}$$

$$T_{ВИГ} = \frac{20719{,}16}{9847{,}2} = 2{,}1 \text{ року.}$$

Період окупності додаткових капітальних вкладень у виробника нової системи 2,1 року.

Б.10 Визначення економічної ефективності у сфері експлуатації системи

При експлуатації системи (виробу) сукупний економічний ефект складають:

$$E_{ЕКС} = (З^Б_{ЕК} - З^Н_{ЕК}) + E_{НАД} - E_Н \cdot Б^Н_{АЛ},$$

$$E_{ЕКС} = (80976{,}8 - 74564{,}66) + 867{,}55 - 0{,}25 \cdot 14201{,}84 = 3639 \text{ грн.}$$

$З^Б_{ЕК}, З^Н_{ЕК}$ – величина експлуатаційних витрат в порівнювальних варіантів (із таблиця 7.7) відповідно базового і модернізованого виробів, грн.,

$E_{ЕКС}$ – величина економії від підвищення надійності роботи системи (розділ 7.8), грн.

Період окупаємості додаткових капітальних витрат при експлуатації системи визначається за формулою:

$$T_{ЕКС} = \frac{Б^Н_{АЛ}}{(З^Б_{ЕК} - З^Н_{ЕК}) + E_{НАД}} \text{ (років),}$$

$$T_{ЕКС} = \frac{14201{,}84}{(80976{,}8 - 74564{,}66) + 867{,}55} = 1{,}97 \text{ (років),}$$

$Б^Н_{АЛ} = Ц_Н \cdot 1{,}1 = 14201{,}84$ – балансова вартість модернізованої системи, грн.

Період окупності додаткових капітальних вкладень у споживача нової системи 1,97 року.

Б.11 Зведені техніко-економічні показники

Заключним етапом роботи по економічному обґрунтуванню магістерської роботи є розробка зведених техніко-економічних показників системи за порівнювальними варіантами у вигляді табл. Б.8 (МР-151.21.0102.08.03.ТБ). Склад показників залежить від призначення виробів, широти нововведень, конкретних виробничих умов експлуатації.

Таблиця Б.8 – Зведені техніко-економічні показники системи

№	Найменування показників	Одиниці виміру	Величина по варіантах	
			Базовий	Новий
1.	Річний випуск систем	шт.	5	5
2.	Процент браку	%	20	5
3.	Процент зменшення витрат напилюваного матеріалу	%	–	10
4.	Повна собівартість системи	грн.	–·	10941,32
5.	Ціна реалізації виробу	грн.	–	1000
6.	Економічний ефект: - виробничий - споживчий	грн.		 4667,41 3639
7.	Період окупаємості капітальних вкладень: - у виробника - у споживача	років		 2,1 1,97
8.	Кількість відмов системи за рік	шт.	3	1
9.	Час усунення одного відказу	годин	5	3

В даному розділі відображено призначення установки електронно-променевого напилення, річний об’єм випуску виробів, виявлено недоліки діючих систем, обґрунтовано необхідність і заходи для модернізації виробу з точки зору впливу при застосуванні його у виробництві, визначено техніко – економічні показники використання виробу і витрати на базовий зразок порівняння. Таким чином, розрахунок показників економічної ефективності установки електронно-променевого напилення підтверджує доцільність її розробки і впровадження на виробництвах.